

# **Prévision saisonnière du volume de crue du fleuve Sénégal : utilisation des résultats du modèle ARPEGE Climat (version 4.6, calculateur SX8-NEC)**

**Jean-Claude Bader**

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

*Le 7 Mai 2007*

## **RÉSUMÉ ET CONCLUSION**

Des études précédentes ont montré que les résultats de la version 3 du modèle Arpege Climat pouvaient être utilisés, moyennant une adaptation statistique appropriée, pour prévoir début août le débit naturel de septembre octobre du fleuve Sénégal à Bakel et du fleuve Niger à Koulikouro. Le but de cette étude consiste à établir un modèle de prévision semblable pour le fleuve Sénégal, basé cette fois sur les résultats de la version 4.6 d'Arpege qui fonctionne toujours en mode "forcé".

Les index pluviométriques prévus début août pour septembre et pour octobre par les deux versions d'Arpege sont d'abord comparés entre eux sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. On constate que :

- Les différences sont très importantes entre les résultats des deux versions, avec un coefficient de corrélation  $R$  compris entre  $-0,2$  et  $+ 0,2$  pour plus de la moitié des 98 points de grille sur la période 1978-2006
- Les résultats des deux versions montrent cependant une certaine cohérence, du fait que leur corrélation est plus souvent positive que négative sur l'ensemble des mailles et aussi parce que les nouveaux index d'une maille présentent globalement un coefficient de corrélation supérieur avec les anciens index de la même maille plutôt qu'avec ceux des mailles voisines.

La recherche d'un modèle de prévision de débit basé sur les nouveaux résultats d'Arpege est effectuée en suivant la même méthode que dans les études précédente : 1- regroupement des index par zones élémentaires ; 2-analyse en composantes principales des index sur chaque zone ; 3 – calcul de corrélation linéaire multiple descendante entre les vecteurs propres d'index et le débit à prévoir ; 4 – évaluation du degré de signification des corrélation établies, par comparaison avec les résultats obtenus avec des séries aléatoires de débit ; 5- Validation des meilleures corrélations établies, sur des années non utilisées pour le calage. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- Contrairement aux anciens index d'Arpege qui, sur de nombreuses zones élémentaires, présentaient des corrélations significatives avec le débit du Sénégal ou du Niger, les nouveaux index n'apparaissent prédictifs pour le Sénégal que sur 3 zones élémentaires (F5, G5 et H5, voir fig. 1). La zone J2 qui apparaissait la plus prédictive avec les anciens index, ne l'est pas du tout avec les nouveaux.
- La solution finalement retenue est un modèle à 5 paramètres basé sur les index prévus début août par Arpege 4.6 pour les mois de septembre et d'octobre sur la zone G5. Ce modèle (fig. 8) donne un débit relié aux valeurs réelles de septembre octobre avec un coefficient de détermination  $R^2$  égal à  $0,487$  sur la période de calage (1978-2000). Les

résultats obtenus sont donc nettement moins bons en calage qu'avec les anciens index (zone J2,  $R^2 = 0,651$ ). Par contre, ils sont assez bons et comparables sur la période de validation (2001-2006).

En conclusion, les index d'Arpege 4.6, très différents de ceux d'Arpege 3 et contrairement à ceux-ci, ne présentent un caractère prédictif pour le débit du Sénégal de septembre octobre que sur une partie assez restreinte de l'Afrique de l'Ouest. La prévision de ces débits qu'ils permettent de faire à partir d'un modèle statistique à 5 paramètres, moins bonne qu'avec les anciens index sur la période de calage, est quand même de qualité comparable sur la période de validation.

## **CONTEXTE ET OBJECTIF**

L'étude publiée en 2006 dans le Journal des Sciences Hydrologiques a montré que les résultats du modèle Arpege Climat (version 3°, calculateur VPP5000 Fujitsu) permettaient de prévoir début août le volume naturel d'écoulement du fleuve Sénégal à Bakel à l'aide d'un modèle statistique à 5 paramètres. Ce modèle, calé sur la période 1979-2000 ( $R^2=0,651$ ) et validé sur 2001-2005 a permis de prévoir très correctement la faible crue de 2006.

Il a été montré par ailleurs que les mêmes résultats d'Arpege permettaient de prévoir le débit du Niger à Koulikouro par un modèle à 3 paramètres, calé sur 1979-1998 ( $R^2 = 0,577$ ) et validé sur 1999-2005.

Météo France établit désormais ses prévisions saisonnières de pluie à partir d'une nouvelle version (4.6) du modèle Arpege, exploitée sur un nouveau calculateur (SX8-NEC). L'objectif de cette étude consiste à voir si les nouveaux résultats d'Arpege ainsi obtenus permettent toujours de prévoir l'écoulement du fleuve Sénégal.

