

**Prévision saisonnière du volume naturel de crue des
fleuves Sénégal et Niger, basée sur les résultats du modèle
ARPEGE Climat "couplé"**

Jean-Claude Bader

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

Le 17 Juin 2008

RÉSUMÉ ET CONCLUSION

Des études précédentes ont montré que les résultats du modèle Arpege Climat "forcé" pouvaient être utilisés, après adaptation statistique, pour prévoir début août le débit naturel de septembre octobre du fleuve Sénégal à Bakel (Arpege 3 et Arpege 4.6) et du fleuve Niger à Koulikouro (Arpege 3). Cette prévision a donné des résultats opérationnels assez satisfaisants pour les trois crues d'amplitude variée observées depuis 2005 sur le fleuve Sénégal, permettant ainsi à l'OMVS d'estimer à l'avance les possibilités de reconstitution du stock dans le réservoir de Manantali pendant la seconde moitié de mousson.

Le but de cette étude consiste à recalibrer les modèles de prévision déjà établis pour les fleuves Sénégal et Niger, afin qu'ils utilisent les résultats de la dernière version d'Arpege 4.5, désormais couplée avec un modèle d'océan.

Les données de débit utilisées sont des valeurs observées en septembre octobre depuis 1979. Pour le Sénégal à Bakel, ces débits sont corrigés à partir de 1987 pour effacer l'influence du barrage de Manantali. Pour le Niger à Koulikouro, aucune correction n'est effectuée, l'influence du barrage de Sélingué étant assez minime. Reconstitués en mode prévision sur la période 1979-2007 sur 98 cellules de 300x300 km couvrant l'Afrique de l'Ouest, les résultats d'Arpege 4.5 "couplé" utilisés sont des index pluviométriques mensuels centrés réduits sur la période de référence 1979-2000, calculés début août pour les mois de septembre et octobre.

La démarche suivie pour établir un modèle de prévision de débit reste quasi-inchangée :

- regroupement des index suivant 50 zones élémentaires de formes et tailles différentes combinant 16, 30, 49 ou 98 cellules.

- analyse en composantes principales des index (période 1979-2000) sur chaque zone
- calcul de corrélation linéaire multiple descendante entre les 8 premières composantes principales d'index et le débit à prévoir, sur la période de calage 1979-2000
- Evaluation pour chaque zone, de la probabilité pour que la corrélation entre les 8 premières C.P. d'index et le débit puisse être fortuite : comparaison avec les résultats obtenus pour 50 séries du même débit ordonné de façon aléatoire
- Sur la base des erreurs types de la prévision (calage, validation, période totale), sélection des meilleurs modèles utilisant au plus 5 composantes principales, sur les zones où la relation index-débit risque peu d'être fortuite.
- Parmi les modèles sélectionnés, choix du meilleur modèle pouvant être testé de façon opérationnelle à partir d'août 2008

Les résultats obtenus pour le fleuve Sénégal sont les suivants :

- Les relations établies sur la période de calage entre les 8 premières C.P. d'index et le débit semblent massivement non fortuites. Parmi les 50 zones, les proportions de celles où le R^2 à une probabilité supérieure à $1/2$, $2/3$ et $4/5$ de ne pas être atteint par hasard s'élèvent à $39/50$, $29/50$ et $18/50$. Des proportions si élevées de résultats moyens, bons et excellents, ont une probabilité très faible d'être atteintes ou dépassées par hasard (resp. 0.000045, 0.00030 et 0.0063).
- Globalement sur l'ensemble des zones, les résultats obtenus en validation sont moins bons qu'en calage. Ainsi, le calage du modèle à 8 paramètres semble non fortuit (R^2 ayant une probabilité inférieure à 0.35 d'être obtenu par hasard) pour 32 zones sur 50. Mais les résultats sont inacceptables en validation pour presque la moitié de ces 32 zones : les erreurs types des modèles de 1 à 5 paramètres y dépassent celle du modèle trivial consistant à prévoir un débit égal à la moyenne observée en période de calage.

- Parmi les 17 zones présentant des relations non fortuites et validées, les zones C3, H5, B6, A1, A6, C6, D2, D6, G4 et A3 donnent les meilleurs résultats. Le meilleur modèle, (5 paramètres, $R^2 = 0.6272$), utilise les index de la zone H5 (fig. 1 et 10-A). Cette zone figurait déjà parmi les trois meilleures sur 50 pour la prévision du débit du Sénégal à partir des index d'Arpege 4.6 "forcé".

Les résultats obtenus pour le fleuve Niger sont les suivants :

- Les relations calées entre les 8 premières C.P. d'index et le débit sont probablement non fortuites sur une majorité de zones, mais moins nettement que pour le Sénégal. Les R^2 moyens, bons et excellents sont observés sur 31, 23 et 6 des 50 zones. Ces effectifs ont des probabilités respectives de 0.059, 0.042 et 0.95 d'être atteints ou dépassés par hasard. Les résultats excellents sont donc très rares. Mais les résultats moyens et bons sont fréquents et probablement non fortuits, la médiane du R^2 sur les 50 zones ayant par ailleurs une probabilité 0.3 d'être atteinte ou dépassée par hasard.
- En validation, les résultats obtenus sont relativement meilleurs que pour le fleuve Sénégal. Parmi les 23 zones où le modèle à 8 paramètres semble calé de manière non fortuite, seules quatre ne donnent aucun résultat acceptable en validation. Pour les autres, l'erreur type de validation est inférieure à celle du modèle trivial pour au moins un modèle (et trois en moyenne) utilisant entre 5 et 1 paramètres.
- Parmi les 19 zones présentant des relations non fortuites et validées, les zones H2, I2, I3, H6, F6, A1, G6, I4, K2 et G3 donnent les meilleurs résultats. Le meilleur modèle, (3 paramètres, $R^2 = 0.5055$), utilise les index de la zone H2 (fig. 2 et 17-A).

CONCLUSION. En testant de nombreux modèles statistiques basés sur les index de diverses zones, il est logique qu'on parvienne à identifier des zones donnant de bons résultats en calage. Pour que ces modèles bien calés soient crédibles, il faut non seulement qu'ils soient validés mais aussi qu'ils aient une faible probabilité d'être obtenus par hasard. Les résultats obtenus permettent de proposer des modèles apparemment crédibles pour prévoir le débit naturel de septembre octobre du fleuve Sénégal à Bakel et du fleuve Niger à Koulikouro, à partir des index pluviométriques calculés début août pour les mois de septembre et octobre sur l'Afrique de l'Ouest par Arpege 4.5 "couplé".

Le caractère non fortuit des liaisons entre index et débit est très probable pour le fleuve Sénégal, avec des coefficients de détermination élevés pour les relations calées sur la période 1979-2000 à partir des index de nombreuses zones différentes. Pour le Niger, le caractère non fortuit est moins net mais quand même assez probable.

L'analyse retient un modèle à 5 paramètres utilisant les index de la zone H5 pour le Sénégal ($R^2 = 0.6072$) et un modèle à 3 paramètres utilisant ceux de la zone H2 pour le Niger. ($R^2 = 0.5055$). Sur la période de calage, les résultats de ces modèles sont meilleurs pour le Sénégal que pour le Niger, avec une erreur type valant respectivement 69.9% et 76.0% de l'écart type des débits naturels observés. C'est l'inverse sur la période de validation (2001-2007), avec une erreur type valant respectivement 85.4 % et 78.6 % de l'erreur type du modèle trivial.

Pour le Sénégal comme pour le Niger, des modèles utilisant les index d'autres zones que H5 et H2 donnent aussi des résultats intéressants et pourront être testés à partir d'août 2008. Parmi ceux-ci, on remarque pour leur bonne validation les modèles utilisant les index de la zone A1, qui regroupe l'ensemble des 98 cellules du maillage d'Arpege sur l'Afrique de l'Ouest.

CONTEXTE ET OBJECTIF

Sur un maillage de 300X300 km couvrant l'Afrique de l'ouest, le modèle Arpege Climat de Météo France produit des prévisions d'index mensuel de précipitation jusqu'à l'échéance de quatre mois. Pour prévoir début août le volume naturel de crue de septembre octobre du fleuve Sénégal à Bakel et du fleuve Niger à Koulikouro, l'IRD a déjà développé des modèles statistiques utilisant les index produits par les deux versions d'Arpege suivantes (fig. 1 à 5):

- **Arpege climat t42I31r version3 forcée**
 - Fleuve Sénégal : modèle à 5 paramètres calé sur la période 1979-2000 et utilisant les index de la zone J2; validé sur 2001-2006 ; utilisation opérationnelle satisfaisante par l'OMVS en 2005 et 2006 pour l'aide à la gestion du barrage de Manantali ; résultats publiés en Juin 2006 dans le Journal des Sciences hydrologiques.
 - Fleuve Niger : modèle à 3 paramètres calé sur 1979-1998 et utilisant les index de la zone G5 ; validé sur 1999-2006.
- **Arpege climat tl63I31r version4.6 forcée**
 - Fleuve Sénégal : modèle à 5 paramètres calé sur la période 1979-2000 et utilisant les index de la zone G5; validé sur 2001-2007 ; utilisation opérationnelle satisfaisante par l'OMVS en 2007

L'objectif de cette étude consiste à établir un nouveau calage des modèles de prévision pour les fleuves Sénégal et Niger, basé sur les index produits par la dernière version du modèle Arpege :

Arpege climat tl63I91r version4.5 couplé à ORCA2 par osaios2.4.

DONNÉES

Index d'anomalie pluviométrique fournis par Météo France

Mode de calcul : prévisions reconstituées obtenues par moyenne de 9 simulations (Arpege climat tl63l91r version4.5 couplé à ORCA2 par osaios2.4) effectuées à partir de conditions initiales légèrement décalées en temps

Index utilisés : valeurs mensuelles de pluviométrie calculées début août pour septembre et octobre, centrées et réduites sur la période de référence 1979-2000

Période : 1979-2007

Maillage : 98 mailles couvrant l'Afrique de l'Ouest entre les latitudes -2.79 à 16.74° et les longitudes -21.09 à 18.28° (fig. 1 et 2)

Débit moyen naturel de septembre-octobre

Fleuve Sénégal à Bakel. Les valeurs identiques à celles des études précédentes sont simplement actualisées avec l'année 2007. De 1979 à 1986, ces débits correspondent aux valeurs observées à la station. A partir de 1987, les valeurs observées sont corrigées (bilan de volume, modèle de propagation) pour tenir compte des modifications induites par le barrage de Manantali.

Fleuve Niger à Koulikouro. Les débits correspondent aux valeurs observées à la station. Aucune correction n'est faite pour tenir compte des modifications assez faibles induites depuis le début des années 80 par le barrage de Sélingué. Outre l'actualisation avec l'année 2007, les valeurs diffèrent très légèrement de celles de l'étude précédente, suite à une révision de l'étalonnage de la station.

MÉTHODE

La méthode suivie est quasiment identique à celle des études précédentes.

Regroupement des index par zones

Avant d'essayer de relier les débits aux nouveaux index, on regroupe ces derniers suivant 50 zones élémentaires correspondant aux six types suivants (fig. 1 et 2):

- 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 calculs de régressions entre composantes principales des index et débit

Sur chacune des 50 zones, une analyse en composantes principales est effectuée sur les index de la période 1979-2000. Tout le reste de l'analyse est ensuite effectué successivement et de façon identique, pour le fleuve Sénégal puis le fleuve Niger.

Le débit naturel Q_0 de septembre-octobre est relié par régression linéaire sur la période de calage (1979-2000) aux 8 premières composantes principales V_1 à V_8 des index de la zone. Les composantes les moins explicatives sont ensuite éliminées une par une par processus de régression descendante. En notant respectivement mV_1 à mV_n les n meilleures composantes principales conservées à chaque étape, les relations finalement examinées pour la zone sont les suivantes :

$$Q_0 = f(V_1..V_8) \quad ; \quad Q_0 = f(mV_1...mV_5) \quad ; \quad Q_0 = f(mV_1...mV_4) \quad ; \dots ; \quad Q_0 = f(mV_1)$$

Evaluation de la part de hasard intervenant dans les résultats

Sur chacune des zones, la corrélation linéaire multiple $Q_0 = f(V_1..V_8)$ établie sur la période 1979-2000 est comparée aux corrélations suivantes, calculées pour 50 séries différentes de débit Q_1 à Q_{50} obtenues par recombinaison aléatoire de la série Q_0 sur la même période :

$$Q_1 = f(V_1..V_8) \quad ; \quad Q_2 = f(V_1..V_8) \quad ; \dots \dots \dots ; \quad Q_{50} = f(V_1..V_8)$$

Cette comparaison permet d'estimer la probabilité pour que le coefficient de détermination R^2 de la relation $Q_0 = f(V_1..V_8)$ puisse être obtenu par pur hasard.