## **DONNÉES**

### **Index d'anomalie pluviométrique issus du modèle ARPEGE Climat**

L'étude exploite des index d'anomalie pluviométrique reconstitués en mode prévision chaque année entre 1979 et 2006 au début du mois d'août pour le mois de septembre et pour le mois d'octobre, sur un ensemble de 98 mailles 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). Ce maillage est identique à celui qui avait été utilisé dans l'étude publiée en 2006. Les valeurs d'index produites par ARPEGE 4.6 correspondent à la moyenne de 9 simulations qui diffèrent par des conditions initiales légèrement décalées en temps. Comme dans l'étude précédente, elles sont centrées réduites sur la période 1979-2000 et représentent pour chaque année un ensemble de 196 index ( 98 mailles X 2 mois).

### **Débit moyen naturel de septembre-octobre du Sénégal à Bakel**

On utilise ici les mêmes valeurs de débit (une par année) que dans l'étude publiée en 2006 (période 1979-2005), avec une année supplémentaire (2006). Avant 1987 (mise en service du barrage de Manantali), ce débit correspond à la moyenne effectivement observée sur la période septembre-octobre. A partir de 1987, les débits observés sont corrigés pour reconstituer le régime naturel, par une méthode combinant modèle de propagation et bilan de volume.

## **MÉTHODE**

### **Comparaison des index produits par l'ancienne et la nouvelle version d'Arpege**

Afin d'évaluer les modifications subies par les résultats d'Arpege, un coefficient de corrélation  $R$  est calculé pour chaque maille entre la nouvelle série d'index de septembre et les anciennes

séries obtenues sur cette même maille et les mailles avoisinantes, décalées entre -2 et +2 mailles dans la direction nord-sud ou est-ouest. La fonction de répartition des valeurs de R ainsi obtenues sur les 98 mailles est ensuite analysée pour les différents décalages testés. Une analyse similaire est effectuée pour les index du mois d'octobre.

## **Regroupement des index par zones**

Avant d'essayer de relier les débits aux nouveaux index, ces derniers sont regroupés par zones élémentaires comme dans l'étude précédente. Les 50 zones étudiées correspondent aux six types suivants (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 calculs de régressions entre vecteurs propres des index et débit**

Sur chacune des 50 zones, une analyse en composantes principales est effectuée (logiciel Statgraphics – Uniwin plus) pour la période 1979-2000 sur les index d'anomalie pluviométrique de septembre et d'octobre prévus début août, dont l'effectif est donc le double de celui des cellules de la zone. A chaque fois,

les huit premiers vecteurs propres  $V_1$  à  $V_8$  issus de l'ACP sont retenus pour la recherche d'une relation par corrélation linéaire multiple avec le débit moyen naturel  $Q_0$  de septembre-octobre du fleuve Sénégal à Bakel sur la période 1979-2000. Les régressions linéaires suivantes sont examinées :

- Régression entre  $Q_0$  et les 8 premiers vecteurs propres des index. Ces vecteurs sont directement classés par l'ACP, par ordre décroissant de variance représentée par rapport à celle de l'ensemble des index de la zone. Nous les notons respectivement  $V_1$  à  $V_8$ . La régression entre  $Q_0$  et les 5 premiers vecteurs propres est également examinée.
- Régression descendante entre  $Q_0$  et les 8 premiers vecteurs propres  $V_1$  à  $V_8$ . A chaque étape de ce calcul, le vecteur le moins explicatif vis-à-vis de  $Q_0$  est éliminé, les  $n$  meilleurs qui subsistent étant notés respectivement  $mV_1, mV_2, \dots, mV_n$ . Le processus est réitéré jusqu'au dernier meilleur vecteur subsistant. Du fait de la taille réduite de l'échantillon, seules les régressions faisant intervenir moins de 6 vecteurs sont retenues :

$$Q_0 = f(mV_1, \dots, mV_5) ; Q_0 = f(mV_1, \dots, mV_4) ; \dots ; Q_0 = f(mV_1)$$

### **Evaluation de la part de hasard intervenant dans les résultats**

Sur chacune des zones, la corrélation linéaire multiple établie sur la période 1979-2000 entre les 8 premiers vecteurs propres d'index et le débit réel  $Q_0$  est recalculée trente fois à partir de ces mêmes vecteurs propres, pour 30 séries aléatoires de débit. Ces dernières, notées  $Q_1$  à  $Q_{30}$ , sont obtenues par recombinaison au hasard des vingt débits  $Q_0$  observés entre 1979 et 2000.

La comparaison des coefficients de détermination  $R^2$  obtenus avec les débits  $Q_0$  observés d'une part, et les débits aléatoires  $Q_1$  à  $Q_{30}$  d'autre part, permet d'estimer si les régressions obtenues entre  $Q_0$  et les 8 premiers vecteurs propres ont de fortes chances ou non d'être le fruit du hasard.