Sélection des meilleurs modèles de prévision de débit

Après exclusion des zones où la relation $Q_0 = f(V_1..V_8)$ a de fortes chances d'être due au hasard, les coefficients de détermination R^2 des relations $Q_0 = f(mV_1...mV_5)$ sont comparés entre les zones conservées. Les plus fortes valeurs désignent les zones les plus prédictives sur la période de calage. Pour chacune d'entre elles, le meilleur modèle est sélectionné parmi les relations $Q_0 = f(mV_1...mV_5)$; $Q_0 = f(mV_1...mV_4)$; $\dots \dots \dots$; $Q_0 = f(mV_1)$ en tenant compte des erreurs type Etc sur la période de calage (1979-2000), Etv sur la période de validation (2001-2007) et Ett sur la période totale. Ces erreurs types sont calculées ainsi :

$$Etc = (\sum_{Nc} ((Q-Q_0)^2/(Nc-n-1)))^{0.5}$$

$$Etv = (\sum_{Nv} ((Q-Q_0)^2/Nv))^{0.5}$$

$$Ett = (\sum_{Nt} ((Q-Q_0)^2/Nt))^{0.5}$$

Avec :

- n : nombre de composantes principales d'index utilisées dans la régression établie avec le débit naturel réel Q_0
- Q : débit calculé à partir des n composantes principales, par la régression établie entre celles-ci et le débit Q_0

- N_c : taille de l'échantillon de calage, égale à 22 pour la période 1979-2000
- N_v : taille de l'échantillon de validation, égale à 7 pour la période 2001-2006
- N_t : taille de l'échantillon total, égale à 29 pour la période 1979-2007

RÉSULTATS OBTENUS : FLEUVE SÉNÉGAL À BAKEL

Caractère non fortuit des relations calées entre index et débit

Le tableau 1 donne les coefficients de détermination obtenus. Sur une majorité de zones, celui de la relation $Q_0=f(V_1,\dots,V_8)$ établie sur la période 1979-2000 dépasse la médiane des valeurs obtenues avec les séries aléatoires de débit Q_1 à Q_{50} (fig. 6). Ainsi, il y a 39 (resp. 29 et 18) zones sur 50 où ce coefficient a plus d'une chance sur deux (resp. 2 sur 3 et 4 sur 5) de ne pas être dépassé avec une série aléatoire (fig. 7 et 8). D'après la loi binômiale, de telles proportions de résultats moyens, bons et excellents ont des probabilités très faibles d'être atteintes par hasard (respectivement 0.000045, 0.00030 et 0.0063). Globalement, les index présentent donc un caractère explicatif qui semble non fortuit pour les débits naturels réels de la période 1979-2000.

Ceci apparaît également sur la figure 9 qui compare la fonction de répartition du R^2 obtenu pour les débits réels Q_0 sur les 50 zones (50 valeurs ; moyenne = 0.456 ; médiane = 0.469), avec celle du R^2 obtenu pour les 50 débits aléatoires sur les 50 zones (2500 valeurs, moyenne = 0.379 ; médiane = 0.367). Enfin, 41 des 50 séries aléatoires donnent pour la médiane de R^2 calculée sur les différentes zones, des valeurs inférieures à celle qui est obtenue avec la série de débit réel. Cette dernière a donc une probabilité d'environ 0.82 de ne pas être fortuite.

Les débits réels apparaissent donc reliés aux index d'une majorité de zones sur la période de calage et cette liaison massive a très peu de chance d'être obtenue par hasard.

Critères de sélection des relations calées entre index et débit

Pour être jugée recevable, chaque relation établie entre les index d'une zone et les débits doit vérifier les trois conditions suivantes :

- Son erreur type de calage Etc doit être inférieure à l'écart type des débits sur la période 1979-2000, qui s'élève à 496 m³/s.
- Son erreur type de validation doit être inférieure à 568 m³/s, valeur correspondant à l'erreur type sur la période 2001-2007 du modèle trivial prévoyant un débit égal à la moyenne observée sur la période de calage.
- La relation $Q_0 = f(V_1, \dots, V_8)$ de la zone concernée doit être jugée non fortuite en présentant un coefficient de détermination R^2 ayant une probabilité faible (inférieure à 0.35, seuil fixé arbitrairement) d'être atteint ou dépassé par hasard. Le nombre de zones vérifiant cette condition s'élève à 32 (fig. 8).

Selon ces critères, seuls 53 modèles concernant 17 zones sur 50 peuvent être jugés recevables parmi les 250 modèles considérés (50 zones fois 5 modèles utilisant entre 5 et 1 des meilleures composantes principales d'index), Des résultats médiocres en validation conduisent donc à écarter presque la moitié des 32 zones où la relation $Q_0 = f(V_1, \dots, V_8)$ semble pourtant calée de façon non fortuite.

Modèles sélectionnés

Parmi les 17 zones présentant des modèles recevables, les zones C3, H5, B6, A1, A6, C6, D2, D6, G4 et A3 donnent les meilleurs résultats. Les modèles finalement sélectionnés sur ces zones sont listés ci-dessous et leurs résultats sont résumés dans les tableaux 1 et 2 et les figures 10-A et 10-B.

Zone C3

Pour l'ensemble des modèles, cette zone se classe au premier rang sur 50 sur la période de calage ($Q_0=f(mV_1,\dots,mV_5)$; Etc= 311 m³/s) et au sixième sur la période totale ($Q_0=f(mV_1,\dots,mV_5)$; Ett = 365 m³/s). Avec des résultats un peu moins bons en calage mais nettement meilleurs en validation, c'est le modèle à trois paramètres plutôt que celui à 5 paramètres qui est retenu pour cette zone. Pour les modèles recevables, ce modèle classe la zone C3 au 1^{er} rang sur 17 en calage et au sixième sur la période totale. Il s'exprime ainsi :

$$Q_0 = 1327 - 206 V_8 - 175 V_7 + 111 V_6 \quad (R^2 = 0.6071)$$

Zone H5

Son modèle à 5 paramètres classe cette zone au deuxième rang sur 50 sur la période de calage (Etc = 347 m³/s) et au troisième sur la période totale (Ett = 351 m³/s), pour l'ensemble des modèles. Avec une meilleure erreur type de validation (485 au lieu de 513 m³/s), ce modèle semble plus fiable que celui de la zone C3 et sera donc retenu en priorité. Pour les modèles recevables, il classe la zone H5 au deuxième rang sur 17 sur la période de calage et au troisième sur la période totale. Ses erreurs types Etc et Etv représentent respectivement 69.9 % et 85.4% de l'écart type des débits réels sur la période de calage et de l'erreur type du modèle trivial sur la période de validation. Il s'exprime ainsi :

$$Q_0 = 1327 + 197 V_5 + 229 V_6 + 42.8 V_1 + 104 V_7 - 45.3 V_3 \quad (R^2 = 0.6272)$$

Les coefficients d'index de ce modèle sont donnés dans le tableau 3. Leurs valeurs ne semblent pas organisées de façon nette en fonction de la position géographique des mailles (fig. 11-A et 11-B). Le tableau 4 permet de comparer les valeurs de débit prévu par le modèle avec les valeurs observées.

Zones B6 et A1

Parmi l'ensemble des modèles, ceux des zones A1 (englobant les 98 cellules du cadre) et B6 ne donnent à celles-ci qu'un classement médiocre pour l'erreur type de calage (resp. 23^{eme} et 25^{eme} rang sur 50, avec leurs modèles à 3 paramètres). Leurs modèles à 5 paramètres classent cependant les zones B6 et A1 aux deux premiers rangs sur 50 à la fois pour l'erreur type de validation et l'erreur type sur la période totale. Malgré des coefficients de détermination modestes en calage, ces modèles peuvent être considérés comme faisant partie des meilleurs, du fait de leur apparente robustesse. Ils s'expriment ainsi :

$$Q_0 = 1327 - 116 V_5 + 108 V_8 + 49.0 V_7 - 15.7 V_2 - 32 V_6 \quad (R^2 = 0.4617 ; \text{zone B6})$$

$$Q_0 = 1327 - 81.1 V_6 - 68.5 V_8 + 36.5 V_5 - 12.0 V_2 - 17.3 V_7 \quad (R^2 = 0.4647 ; \text{zone A1})$$

Pour le modèle de la zone A1, les coefficients d'index de septembre présentent une dorsale de valeurs maximales orientée sud-est nord-ouest qui traverse l'ensemble du cadre (fig. 12-A.) Ceux d'octobre sont globalement plus élevés à l'est qu'à l'ouest du cadre. (fig. 12-B)

Zones A6, C6, D2, D6 G4 et A3

Ces zones sont, avec B6, A1, H5 et C3, les mieux classées du point de vue de l'erreur type E_{tt} sur la période totale pour les modèles recevables. Pour chacune d'entre elles, les figures 10-A et 10-B présentent les résultats obtenus avec le modèle associé donnant la plus faible valeur de E_{tt}, toujours inférieure à 415 m³/s.

RÉSULTATS OBTENUS : FLEUVE NIGER À KOULIKOURO

Caractère non fortuit des relations calées entre index et débit

Globalement, les coefficients de détermination R² (tableau 5) obtenus en calage avec les 8 premières composantes principales sont plus faibles que pour le Sénégal. Leurs valeurs

(moyenne = 0.399 ; médiane = 0.428) dépassent de façon moins généralisée celles qui sont obtenues (moyenne = 0.376 ; médiane = 0.371) avec les 50 séries de débit aléatoires (fig. 13). Ainsi, il n'y a que 31 (resp. 23 et 6) zones sur 50 où ce coefficient a plus d'une chance sur deux (resp. 2 sur 3 et 4 sur 5) de ne pas être dépassé avec une série aléatoire (fig. 14 et 15). D'après la loi binômiale, ces proportions de résultats moyens, bons et très bons ont des probabilités respectives de 0.059, 0.042 et 0.95 d'être atteintes ou dépassées par hasard. Comparée à la figure 9, la figure 16 confirme que les résultats obtenus en calage sont moins bons pour le Niger que pour le Sénégal, avec certes encore beaucoup de moyennes et bonnes relations mais très peu d'excellentes. Enfin, la médiane de R^2 de la relation $Q_0 = f(V_1..V_8)$ calculée sur les différentes zones avec le débit réel du Niger (0.428) a une probabilité d'environ 0.7 de ne pas être fortuite, car elle n'est dépassée que par 15 séries aléatoires sur 50.

Même si c'est moins net que pour le Sénégal, les débits réels du Niger semblent quand même reliés de façon non fortuite aux index d'une majorité de zones sur la période de calage.

Critères de sélection des relations calées entre index et débit

Comme pour le Sénégal, les modèles de prévision du débit du Niger à partir des index sont jugés recevables s'ils vérifient les trois conditions suivantes :

- Erreur type de calage Etc inférieure à 859 m³/s (valeur de l'écart type des débits réels sur la période 1979-2000)
- Erreur type de validation inférieure à 676 m³/s (valeur de l'erreur type du modèle trivial sur la période 2001-2007)
- Le modèle doit concerner une des 23 zones où la relation $Q_0 = f(V_1, \dots, V_8)$ semble non fortuite (R^2 ayant une probabilité inférieure à 0.35 d'être atteint par hasard).

Selon ces critères, seuls 56 modèles concernant 19 zones sur 50 peuvent être jugés recevables parmi les 250 modèles considérés. Pour la grande majorité (19 sur 23) des zones présentant une

relation $Q_0 = f(V_1, \dots, V_8)$ probablement non fortuite, il existe donc au moins un modèle sur 5 (et en moyenne 3 sur 5) qui donne de meilleurs résultats que le modèle trivial en validation.

Modèles sélectionnés

Parmi les zones présentant des modèles recevables, les zones H2, I2, I3, H6, F6, A1, G6, I4, K2 et G3 donnent les meilleurs résultats. Les modèles finalement sélectionnés sur ces zones sont listés ci-dessous et leurs résultats sont résumés dans les tableaux 5 et 6 et les figures 17-A et 17-B.

Zone H2

Pour l'ensemble des modèles, cette zone se classe au premier rang sur 50 à la fois sur la période de calage ($Q_0 = f(mV_1, \dots, mV_5)$; $E_{tc} = 616 \text{ m}^3/\text{s}$) et sur la période totale ($Q_0 = f(mV_1, \dots, mV_3)$; $E_{tt} = 576 \text{ m}^3/\text{s}$). Avec des résultats un peu moins bons en calage mais nettement meilleurs en validation, c'est la relation à 3 paramètres plutôt que celle à 5 paramètres qui est finalement retenue. Ce modèle classe la zone H2 au 1^{er} rang sur 19 (période de calage et période totale) pour les modèles recevables et peut être considéré comme le meilleur des 250 modèles établis. Ses erreurs types E_{tc} et E_{tv} représentent respectivement 76.0 % et 78.6% de l'écart type des débits réels sur la période de calage et de l'erreur type du modèle trivial sur la période de validation Il s'exprime ainsi :

$$Q_0 = 3007 + 286 V_3 - 355 V_7 + 201 V_5 \quad (R^2 = 0.5055)$$

Les coefficients d'index de ce modèle sont donnés dans le tableau 7. Leurs valeurs s'organisent de façon assez nette en fonction des coordonnées géographiques des mailles (fig. 18-A et 18-B). Le tableau 8 permet de comparer les valeurs de débit prévu par le modèle avec les valeurs observées.

Zone I2

Cette zone se classe au deuxième rang sur 50 à la fois sur la période de calage (modèle à 4 paramètres ; Etc = 617 m³/s) et sur la période totale (modèle à 2 paramètres ; Ett = 593 m³/s).

Le modèle à deux paramètres, correctement validé contrairement aux modèles plus paramétrés, est finalement retenu pour cette zone. Il classe la zone I2 au 2eme rang sur 19 (période de calage et période totale) pour les modèles recevables. Il s'exprime ainsi :

$$Q_0 = 3007 + 322 V_3 + 220 V_5 \quad (R^2 = 0.4704)$$

Zone I3

Cette zone se classe 5eme sur 50 en calage (modèle à 4 paramètres) et 3eme sur la période totale (modèle à 5 paramètres). Mal validés, les modèles à 5 et 4 paramètres sont non recevables et on conserve finalement le modèle à 3 paramètres qui classe cette zone au 3eme rang sur 19 tant sur la période de calage que sur la période totale pour les modèles recevables. Ce modèle s'exprime ainsi :

$$Q_0 = 3007 - 209 V_4 + 140 V_3 - 157 V_8 \quad (R^2 = 0.4738)$$

Zones H6, F6, A1, G6, I4, K2 et G3

Après H2, I2 et I3, ces zones sont les mieux classées du point de vue de l'erreur type Ett sur la période totale pour les modèles recevables. Pour chacune d'entre elles, les figures 17-A et 17-B présentent les résultats obtenus avec le modèle associé donnant la plus faible valeur de Ett, toujours inférieure à 640 m³/s.