## **Sélection des meilleurs modèles**

Une comparaison des différents modèles calés sur les débits observés  $Q_0$  de la période 1979-2000 est effectuée entre les 50 zones d'index. Les meilleurs modèles sont déterminés sur la base du coefficient de détermination  $R^2$  et de l'erreur type des régressions établies entre le débit  $Q_0$  et les vecteurs propres des index. L'application des modèles sur la période 2001-2006 permet enfin de valider ou non les modèles retenus.

## **RÉSULTATS**

### **Relations entre les valeurs d'index issues de la nouvelle et de l'ancienne version d'Arpege**

Pour les mois de septembre et d'octobre, la figure 2 donne la fonction de répartition du coefficient de corrélation  $R$  obtenu sur la période 1979-2006 entre les nouvelles et anciennes valeurs d'index d'une même maille. Elle montre une relation globalement faible entre nouveaux et anciens index, avec une valeur de  $R$  comprise entre -0,20 et +0,20 sur plus de 50% des mailles en septembre et plus de 60% en octobre. Les valeurs positives de  $R$  sont toutefois nettement plus nombreuses que les négatives. Les plus fortes d'entre elles s'observent surtout sur la partie sud-ouest du maillage (fig. 3). Malgré leur faiblesse, les relations positives obtenues entre nouveaux et anciens index d'une même maille sont globalement meilleures que les relations établies entre les nouveaux index d'une maille et les anciens index des mailles voisines (fig. 4 et 5). Ceci montre une certaine cohérence entre les résultats des deux versions d'Arpege.

## **Zones présentant une relation significative entre leurs index pluviométriques et le débit du Sénégal.**

La figure 6 (à comparer avec la figure 2 de la publication de 2006 sur le Sénégal et la figure 3 du rapport sur le Niger) montre que sur presque toutes les zones, le coefficient de détermination  $R^2$  établi sur la période 1979-2000 entre les 8 premiers vecteurs propres V1 à V8 des index et la série de débit réelle  $Q_0$  est fréquemment dépassé avec des séries aléatoires de débit. Ceci montre que sur ces zones, la régression établie entre V1 à V8 et  $Q_0$  n'est pas significative.

La fonction de répartition des  $R^2$  obtenus avec les 30 séries de débit aléatoires permet d'évaluer pour chaque zone étudiée, la probabilité de non dépassement de la valeur obtenue avec la série réelle de débit. Ainsi, la figure 7 montre qu'avec un  $R^2$  égal respectivement à 0,573 ; 0,513 et 0,503 seules les zones F5, G5 et H5 présentent une relation significative entre les vecteurs V1 à V8 d'index et le débit réel  $Q_0$ , qui a au moins 80% de chances de ne pas être le fruit du hasard. Ces résultats sont beaucoup moins bons que ceux qui avaient été obtenus avec les index produits par Arpege 3, puisqu'avec ceux-ci, sur la plupart des zones analysées, les 30 séries de débits aléatoires étaient en grande majorité moins bien corrélées aux 5 premiers vecteurs propres d'index que la série réelle des débits naturels du Sénégal ou du Niger. Avec Arpege 4.6, seules trois des 50 zones analysées présentent une relation significative entre leurs index et le débit du Sénégal. Parmi elles ne figure pas la zone J2 sur laquelle les résultats d'Arpege 3 s'étaient avérés les plus prédictifs pour le débit du Sénégal.

## **Modèles de prévision de débit basés sur les index des zones F5, G5 et H5**

Les résultats obtenus avec les 5 meilleurs vecteurs propres d'index mV1 à mV5 sélectionnés par la méthode de régression descendante, confirment bien que les zones F5, G5 et H5 sont celles où les index pluviométriques d'Arpege 4.6 sont les plus prédictifs pour le débit du Sénégal. Ce



sont les seules où le coefficient de détermination  $R^2$  entre mV1 à mV5 et  $Q_0$  est supérieur à 0,46 (tab. 1).

Pour sélectionner le meilleur modèle possible parmi ceux des trois zones sélectionnées, on se base sur leurs erreurs types évaluées comme indiqué ci-dessous sur la période de calage, la période de validation et la période totale :

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

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

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

Avec :

- Etc : erreur type du modèle sur la période de calage
- Etv : erreur type du modèle sur la période de validation
- Ett : erreur type du modèle sur la période totale
- n : nombre de vecteurs propres d'index utilisés dans la régression établie avec le débit  $Q_0$
- Q : débit calculé à partir des n vecteurs propres utilisés, par la régression établie entre ceux-ci et le débit observé  $Q_0$
- $Nc$  : taille de l'échantillon de calage, égale à 22 pour la période 1979-2000
- $Nv$  : taille de l'échantillon de validation, égale à 6 pour la période 2001-2006
- $Nt$  : taille de l'échantillon total, égale à 28 pour la période 1979-2006

Les valeurs obtenues pour Etc, Etv et Ett (tab. 2) peuvent être comparées à l'écart type du débit naturel réel  $Q_0$ , dont les valeurs calculées sur les mêmes périodes s'élèvent respectivement à 496, 489 et 495  $m^3s^{-1}$ .

Les modèles de la zone F5 sont les meilleurs sur la période calage, avec une erreur type s'abaissant jusqu'à 367 pour le modèle à trois paramètres. Malheureusement, ils sont tous disqualifiés par leurs très mauvais résultats sur la période de validation, avec une erreur type dépassant largement l'écart type des débits observés.

Sur la période de calage, les erreurs types des modèles des zones G5 et H5 diffèrent de moins d'un pourcent. Par contre, sur la période de validation, les modèles de G5 donnent de bien meilleurs résultats. Ce sont donc les index de cette zone que l'on retient pour prévoir le débit du Sénégal.

Les modèles à cinq, quatre, trois ou deux paramètres de G5 présentent des erreurs types quasi-identiques sur la période de calage avec moins de 2,5% de différence entre la plus forte et la plus faible. Ce sont donc les résultats obtenus sur la période de validation qui permettent de sélectionner en définitive le meilleur modèle, qui utilise les 5 meilleurs vecteurs propres  $mV_1$  à  $mV_5$  de la zone G5. Sur l'ensemble des 50 modèles basés sur les 5 meilleurs vecteurs propres sélectionnés par régression descendante sur les différentes zones, ce modèle se classe en troisième position pour le coefficient de détermination ( $R^2 = 0,487$ ) et l'erreur type de calage ( $Etc = 407 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), en quatrième position pour l'erreur type sur la période de validation ( $Etv = 282 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) et en première position pour l'erreur type sur la période totale ( $Ett = 334 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ).

### **Modèle sélectionné pour prévoir le débit à partir des index de la zone G5**

Le modèle retenu permet d'estimer le débit naturel de septembre octobre du Sénégal à Bakel à partir des vecteurs propres de rangs 5, 6, 7, 3 et 4 des index pluviométriques de septembre et d'octobre calculés début août sur la zone G5. Il s'exprime ainsi, en  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ :

$$Q = f(mV_1 \dots mV_5) = 1327 - 204 V_5 - 238 V_6 + 163 V_7 - 47,4 V_3 + 46,0 V_4$$

La comparaison des débits réels et modélisés (tab. 3, fig. 8) montre que seul un point sur 22 se situe en dehors de l'intervalle de confiance à 90% sur la période de calage et que tous ceux de la période de validation se situent dans l'intervalle de confiance à 80%.

En utilisant les coordonnées des vecteurs propres, le modèle permet d'exprimer directement le débit par une combinaison linéaire des index (tab. 4). Dans cette relation, les coefficients d'index de septembre croissent globalement de l'ouest vers l'est (fig. 9) et surtout du sud vers le nord. (fig. 10). Ceux des index d'octobre ne sont pas structurés de façon homogène suivant l'une ou l'autre de ces directions.