Comme pour le Sénégal, de très bons résultats sont obtenus avec la zone A1 sur la période de validation : comparé à l'ensemble des modèles, son modèle à 3 paramètres la classe au 4eme rang sur 50 pour l'erreur type Etv.

TABLEAUX

zones	Composantes principales utilisées						
	V _{1...V₈}	V _{1...V₅}	mV _{1...mV₅}	mV _{1...mV₄}	mV _{1...mV₃}	mV _{1...mV₂}	mV ₁
A2	0.309	0.176	0.301	0.269	0.212	0.151	0.078
B2	0.387	0.140	0.379	0.340	0.280	0.217	0.149
C2	0.397	0.051	0.388	0.375	0.347	0.310	0.255
D2	0.574	0.213	0.561	0.554	0.535	0.510	0.352
E2	0.472	0.241	0.470	0.460	0.450	0.401	0.229
F2	0.434	0.309	0.424	0.418	0.402	0.286	0.157
G2	0.419	0.228	0.413	0.380	0.308	0.224	0.117
H2	0.246	0.216	0.243	0.241	0.239	0.227	0.200
I2	0.229	0.149	0.228	0.228	0.213	0.180	0.134
J2	0.281	0.062	0.280	0.276	0.256	0.214	0.109
K2	0.165	0.069	0.159	0.146	0.128	0.096	0.049
A3	0.425	0.248	0.396	0.375	0.312	0.248	0.146
B3	0.576	0.175	0.545	0.516	0.426	0.326	0.211
C3	0.718	0.111	0.701	0.678	0.607	0.492	0.268
D3	0.574	0.104	0.569	0.555	0.512	0.456	0.301
E3	0.559	0.079	0.550	0.542	0.533	0.472	0.306
F3	0.562	0.266	0.546	0.518	0.458	0.349	0.208
G3	0.583	0.235	0.541	0.489	0.425	0.297	0.162
H3	0.433	0.185	0.430	0.410	0.391	0.314	0.170
I3	0.235	0.195	0.230	0.228	0.222	0.189	0.153
A4	0.283	0.121	0.266	0.242	0.211	0.175	0.094
B4	0.470	0.103	0.461	0.458	0.432	0.363	0.234
C4	0.469	0.057	0.458	0.438	0.412	0.327	0.213
D4	0.408	0.098	0.397	0.386	0.366	0.299	0.204
E4	0.571	0.066	0.561	0.544	0.505	0.427	0.243
F4	0.523	0.102	0.505	0.490	0.420	0.337	0.241
G4	0.566	0.133	0.562	0.500	0.433	0.316	0.173
H4	0.411	0.197	0.399	0.367	0.330	0.226	0.116
I4	0.261	0.224	0.257	0.241	0.221	0.187	0.143
J4	0.359	0.218	0.336	0.299	0.255	0.206	0.146
A5	0.358	0.157	0.355	0.351	0.345	0.299	0.154
B5	0.529	0.357	0.519	0.501	0.479	0.392	0.262
C5	0.464	0.329	0.459	0.452	0.440	0.382	0.309
D5	0.487	0.411	0.480	0.474	0.456	0.404	0.250
E5	0.433	0.376	0.412	0.386	0.356	0.304	0.195
F5	0.371	0.355	0.360	0.352	0.318	0.232	0.126
G5	0.500	0.274	0.389	0.325	0.254	0.180	0.099
H5	0.662	0.403	0.627	0.592	0.552	0.448	0.228
I5	0.571	0.254	0.559	0.526	0.433	0.317	0.198
J5	0.541	0.190	0.517	0.487	0.435	0.374	0.269
K5	0.575	0.183	0.535	0.499	0.453	0.389	0.283
A6	0.559	0.254	0.546	0.527	0.488	0.441	0.257
B6	0.480	0.316	0.462	0.446	0.426	0.389	0.278
C6	0.466	0.213	0.461	0.446	0.424	0.332	0.187
D6	0.542	0.070	0.532	0.514	0.488	0.454	0.364
E6	0.609	0.073	0.601	0.579	0.556	0.514	0.318
F6	0.638	0.100	0.624	0.600	0.575	0.524	0.319
G6	0.330	0.210	0.291	0.255	0.218	0.159	0.098
H6	0.310	0.199	0.299	0.235	0.160	0.064	0.032
A1	0.472	0.087	0.465	0.455	0.436	0.376	0.246

Tableau 1 : coefficient de détermination R² obtenu pour les 50 zones sur la période 1979-2000, entre les composantes principales des index pluviométriques de septembre et d'octobre prévus début août et le débit naturel réel Q_o de septembre octobre du **SENEGAL** à Bakel

	Etc : erreur type calage					Etv : erreur type validation					Ett : erreur type globale				
A2	475	471	476	480	488	408	571	436	445	560	406	457	432	446	490
B2	448	448	454	461	469	637	675	528	488	600	457	477	442	444	488
C2	444	436	433	433	439	726	796	763	626	564	486	514	507	467	458
D2	376	368	365	365	409	554	559	538	504	472	390	393	391	385	411
E2	413	405	397	404	446	881	824	804	849	566	531	510	504	530	463
F2	431	420	414	441	467	684	682	736	596	530	464	465	487	462	467
G2	435	434	446	459	477	808	873	670	802	777	512	542	481	542	550
H2	494	480	467	459	454	468	462	459	497	458	433	432	432	444	439
I2	499	484	475	472	473	471	469	499	437	508	437	437	448	438	465
J2	482	469	462	462	480	554	569	555	597	563	450	455	455	475	485
K2	521	509	500	496	496	651	679	699	662	580	502	513	523	517	501
A3	441	436	444	452	470	510	502	731	645	576	413	415	502	484	482
B3	383	383	406	428	451	679	663	926	985	891	439	438	556	595	576
C3	311	313	336	372	435	641	600	513	488	551	390	380	365	385	451
D3	373	368	374	384	425	738	736	715	671	712	456	458	458	453	497
E3	381	373	366	379	423	860	883	899	872	971	509	520	528	527	592
F3	383	383	394	421	452	801	827	826	815	884	485	501	511	526	574
G3	385	394	406	437	465	811	695	751	743	621	490	456	489	508	492
H3	429	423	418	432	463	600	602	543	593	618	434	439	424	455	490
I3	498	484	473	469	468	630	641	666	604	544	482	487	496	482	472
A4	487	480	476	474	484	468	455	402	452	508	429	430	424	443	473
B4	417	406	404	416	445	884	880	842	904	695	534	533	522	557	503
C4	418	413	411	428	451	842	834	837	638	499	517	518	523	467	448
D4	441	432	427	437	453	834	743	733	741	580	525	492	493	507	472
E4	376	372	377	395	442	977	1027	932	777	873	556	580	546	498	565
F4	400	394	408	424	443	793	771	696	671	805	490	484	469	476	540
G4	376	390	403	431	462	599	536	539	497	452	406	398	414	426	444
H4	440	438	438	459	478	530	594	655	652	759	418	445	472	491	545
I4	490	480	473	470	470	693	654	691	659	712	498	488	504	500	524
J4	463	462	462	465	470	812	832	798	831	688	527	540	535	555	516
A5	456	444	433	436	467	455	451	415	364	704	406	406	398	396	520
B5	394	390	387	406	437	606	630	642	748	642	417	430	438	493	481
C5	418	408	401	410	422	580	599	629	661	601	421	429	442	464	458
D5	410	400	395	402	440	601	606	561	556	673	424	427	416	425	493
E5	436	432	430	435	456	705	633	586	607	720	474	454	445	461	518
F5	454	444	442	457	475	487	502	482	507	602	414	420	421	446	493
G5	444	453	463	472	482	570	555	581	565	546	433	441	463	472	482
H5	347	352	358	387	446	485	481	481	478	460	351	359	368	392	434
I5	377	379	403	431	455	787	814	757	655	622	478	494	489	475	486
J5	395	395	403	413	434	760	779	785	760	720	475	488	499	501	505
K5	387	390	396	407	430	601	570	552	565	670	412	410	413	431	486
A6	383	379	383	390	438	420	427	372	405	672	351	358	353	373	491
B6	417	410	406	407	432	282	288	373	321	335	339	344	368	366	395
C6	417	410	406	426	458	486	378	367	363	433	391	365	368	388	436
D6	389	384	383	385	405	535	539	509	542	662	390	396	392	410	468
E6	359	358	357	363	420	697	719	681	653	811	434	447	437	435	529
F6	348	348	349	360	419	818	783	836	771	895	478	468	495	478	561
G6	478	476	474	478	483	449	511	518	627	567	418	442	452	495	488
H6	476	482	491	504	500	550	506	599	615	561	445	445	486	508	498
A1	416	407	402	412	441	305	315	349	387	462	343	348	360	384	431
zone	$mV_1 \dots mV_5$	$mV_1 \dots mV_4$	$mV_1 \dots mV_3$	$mV_1 \dots mV_2$	mV_1	$mV_1 \dots mV_5$	$mV_1 \dots mV_4$	$mV_1 \dots mV_3$	$mV_1 \dots mV_2$	mV_1	$mV_1 \dots mV_5$	$mV_1 \dots mV_4$	$mV_1 \dots mV_3$	$mV_1 \dots mV_2$	mV_1
composantes principales utilisées															

Tableau 2 : erreurs types des régressions entre les C.P. d'index pluviométriques de septembre et d'octobre prévus début août et le débit naturel réel Qo de septembre octobre du **SENEGAL** à Bakel. (surlignage = modèle recevable ; rouge : sélectionné ; bleu : meilleur)

longitude	0.00	2.81	5.63	8.44	0.00	2.81	5.63	8.44
-1.40	27.3	23.5	23.0	29.2	-77.3	-63.9	-32.7	15.2
1.40	16.4	42.5	13.7	48.2	-101.0	-22.4	18.9	100.5
4.19	12.8	-26.9	-14.7	35.8	-101.1	35.2	88.1	186.2
6.98	28.5	29.2	-8.9	6.3	53.3	7.2	-39.3	-59.0
latitude	septembre				octobre			

Tableau 3 : coefficients du modèle à 5 paramètres des index de la zone H5 (fl. **SENEGAL**)

année	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
débit observé : Q_o ($m^3 s^{-1}$)	929	1214	1179	962	641	576	1100	1363	1070	1612
débit prévu ($m^3 s^{-1}$)	1046	1363	1356	875	511	724	952	916	1168	1457
année	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
débit observé : Q_o ($m^3 s^{-1}$)	1347	811	1383	1048	1029	2034	1869	1457	1499	2027
débit prévu ($m^3 s^{-1}$)	1780	1412	1628	1150	1367	1651	1862	1427	1233	1520
année	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	
débit observé : Q_o ($m^3 s^{-1}$)	2682	1367	1545	1191	2468	1228	1708	1239	2181	
débit prévu ($m^3 s^{-1}$)	2159	1642	1522	1157	1518	1167	1076	1760	2443	

Tableau 4 : débit naturel de septembre octobre du **SENEGAL** à Bakel. Valeurs observées et valeurs prévues début août à partir des index de la zone H5 (modèle à 5 paramètres)

zones	Composantes principales utilisées						
	V _{1...V₈}	V _{1...V₅}	mV _{1...mV₅}	mV _{1...mV₄}	mV _{1...mV₃}	mV _{1...mV₂}	mV ₁
A2	0.210	0.161	0.182	0.169	0.155	0.130	0.094
B2	0.205	0.143	0.184	0.174	0.161	0.145	0.108
C2	0.192	0.127	0.185	0.171	0.154	0.110	0.066
D2	0.476	0.119	0.471	0.466	0.460	0.406	0.350
E2	0.364	0.203	0.316	0.281	0.245	0.195	0.121
F2	0.391	0.334	0.378	0.357	0.330	0.299	0.267
G2	0.522	0.379	0.477	0.441	0.398	0.353	0.256
H2	0.627	0.423	0.608	0.577	0.505	0.426	0.309
I2	0.620	0.496	0.597	0.583	0.528	0.470	0.378
J2	0.599	0.505	0.595	0.576	0.552	0.480	0.324
K2	0.467	0.311	0.452	0.438	0.393	0.308	0.176
A3	0.335	0.278	0.316	0.294	0.266	0.217	0.153
B3	0.393	0.207	0.384	0.350	0.292	0.228	0.147
C3	0.450	0.192	0.444	0.434	0.410	0.346	0.248
D3	0.380	0.217	0.356	0.313	0.253	0.194	0.100
E3	0.409	0.265	0.379	0.349	0.313	0.243	0.136
F3	0.461	0.416	0.453	0.438	0.405	0.361	0.274
G3	0.447	0.409	0.434	0.426	0.401	0.374	0.343
H3	0.459	0.431	0.447	0.435	0.424	0.407	0.329
I3	0.560	0.449	0.553	0.527	0.474	0.420	0.254
A4	0.376	0.161	0.357	0.309	0.252	0.177	0.094
B4	0.353	0.134	0.343	0.319	0.286	0.219	0.122
C4	0.197	0.128	0.152	0.131	0.109	0.079	0.040
D4	0.205	0.138	0.184	0.159	0.129	0.089	0.049
E4	0.346	0.149	0.304	0.270	0.234	0.193	0.137
F4	0.437	0.153	0.409	0.378	0.347	0.314	0.256
G4	0.448	0.291	0.435	0.422	0.394	0.359	0.215
H4	0.436	0.385	0.414	0.399	0.376	0.339	0.257
I4	0.436	0.408	0.431	0.421	0.404	0.377	0.275
J4	0.436	0.382	0.431	0.422	0.410	0.361	0.289
A5	0.535	0.078	0.530	0.526	0.512	0.479	0.423
B5	0.420	0.119	0.391	0.375	0.355	0.328	0.270
C5	0.371	0.093	0.354	0.340	0.317	0.289	0.253
D5	0.301	0.074	0.298	0.293	0.266	0.227	0.172
E5	0.157	0.113	0.154	0.146	0.119	0.087	0.051
F5	0.267	0.147	0.245	0.219	0.178	0.126	0.068
G5	0.436	0.134	0.429	0.412	0.386	0.316	0.229
H5	0.450	0.154	0.445	0.435	0.404	0.366	0.258
I5	0.386	0.168	0.381	0.373	0.351	0.316	0.175
J5	0.311	0.222	0.308	0.272	0.233	0.184	0.102
K5	0.270	0.244	0.263	0.256	0.243	0.211	0.160
A6	0.418	0.189	0.373	0.330	0.272	0.204	0.122
B6	0.403	0.214	0.369	0.324	0.275	0.190	0.098
C6	0.277	0.241	0.261	0.243	0.223	0.196	0.145
D6	0.444	0.255	0.400	0.377	0.344	0.306	0.155
E6	0.451	0.145	0.414	0.394	0.368	0.338	0.279
F6	0.465	0.144	0.448	0.437	0.421	0.403	0.304
G6	0.451	0.412	0.444	0.433	0.420	0.386	0.262
H6	0.465	0.405	0.456	0.442	0.397	0.054	0.002
A1	0.450	0.363	0.431	0.417	0.400	0.381	0.316