## TABLEAUX

zones	vecteurs propres d'index utilisés						
	V <sub>1..V<sub>8</sub></sub>	V <sub>1..V<sub>5</sub></sub>	mV <sub>1..mV<sub>5</sub></sub>	mV <sub>1..mV<sub>4</sub></sub>	mV <sub>1..mV<sub>3</sub></sub>	mV <sub>1..mV<sub>2</sub></sub>	mV <sub>1</sub>
A2	0.383	0.308	0.373	0.360	0.342	0.299	0.205
B2	0.340	0.233	0.325	0.310	0.268	0.215	0.154
C2	0.343	0.241	0.319	0.295	0.251	0.195	0.124
D2	0.285	0.177	0.264	0.241	0.215	0.156	0.087
E2	0.237	0.137	0.226	0.208	0.172	0.130	0.065
F2	0.193	0.121	0.188	0.180	0.170	0.119	0.062
G2	0.322	0.097	0.299	0.275	0.243	0.197	0.147
H2	0.410	0.127	0.395	0.361	0.312	0.257	0.194
I2	0.279	0.183	0.273	0.253	0.233	0.198	0.140
J2	0.258	0.187	0.253	0.237	0.202	0.165	0.118
K2	0.343	0.194	0.302	0.261	0.216	0.160	0.097
A3	0.338	0.252	0.318	0.297	0.274	0.213	0.144
B3	0.264	0.212	0.245	0.219	0.184	0.148	0.102
C3	0.255	0.152	0.239	0.216	0.187	0.154	0.078
D3	0.315	0.099	0.294	0.281	0.257	0.215	0.161
E3	0.120	0.070	0.117	0.111	0.102	0.084	0.044
F3	0.099	0.083	0.096	0.093	0.087	0.079	0.049
G3	0.231	0.111	0.229	0.227	0.220	0.183	0.119
H3	0.249	0.127	0.246	0.232	0.212	0.188	0.120
I3	0.208	0.151	0.197	0.188	0.152	0.113	0.061
A4	0.320	0.242	0.310	0.301	0.262	0.192	0.122
B4	0.289	0.203	0.271	0.248	0.220	0.156	0.086
C4	0.294	0.203	0.235	0.202	0.163	0.115	0.063
D4	0.359	0.160	0.318	0.293	0.267	0.233	0.166
E4	0.386	0.110	0.384	0.371	0.350	0.319	0.244
F4	0.148	0.032	0.142	0.134	0.124	0.111	0.096
G4	0.264	0.076	0.262	0.250	0.233	0.204	0.159
H4	0.275	0.099	0.271	0.268	0.253	0.215	0.170
I4	0.239	0.122	0.225	0.194	0.159	0.118	0.076
J4	0.214	0.152	0.210	0.199	0.180	0.137	0.086
A5	0.370	0.296	0.342	0.315	0.285	0.236	0.167
B5	0.408	0.315	0.400	0.394	0.361	0.273	0.167
C5	0.383	0.255	0.372	0.338	0.288	0.213	0.118
D5	0.372	0.258	0.372	0.357	0.308	0.252	0.188
E5	0.484	0.388	0.454	0.432	0.394	0.346	0.230
F5	0.573	0.392	0.554	0.543	0.531	0.483	0.323
G5	0.513	0.254	0.487	0.472	0.452	0.398	0.202
H5	0.503	0.049	0.491	0.478	0.454	0.388	0.225
I5	0.318	0.109	0.314	0.301	0.286	0.243	0.182
J5	0.333	0.139	0.320	0.296	0.270	0.230	0.170
K5	0.291	0.155	0.232	0.205	0.174	0.120	0.061
A6	0.353	0.228	0.291	0.250	0.202	0.146	0.079
B6	0.318	0.255	0.278	0.255	0.231	0.183	0.126
C6	0.308	0.235	0.269	0.239	0.205	0.165	0.121
D6	0.267	0.138	0.232	0.209	0.175	0.128	0.069
E6	0.168	0.047	0.155	0.142	0.127	0.106	0.073
F6	0.288	0.064	0.284	0.278	0.255	0.223	0.164
G6	0.244	0.089	0.237	0.222	0.189	0.155	0.100
H6	0.278	0.079	0.111	0.068	0.023	0.019	0.019
A1	0.249	0.228	0.228	0.209	0.180	0.151	0.117

Tableau 1 : coefficient de détermination R<sup>2</sup> obtenu pour les 50 zones sur la période 1979-2000, entre les vecteurs propres des index pluviométriques de septembre et d'octobre prévus début août et le débit naturel réel Q<sub>0</sub> de septembre octobre à Bakel

zones	vecteurs propres d'index utilisés							
	V <sub>1..V.8</sub>	V <sub>1..V.5</sub>	mV <sub>1..mV.5</sub>	mV <sub>1..mV.4</sub>	mV <sub>1..mV.3</sub>	mV <sub>1..mV.2</sub>	mV <sub>1</sub>	
F5	412	443	379	373	367	375	418	Etc : erreur type (période de calage : 1979-2000)
G5	440	491	407	400	397	405	454	
H5	444	554	405	398	396	408	447	
F5	501	1124	668	695	774	888	1308	Etv : erreur type (période de validation: 2001-2006)
G5	349	906	282	381	468	445	737	
H5	492	411	575	482	568	717	553	
F5	364	619	422	433	464	514	701	Ett : erreur type (période totale : 1979-2006)
G5	340	560	334	358	385	392	513	
H5	379	460	406	382	412	472	457	

Tableau 2 : erreurs type des régressions calées sur les zones F5, G5 et H5 entre les vecteurs propres des index pluviométriques de septembre et d'octobre prévus début août et le débit naturel réel Qo de septembre octobre à Bakel

année	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
Qo (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	929	1214	1179	962	641	576	1100	1363	1070	1612	1347	811	1383	1048
Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	1547	1338	966	1188	1515	718	1407	1212	1310	1415	1677	1085	1059	1095
année	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Qo (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	1029	2034	1869	1457	1499	2027	2682	1367	1545	1191	2468	1228	1708	1239
Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	1002	1810	1498	1290	1090	1882	2159	937	1592	1224	2030	1583	1388	1468

Tableau 3 : Débit naturel de septembre octobre du Sénégal à Bakel.. Valeurs modélisées (Q) à partir des index de septembre et d'octobre calculés début août pour la zone G5 et valeurs réelles (Qo)

maille	56	70	84	98	43	57	71	85	44	58	72	86	45	59
latitude	6.976	4.186	1.395	-1.395	6.976	4.186	1.395	-1.395	6.976	4.186	1.395	-1.395	6.976	4.186
longitude	-2.813	-2.813	-2.813	-2.813	0.000	0.000	0.000	0.000	2.813	2.813	2.813	2.813	5.625	5.625
septembre	87.56	-17.61	-85.41	-71.11	79.44	1.487	-106.9	-53.24	97.48	61.89	-52.62	4.700	110.6	84.91
octobre	49.88	-88.40	-12.37	-6.060	62.79	-79.02	-49.31	-44.14	-5.846	-58.49	3.885	-40.49	-33.52	106.7

tableau 4 : coefficients des index pluviométriques de la zone G5, dans le modèle à 5 paramètres donnant le débit naturel de septembre octobre du Sénégal à Bakel

# FIGURES

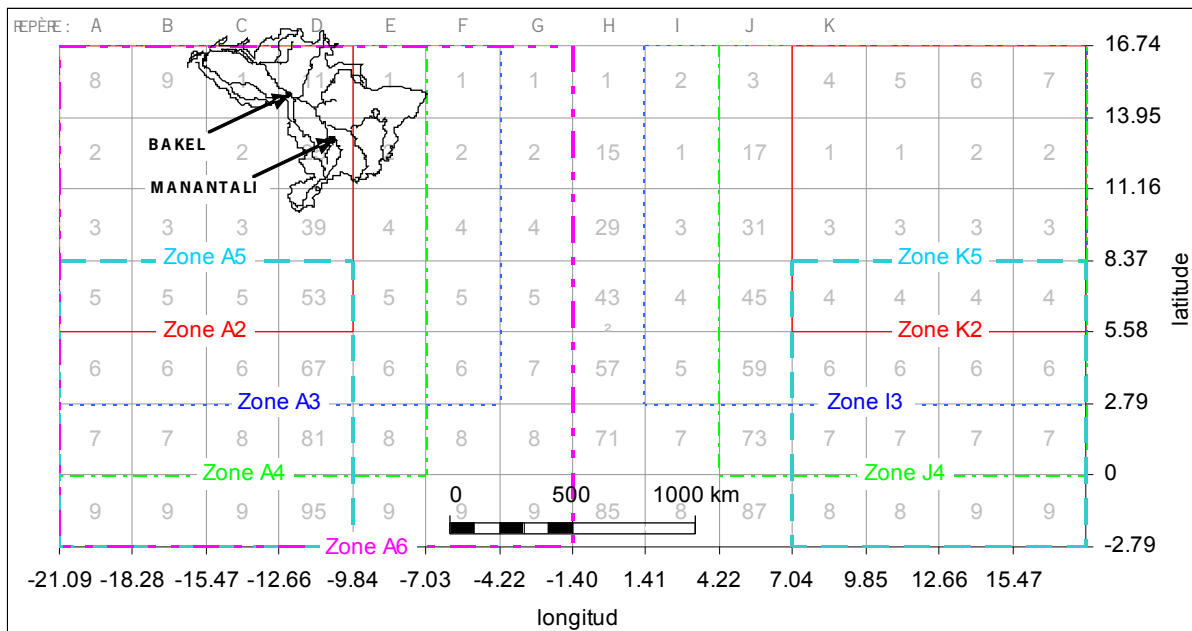


Figure 1 : carte du bassin du fleuve Sénégal et maillage des résultats du modèle ARPEGE Climat.