Tableau 5 : coefficient de détermination R² obtenu pour les 50 zones sur la période 1979-2000, entre les composantes principales des index pluviométriques de septembre et d'octobre prévus début août et le débit naturel réel Q_o de septembre octobre du **NIGER** à Koulikouro

	Etc : erreur type calage					Etv : erreur type validation					Ett : erreur type globale				
A2	889	870	853	842	837	643	674	625	676	664	732	744	739	758	768
B2	888	867	850	834	831	780	796	788	801	690	763	771	773	782	769
C2	888	869	853	852	850	706	734	705	613	676	746	757	756	752	780
D2	716	698	681	696	709	891	872	881	895	801	689	685	689	714	708
E2	813	809	806	810	825	756	787	754	676	736	709	730	735	735	774
F2	776	765	759	756	753	759	793	863	845	723	687	704	733	739	719
G2	712	714	720	726	759	735	750	752	682	776	640	659	677	677	737
H2	616	620	652	684	732	778	812	531	448	543	596	620	576	596	664
I2	624	617	637	657	694	803	831	715	536	563	609	624	613	593	639
J2	626	622	621	651	723	881	814	885	677	653	635	622	655	623	681
K2	728	716	723	751	799	677	654	734	896	523	635	635	674	751	711
A3	814	802	795	799	810	700	742	774	797	884	695	714	733	756	800
B3	772	769	780	793	812	768	746	814	842	769	686	694	734	764	773
C3	734	718	713	730	763	922	907	801	856	844	709	708	685	725	757
D3	789	791	801	810	835	919	958	764	641	699	740	767	734	728	774
E3	775	770	768	785	818	840	745	737	854	838	708	694	705	762	794
F3	727	716	716	722	750	805	694	727	641	755	669	645	667	664	725
G3	740	723	718	714	713	720	640	655	650	699	654	637	651	661	684
H3	732	717	704	695	721	692	713	711	656	725	641	651	655	648	696
I3	658	657	673	687	760	704	678	605	561	622	599	603	608	621	701
A4	789	793	802	819	838	617	666	665	712	768	660	690	711	750	791
B4	798	788	784	798	824	922	859	911	901	648	746	736	762	783	755
C4	906	890	875	866	862	689	689	635	726	777	753	761	757	787	811
D4	888	875	865	862	858	639	648	580	626	678	731	742	739	762	787
E4	821	815	812	811	818	966	945	842	870	701	772	778	762	783	761
F4	756	752	749	748	759	711	748	775	625	620	662	683	703	679	700
G4	739	725	722	723	779	691	690	637	643	799	646	651	649	665	757
H4	753	740	732	734	758	752	653	661	730	685	670	651	662	694	714
I4	742	726	716	712	749	590	551	547	668	618	623	618	625	663	692
J4	742	726	712	722	742	672	701	635	650	524	643	654	642	666	668
A5	675	657	648	652	669	1121	1072	1119	894	1269	744	729	750	686	835
B5	768	754	745	740	751	775	707	703	730	955	686	674	681	698	781
C5	791	776	767	761	760	796	925	820	762	814	706	748	726	721	747
D5	824	803	795	794	801	1078	1106	1023	859	713	810	820	803	769	752
E5	905	882	870	863	857	856	944	884	745	737	793	819	812	788	799
F5	855	844	841	844	849	950	879	853	876	764	788	777	784	807	799
G5	743	732	727	747	772	1229	1178	1106	964	627	818	806	790	768	712
H5	733	717	716	719	758	1025	994	815	823	649	742	735	692	708	706
I5	774	756	747	746	799	901	855	935	951	867	726	715	747	764	788
J5	819	814	812	816	834	721	610	593	645	735	704	692	703	732	781
K5	844	823	807	802	807	652	708	680	755	693	704	720	718	747	751
A6	779	781	791	805	825	631	668	739	641	563	656	682	721	724	739
B6	781	785	789	812	836	608	515	541	538	730	653	652	676	709	781
C6	846	830	818	809	813	565	519	541	555	576	687	685	697	710	732
D6	762	753	751	752	809	656	665	618	581	594	651	663	665	672	732
E6	753	743	737	734	747	712	643	687	527	531	660	651	672	648	673
F6	731	716	706	698	734	620	645	513	513	520	623	633	610	619	661
G6	733	719	706	707	756	637	554	563	600	647	628	614	621	644	703
H6	726	713	720	878	879	577	591	542	653	654	609	618	627	780	798
A1	742	728	719	710	727	569	528	482	561	518	618	615	614	637	656
zone	$mV_1 \dots mV_5$	$mV_1 \dots mV_4$	$mV_1 \dots mV_3$	$mV_1 \dots mV_2$	mV_1	$mV_1 \dots mV_5$	$mV_1 \dots mV_4$	$mV_1 \dots mV_3$	$mV_1 \dots mV_2$	mV_1	$mV_1 \dots mV_5$	$mV_1 \dots mV_4$	$mV_1 \dots mV_3$	$mV_1 \dots mV_2$	mV_1
composantes principales utilisées															

Tableau 6 : erreurs types des régressions entre les C.P. d'index pluviométriques de septembre et d'octobre prévus début août et le débit naturel réel Q_o de septembre octobre du NIGER à Koulikouro. (surlignage = modèle recevable ; rouge : sélectionné ; bleu : meilleur)

longitude	0.00	2.81	5.63	8.44	0.00	2.81	5.63	8.44
6.98	36.4	25.8	25.7	62.8	43.1	105.7	145.8	167.0
9.77	-29.6	114.5	182.9	109.2	23.6	59.3	115.2	127.9
12.56	-82.2	-46.8	-48.6	-28.9	-65.1	-46.8	-37.4	-99.6
15.35	12.0	-5.7	-5.9	-11.0	-101.8	-93.4	-110.4	-157.6
latitude	septembre				octobre			

Tableau 7 : coefficients du modèle à 3 paramètres des index de la zone H2 (fl. **NIGER**)

année	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
débit observé : Q_0 (m^3s^{-1})	4286	2862	3524	2663	2530	1701	3239	2615	2211	2320
débit prévu (m^3s^{-1})	3956	2363	3150	3373	2416	2804	3205	2296	2199	2630
année	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
débit observé : Q_0 (m^3s^{-1})	2054	2182	2338	2385	2057	4567	4531	3593	3268	3913
débit prévu (m^3s^{-1})	3022	2728	3161	2048	2597	4559	3364	3230	3021	2774
année	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	
débit observé : Q_0 (m^3s^{-1})	3770	3554	4342	2740	4061	2867	3142	3241	3387	
débit prévu (m^3s^{-1})	3570	3697	3644	3108	3974	2270	3621	4089	3185	

Tableau 8 : débit naturel de septembre octobre du **NIGER** à Koulikouro. Valeurs observées et valeurs prévues début août à partir des index de la zone H2 (modèle à 3 paramètres)

FIGURES

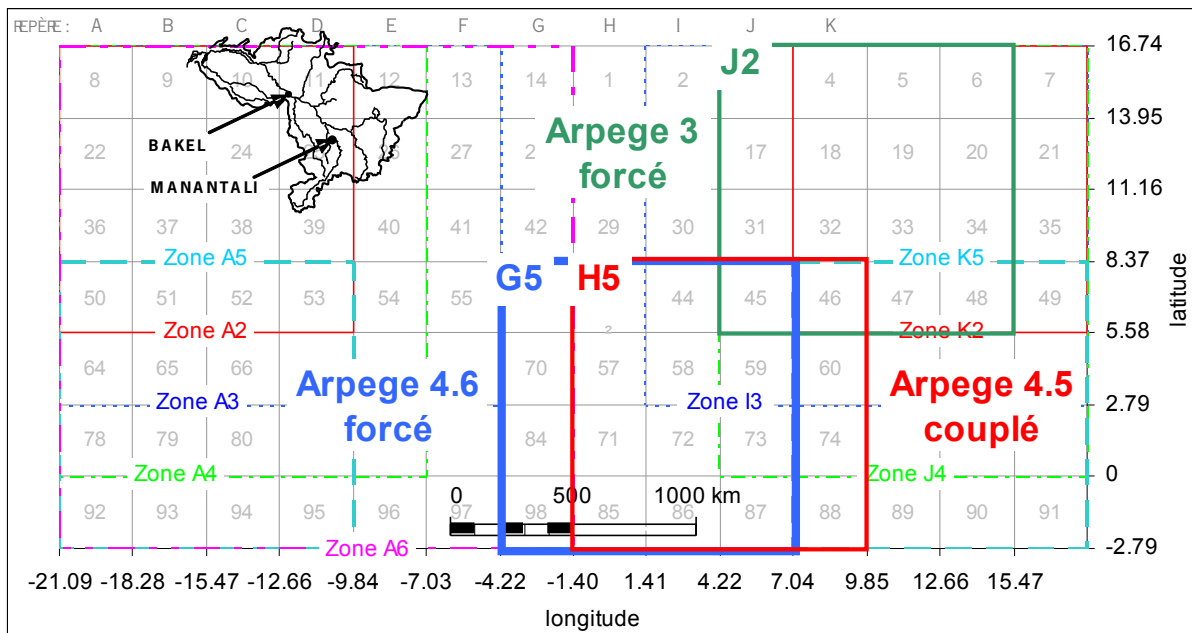


Figure 1 : bassin du fleuve SENEGAL et maillage des résultats d'ARPEGE Climat

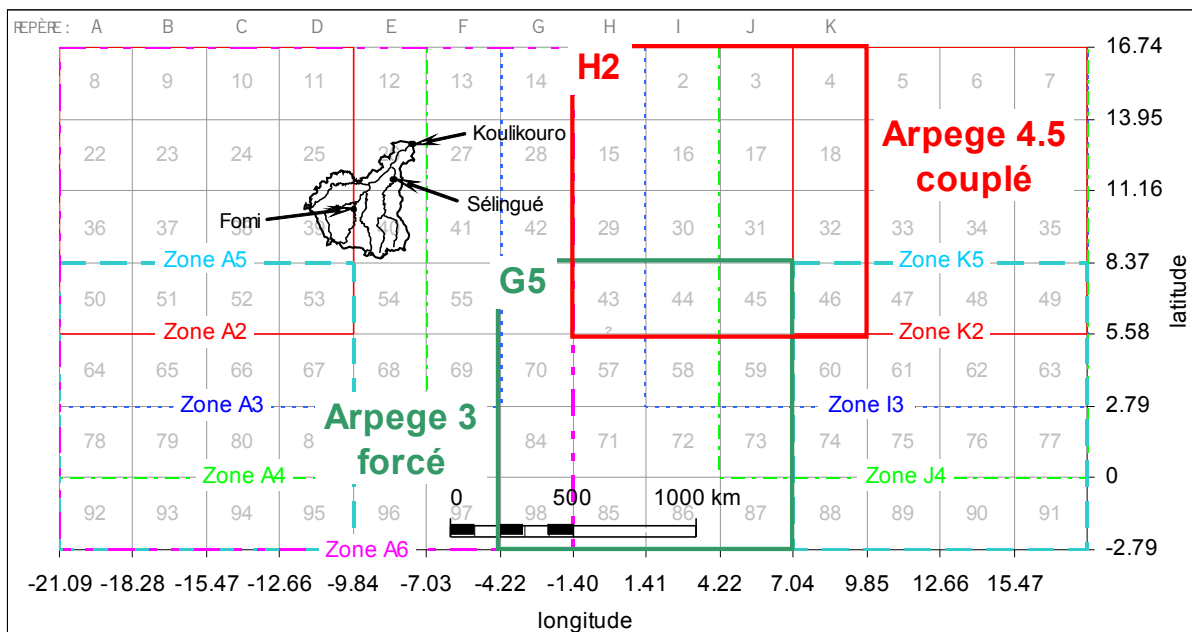


Figure 2 : bassin du fleuve NIGER à Koulikouro et maillage des résultats d'ARPEGE Climat.

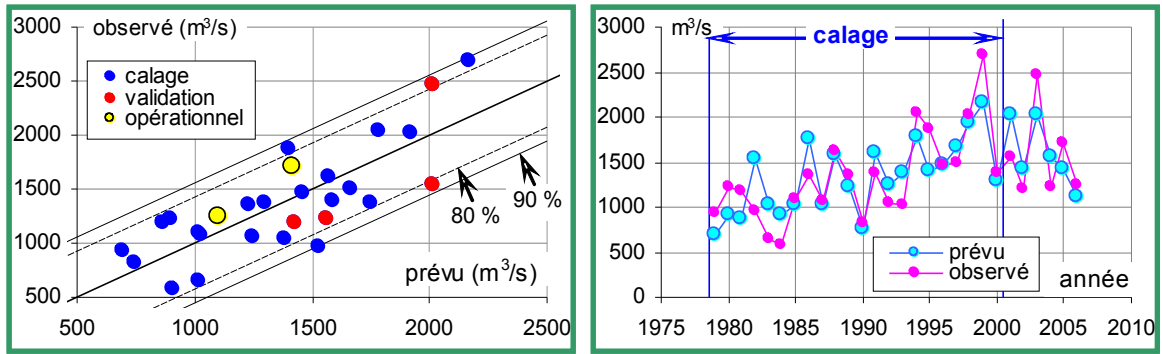


Figure 3 : débit de septembre octobre du **SENEGAL** à Bakel prévu à partir des index d'Arpege 3 forcé (zone J2 ; 5 paramètres ; $R^2=0.6507$; calage 1979-2000 ; opérationnel en 2005-2006)

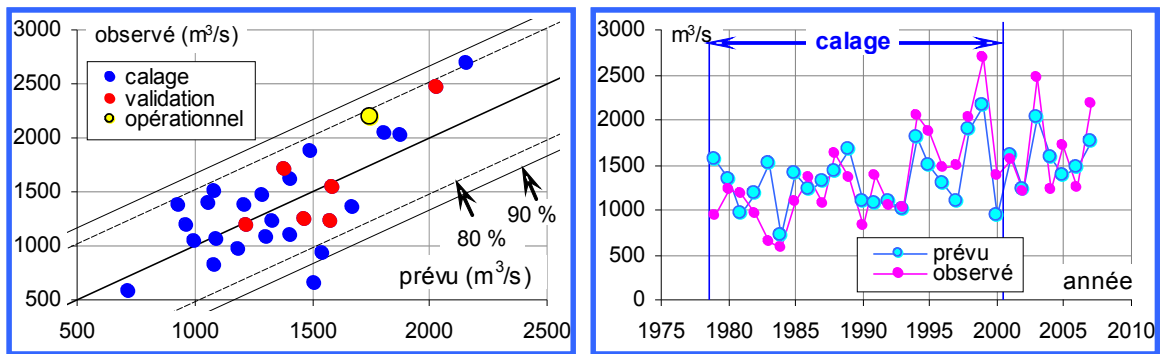


Figure 4 : débit de septembre octobre du **SENEGAL** à Bakel prévu avec les index d'Arpege 4.6 forcé (zone G5 ; 5 paramètres ; $R^2=0.4874$; calage 1979-2000 ; opérationnel en 2007)

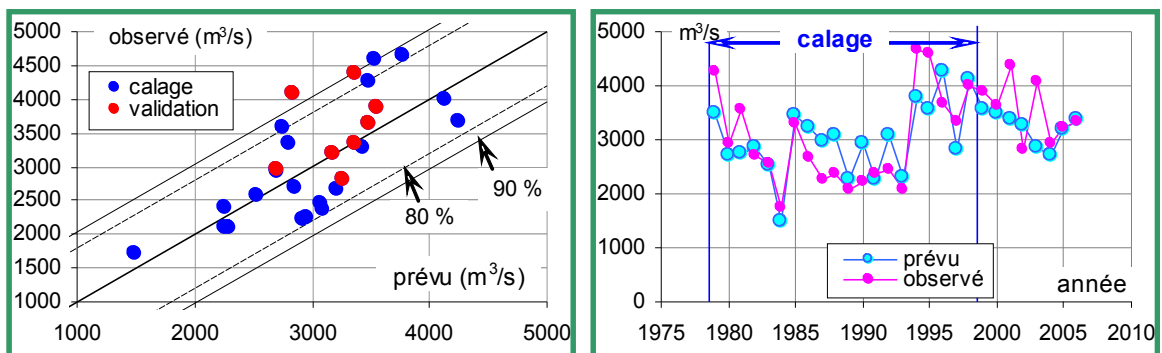


Figure 5 : débit de septembre octobre du **NIGER** à Koulikouro prévu à partir des index d'Arpege 3 forcé (zone G5 ; 3 paramètres ; $R^2=0.5773$; calage 1979-1998)

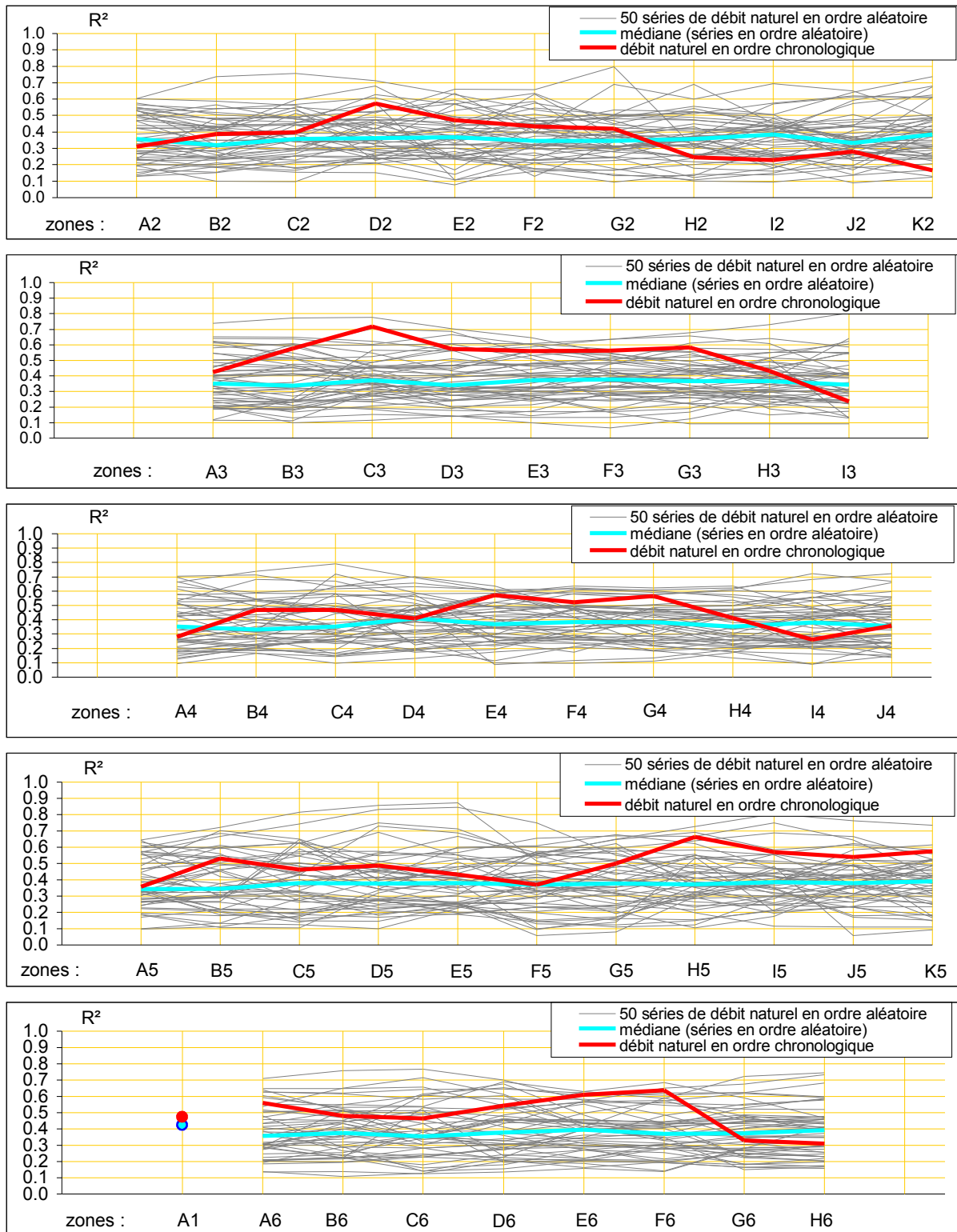


figure 6 : coefficient de détermination R^2 obtenu pour les 50 zones testées (période 1979-2000), entre les 8 premières composantes principales V_1 à V_8 des index de chaque zone et le débit réel Q_0 ou les débits aléatoires Q_1 à Q_{50} (fl. SENEGAL)

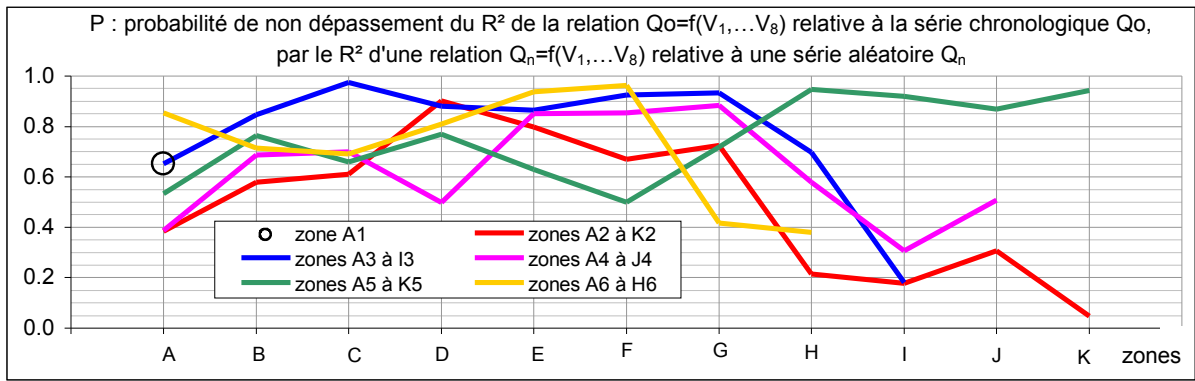


figure 7 : probabilité pour chacune des 50 zones, pour que la relation $Q_o=f(V_1,\dots,V_8)$ établie sur la période 1979-2000 ne puisse être obtenue par hasard (fl. **SENEGAL**)

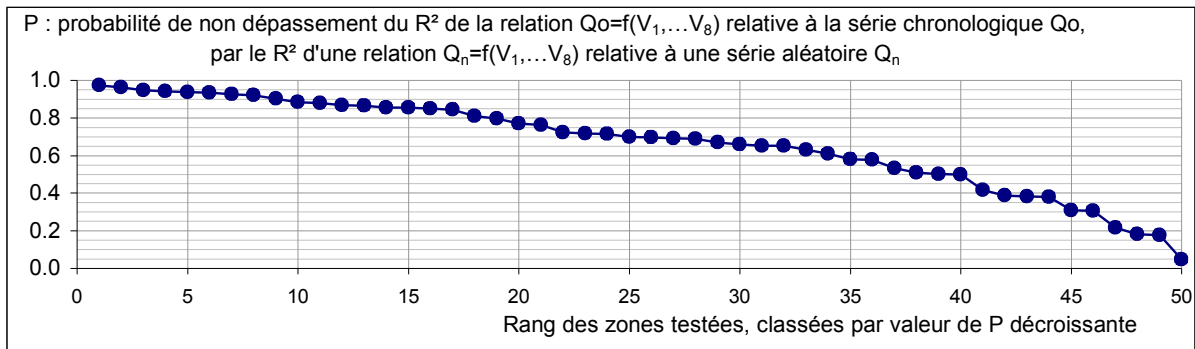


figure 8 : valeurs classées sur les 50 zones, de la probabilité P pour que la relation $Q_o=f(V_1,\dots,V_8)$ établie sur la période 1979-2000 ne soit pas due au hasard (fl. **SENEGAL**)

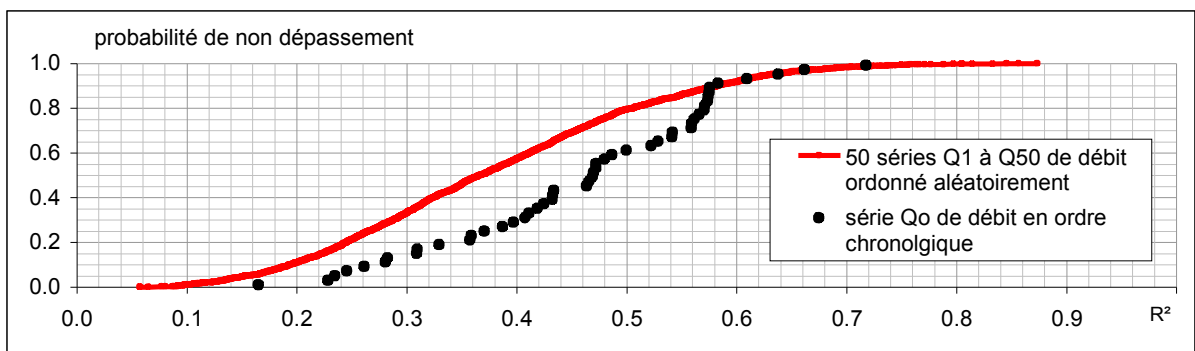


Figure 9 : fonction de répartition sur l'ensemble des 50 zones, du R^2 de la régression multiple établie sur la période 1979-2000 entre le débit naturel du **SENEGAL** (septembre octobre) et les 8 premières composantes principales V_1 à V_8 des index pluviométriques