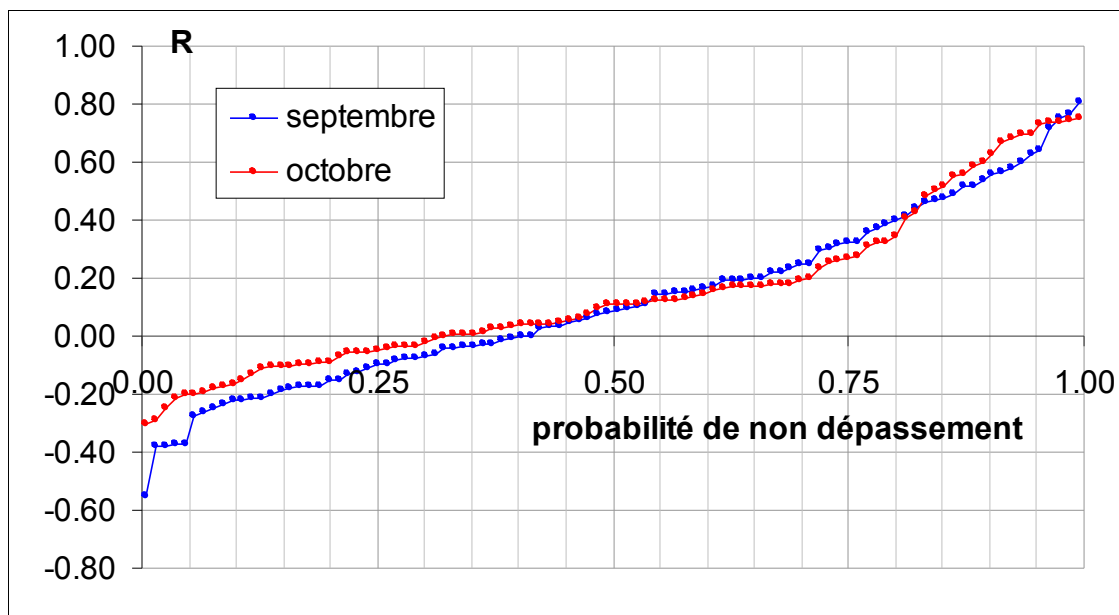


Figure 2 : fonction de répartition sur les 98 mailles, du coefficient de corrélation  $R$  calculé sur la période 1979-2006 entre les index produits début août par Arpege 3 et par Arpege 4.6, pour les mois de septembre et octobre.