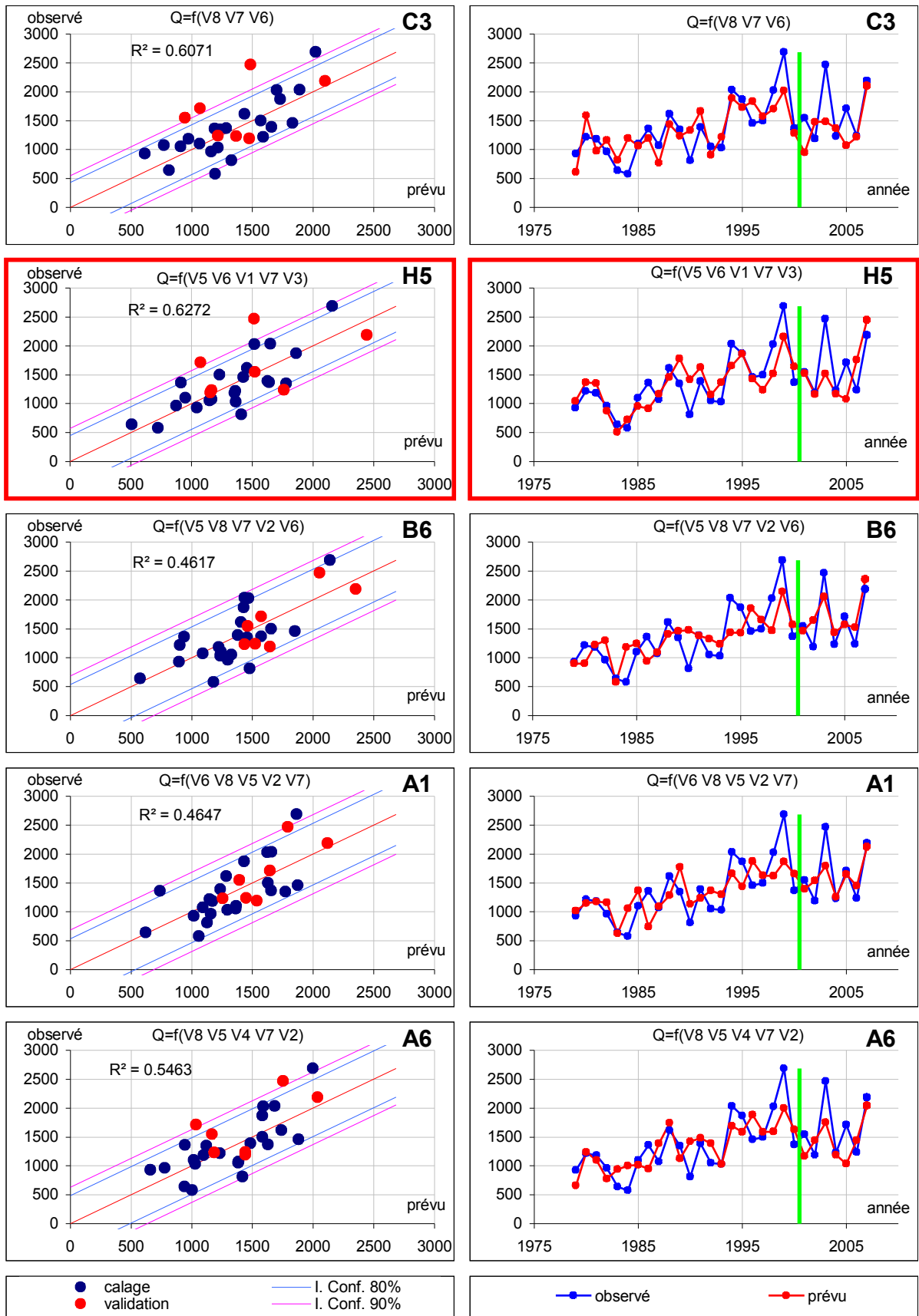


Figure 10-A : résultats obtenus pour le SENEGAL à Bakel (zones C3, H5, B6, A1 et A6)

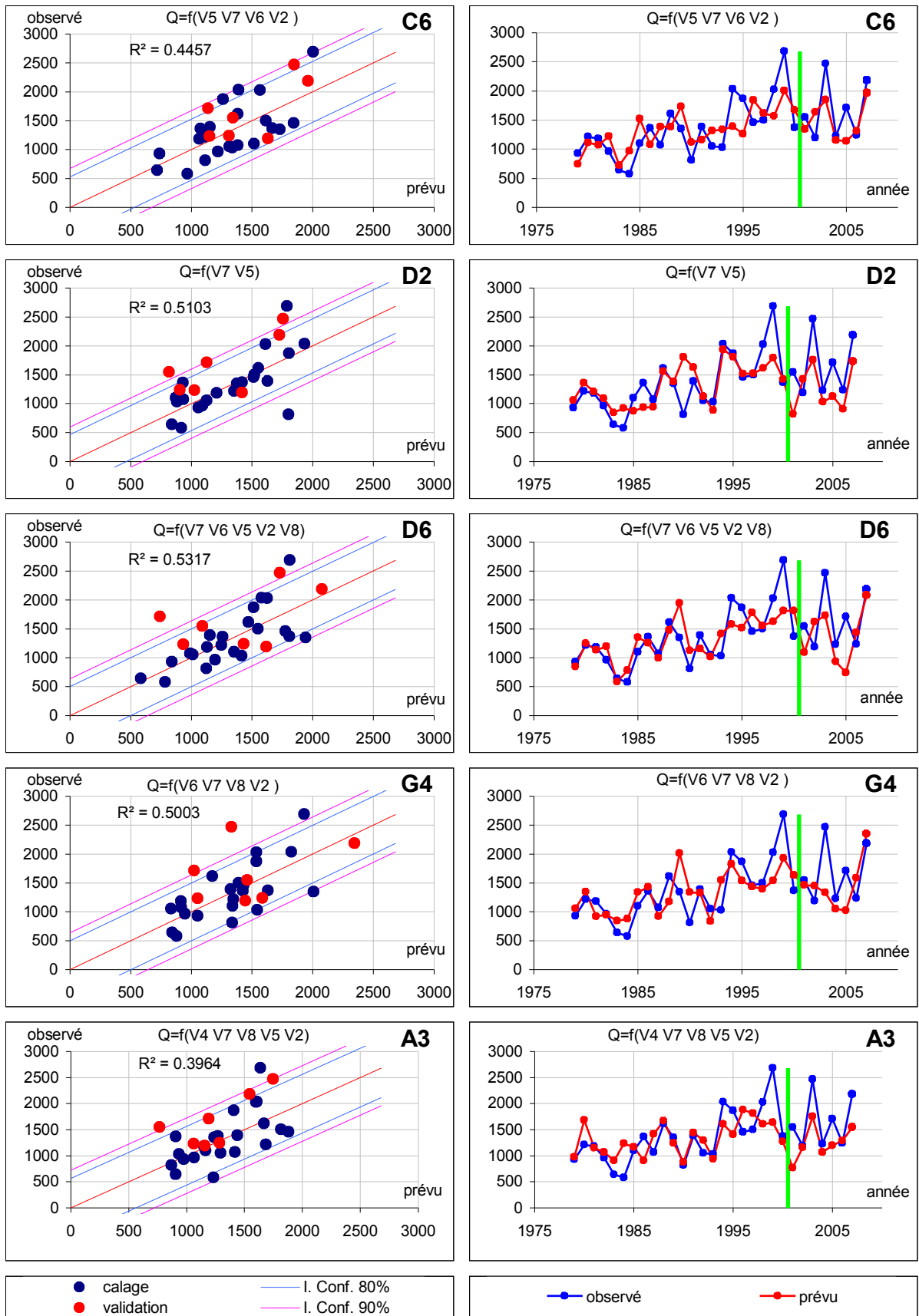


Figure 10-B : résultats obtenus pour le SENEGAL à Bakel (zones C6, D2, D6, G4, A3)

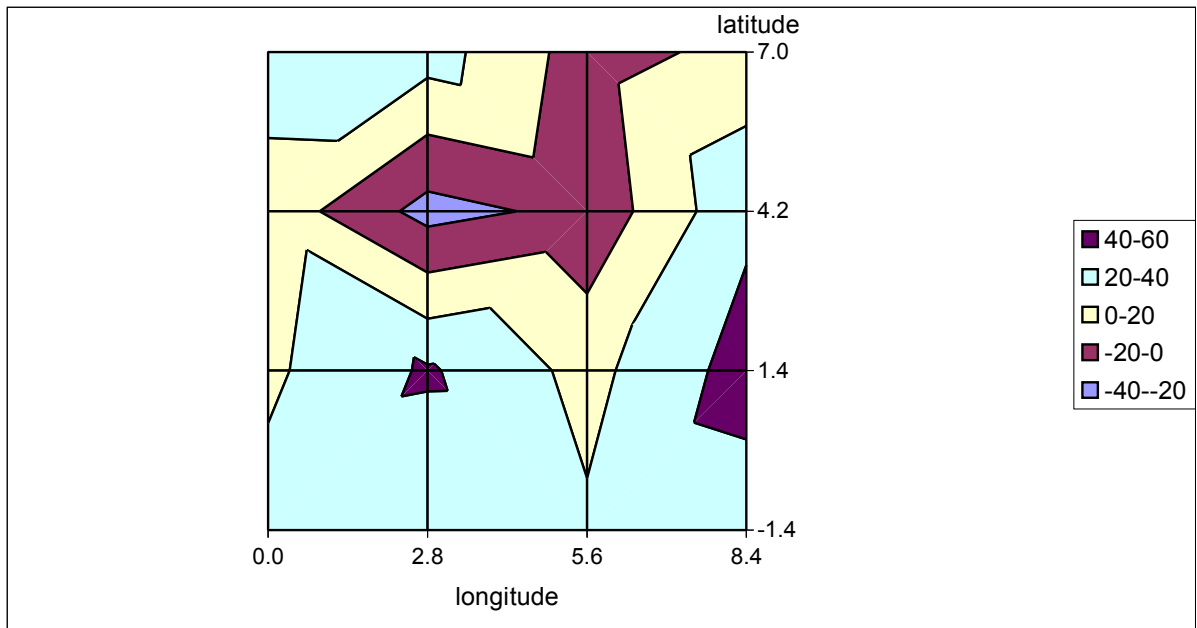


Figure 11-A : coefficients des index de septembre du modèle à 5 paramètres de la zone H5 ($Q=f(V_5 V_6 V_1 V_7 V_3)$) pour le fleuve **SENEGAL** à Bakel

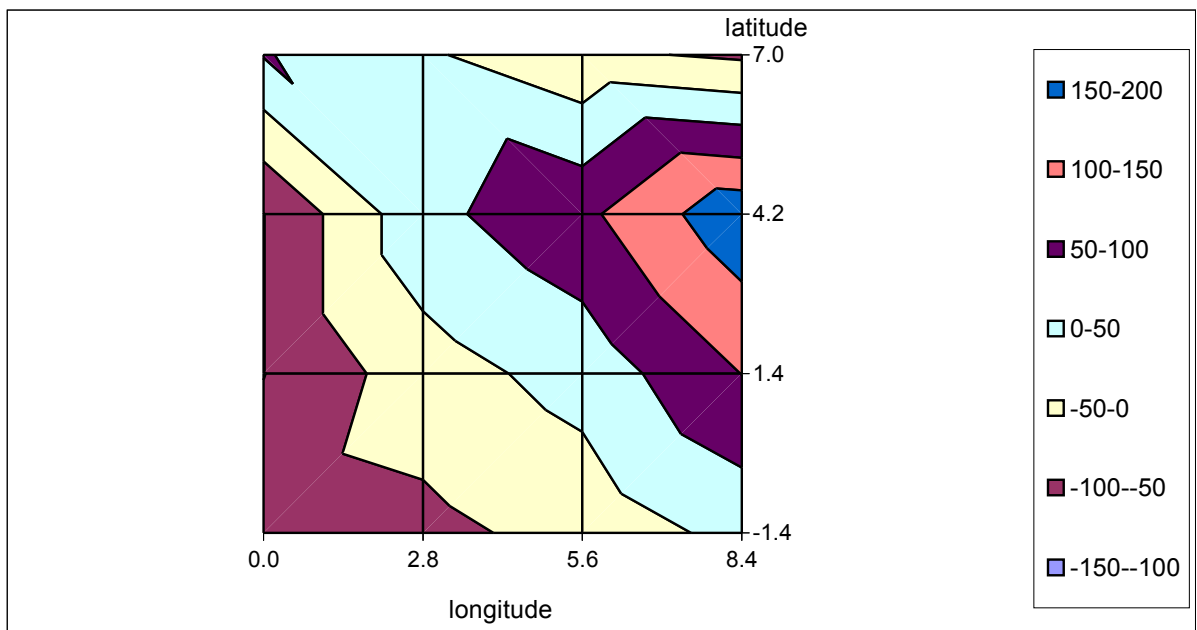


Figure 11-B : coefficients des index d'octobre du modèle à 5 paramètres de la zone H5 ($Q=f(V_5 V_6 V_1 V_7 V_3)$) pour le fleuve **SENEGAL** à Bakel

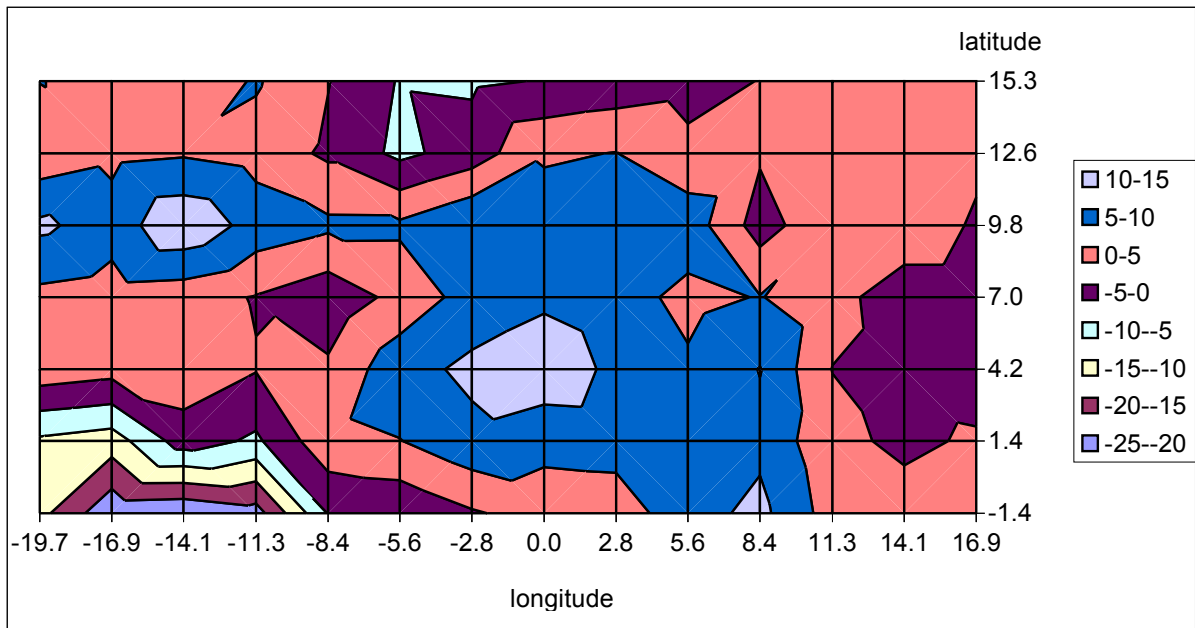


Figure 12-A : coefficients des index de septembre du modèle à 5 paramètres de la zone A1 ($Q=f(V_6 V_8 V_5 V_2 V_7)$) pour le fleuve **SENEGAL** à Bakel

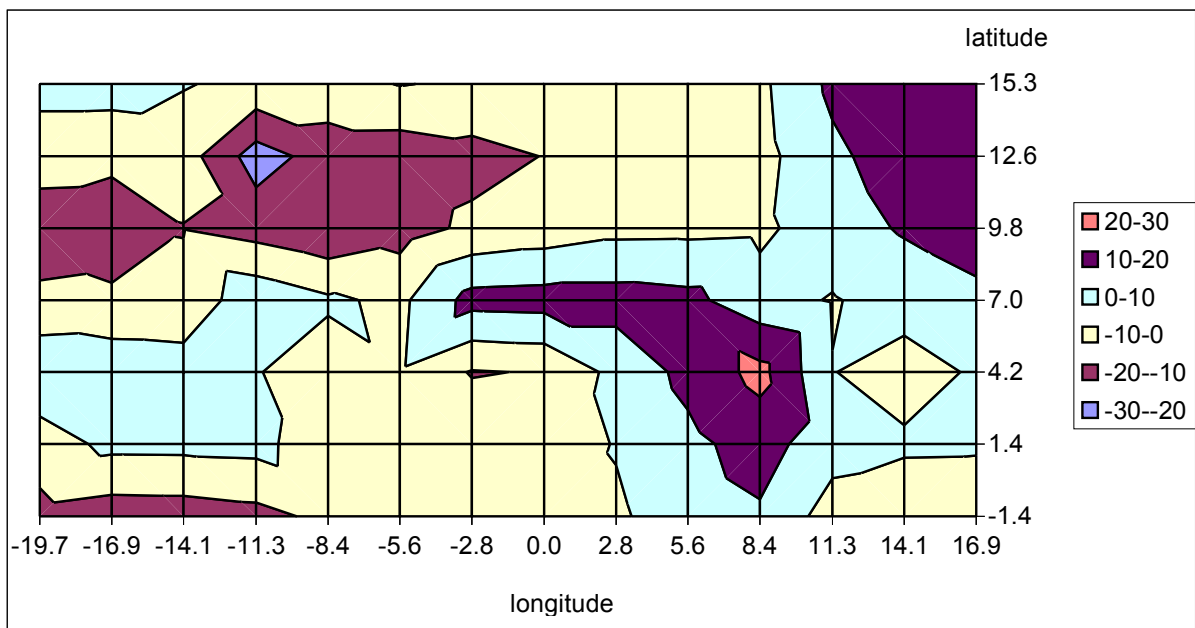


figure 12-B : coefficients des index d'octobre du modèle à 5 paramètres de la zone A1 ($Q=f(V_6 V_8 V_5 V_2 V_7)$) pour le fleuve **SENEGAL** à Bakel

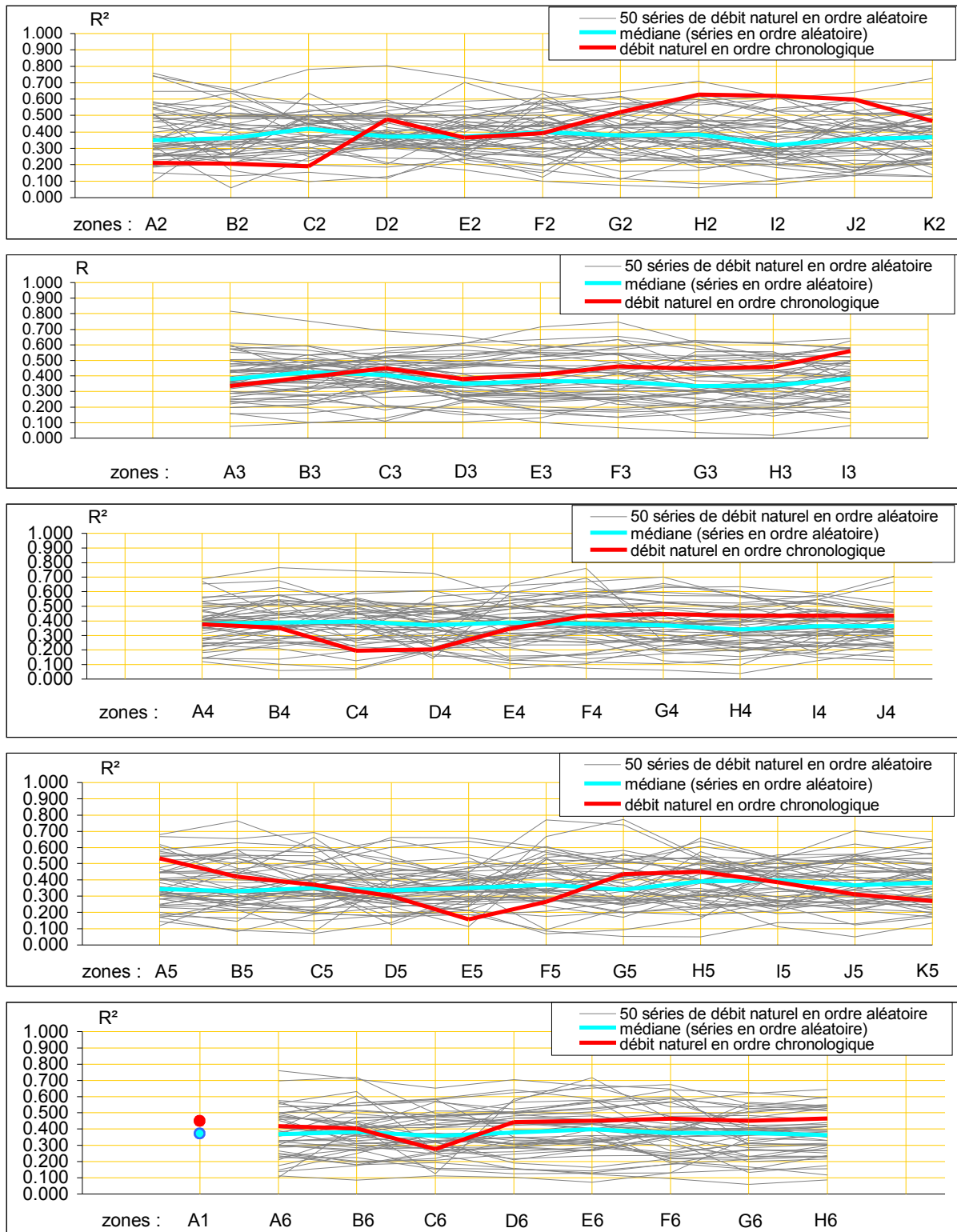


figure 13 : coefficient de détermination R^2 obtenu pour les 50 zones testées (période 1979-2000), entre les 8 premières composantes principales V_1 à V_8 des index de chaque zone et le débit réel Q_0 ou les débits aléatoires Q_1 à Q_{50} (fl. NIGER)

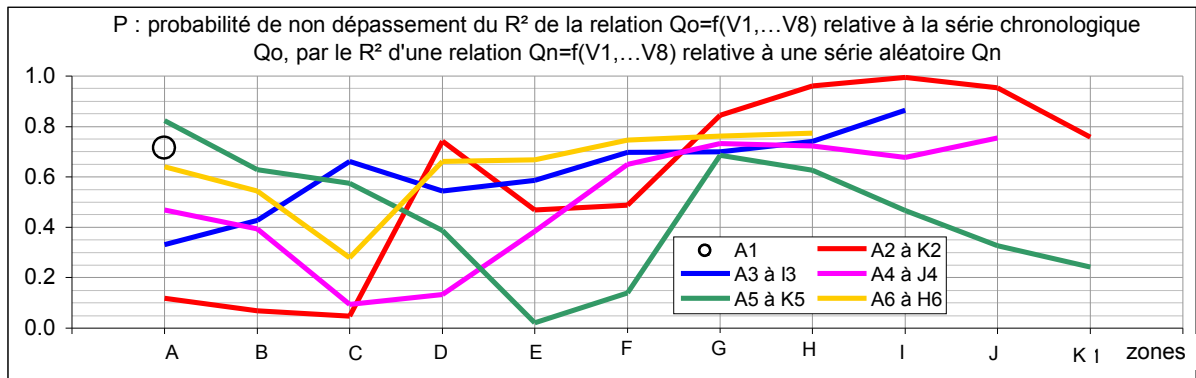


figure 14 : probabilité pour chacune des 50 zones, pour que la relation $Q_o=f(V_1, \dots, V_8)$ établie sur la période 1979-2000 ne puisse être obtenue par hasard (fl. **NIGER**)

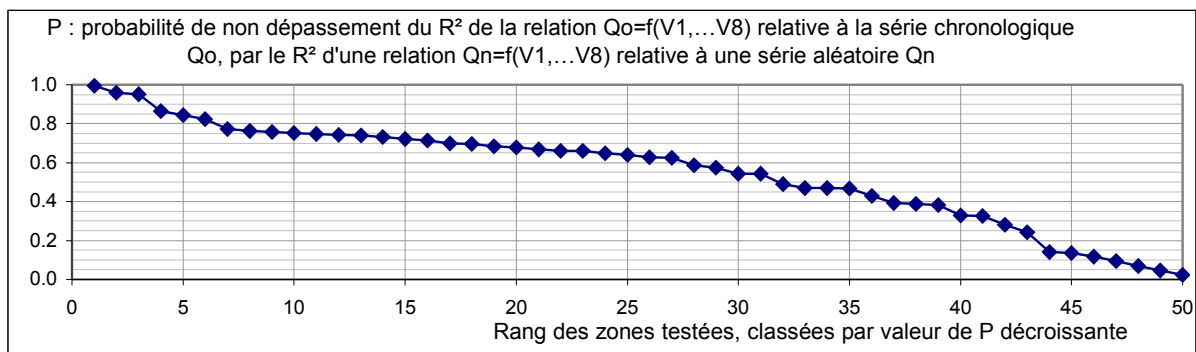


figure 15 : valeurs classées sur les 50 zones, de la probabilité P pour que la relation $Q_o=f(V_1, \dots, V_8)$ établie sur la période 1979-2000 ne soit pas due au hasard (fl. **NIGER**)

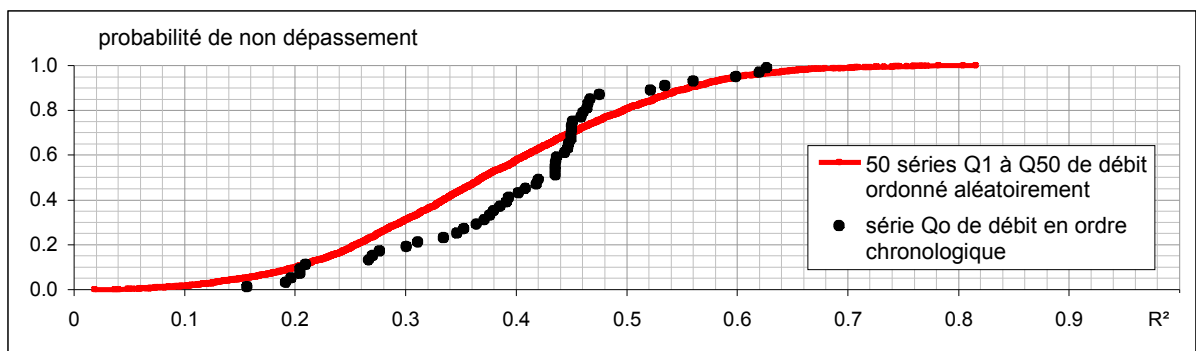


Figure 16 : fonction de répartition sur l'ensemble des 50 zones, du R^2 de la régression multiple établie sur la période 1979-2000 entre le débit naturel du **NIGER** (septembre octobre) et les 8 premières composantes principales V_1 à V_8 des index pluviométriques

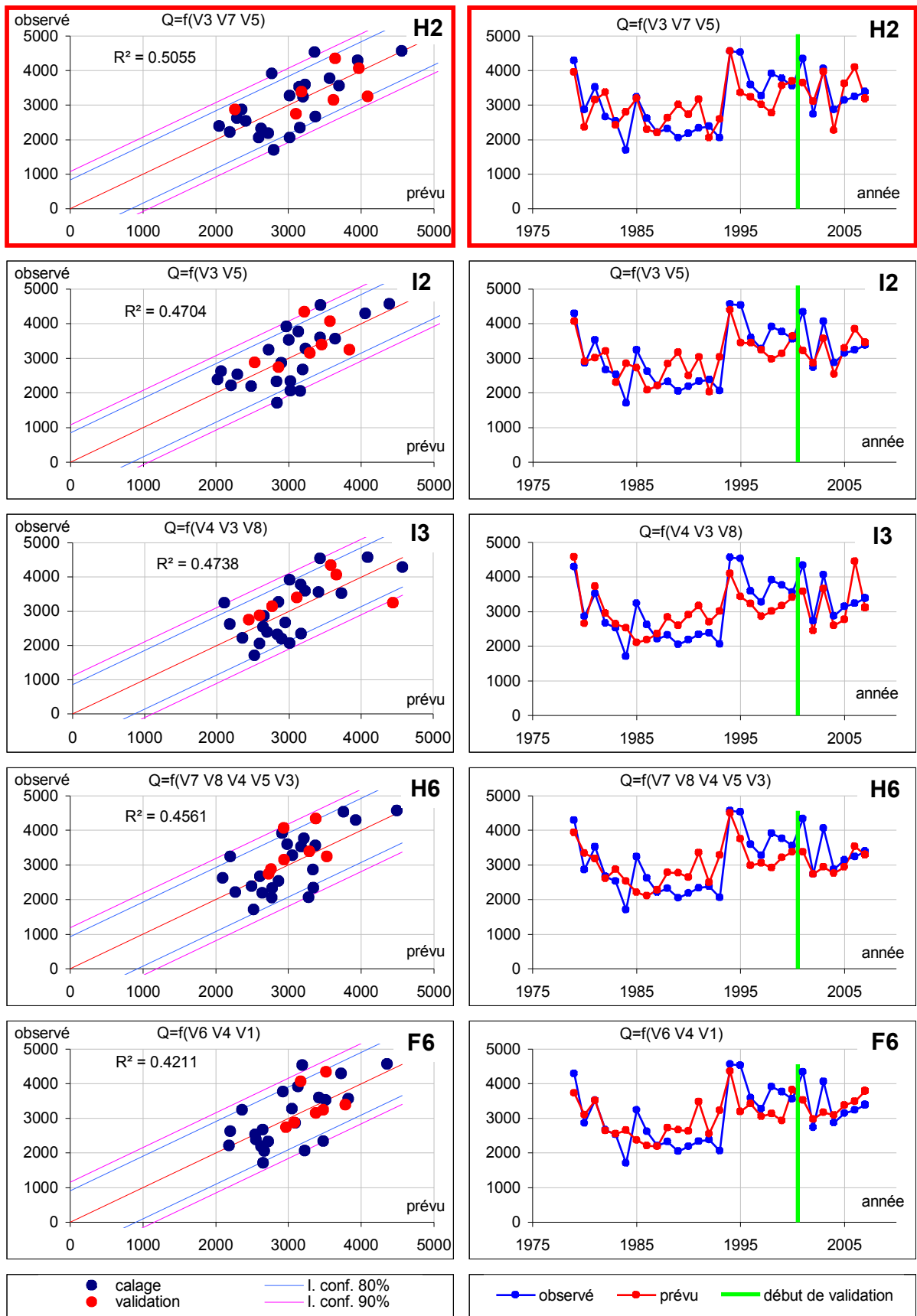


Figure 17-A : résultats obtenus pour le NIGER à Koulikouro (zones H2, I2, I3, H6 et F6)

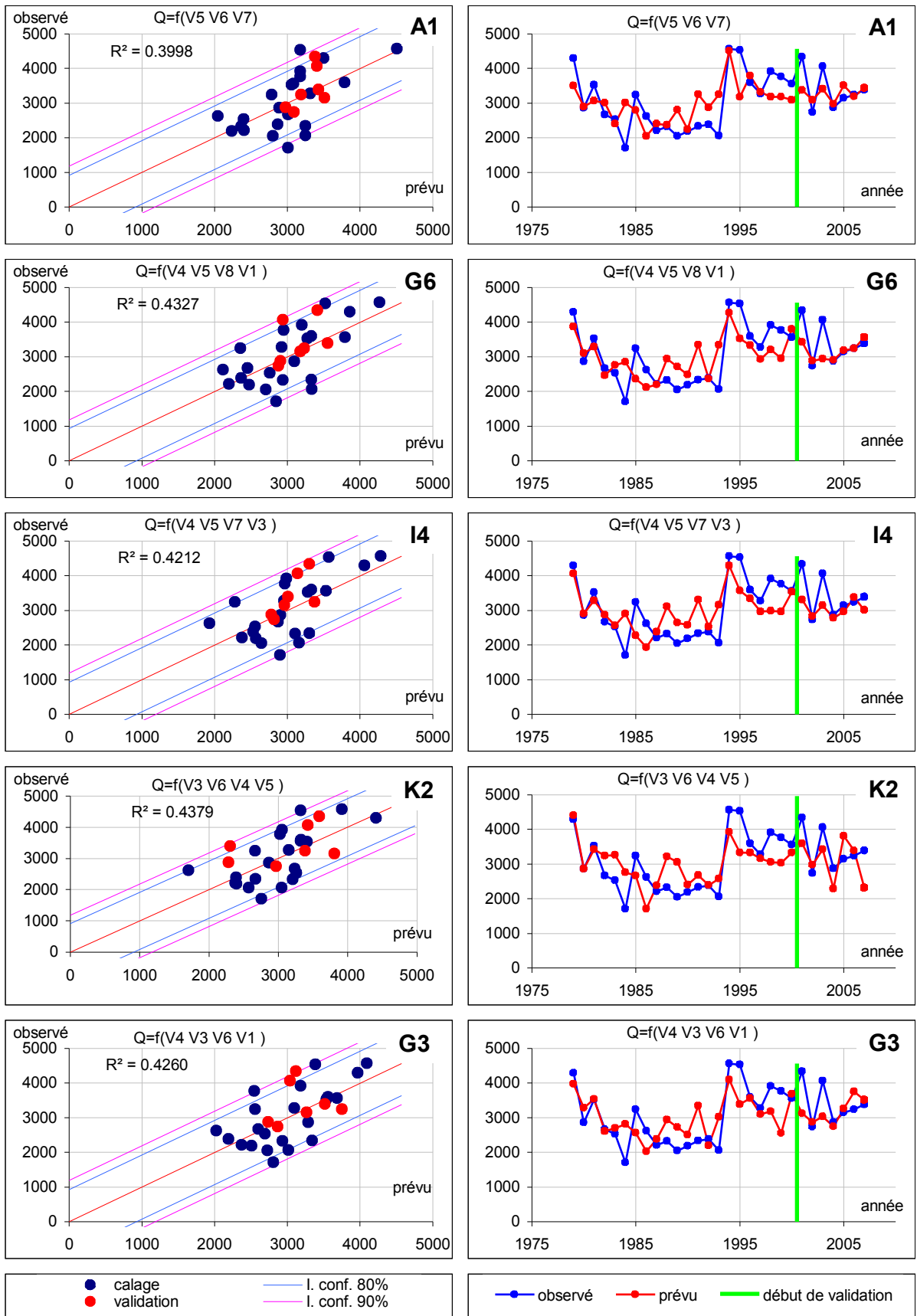


Figure 17-B : résultats obtenus pour le NIGER à Koulikouro (zones A1, G6, I4, K2 et G3)

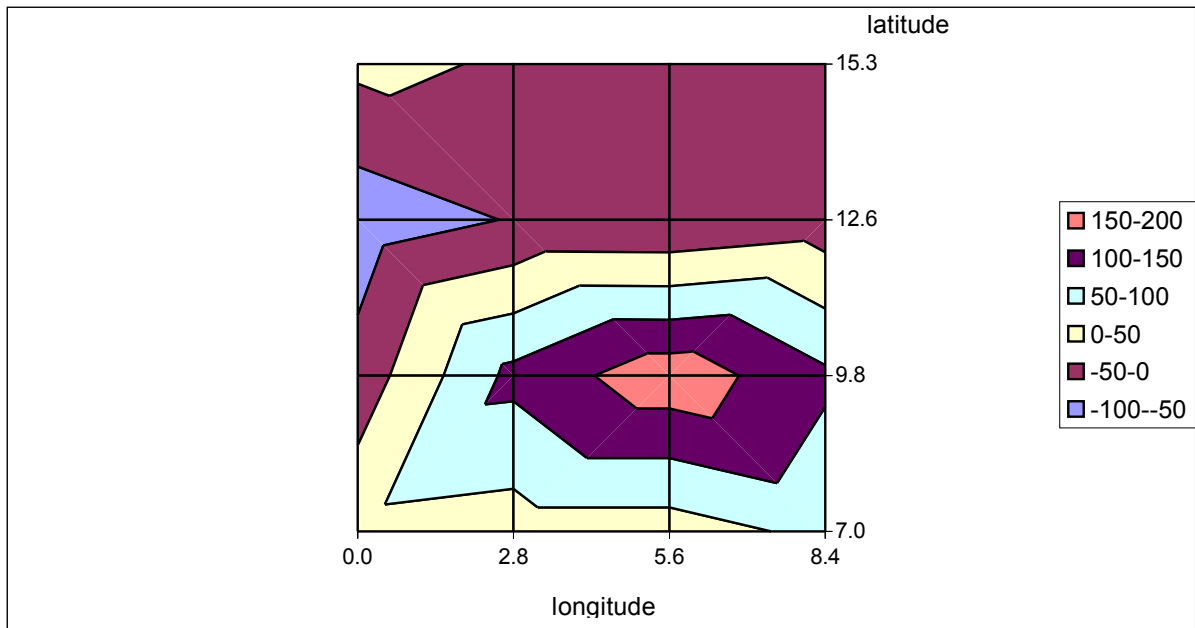


Figure 18-A : coefficients des index de septembre du modèle à 3 paramètres de la zone H2 : $(Q=f(V_3 V_7 V_5))$ pour le fleuve **NIGER** à Koulikouro

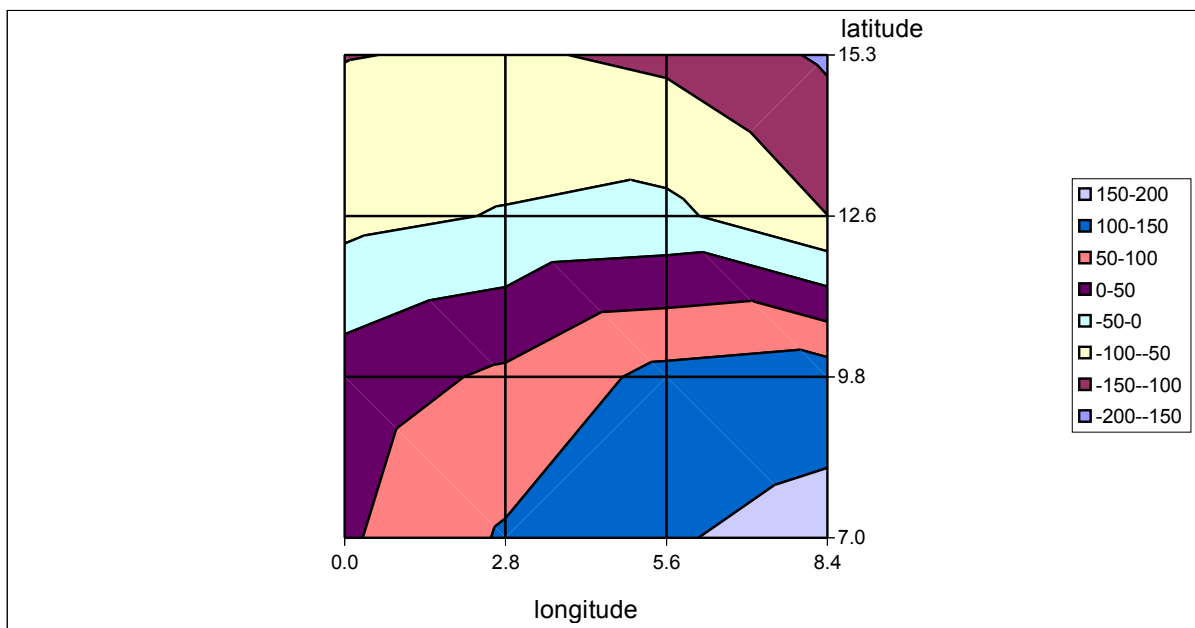


Figure 18-B : coefficients des index d'octobre du modèle à 3 paramètres de la zone H2 $(Q=f(V_3 V_7 V_5))$ pour le fleuve **NIGER** à Koulikouro