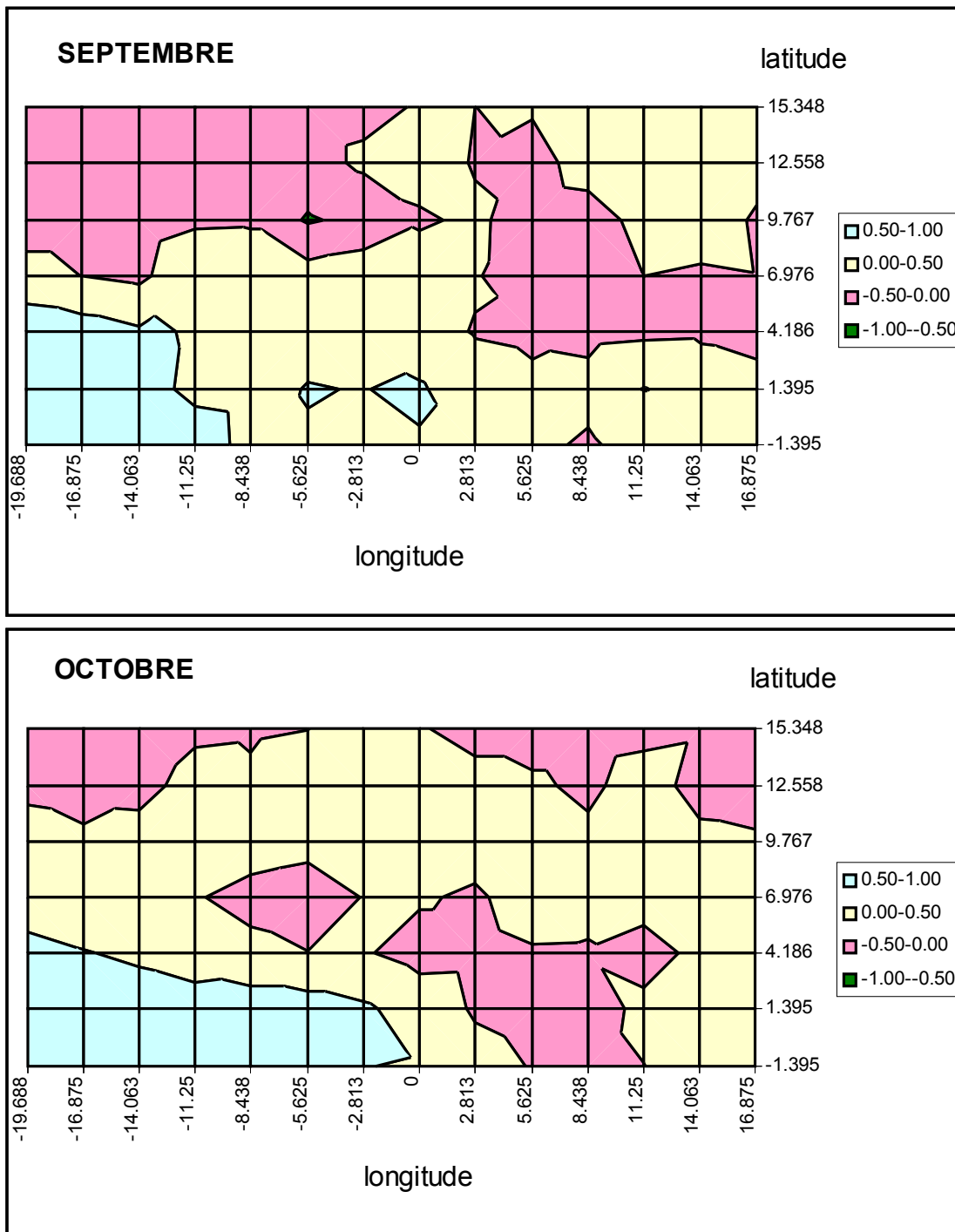


Figure 3 : cartographie du coefficient de corrélation R calculé sur la période 1979-2006 entre les index produits début août par Arpege 3 et par Arpege 4.6., pour les mois de septembre et octobre

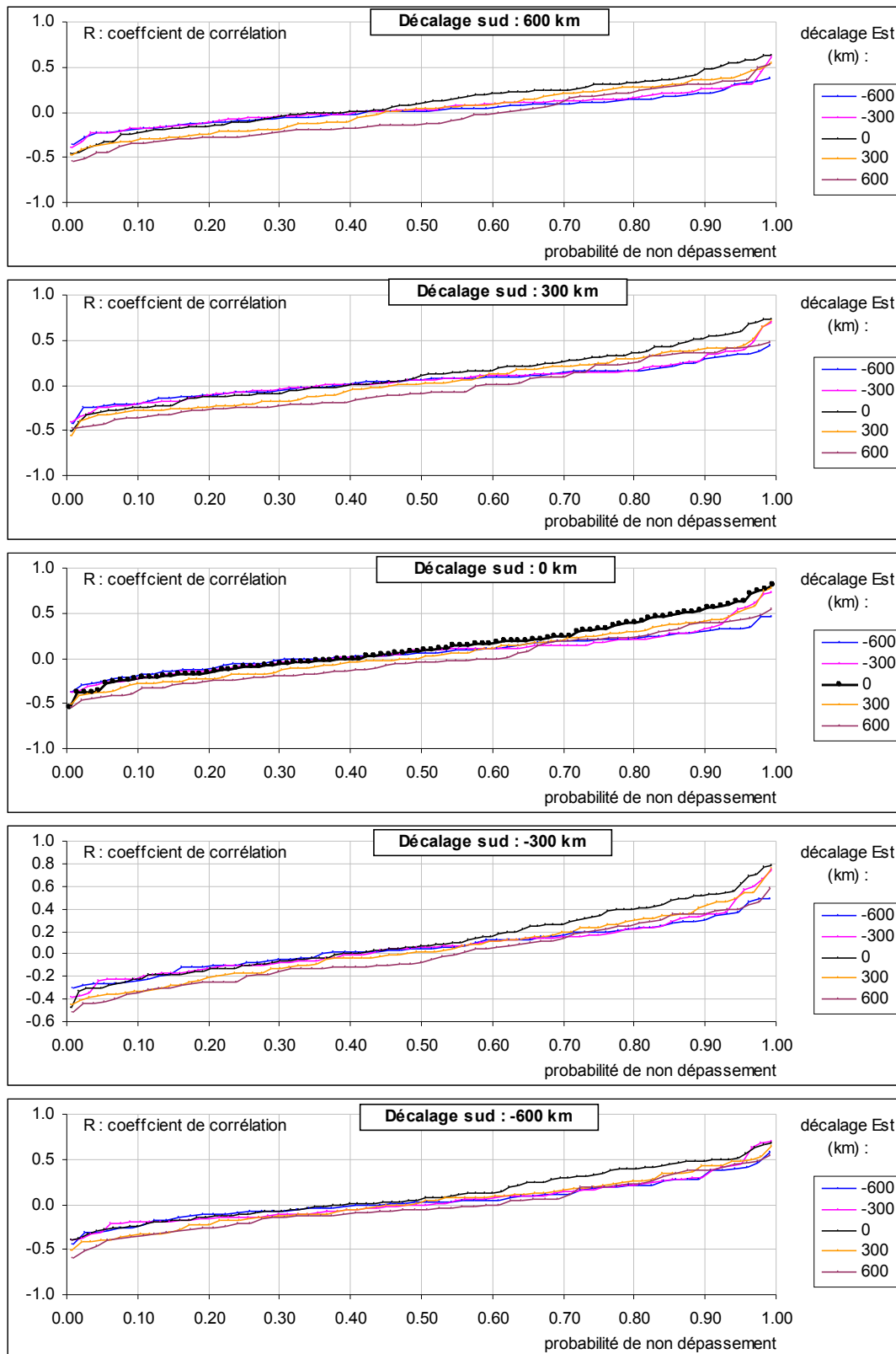


Figure 4 : fonctions de répartition du coefficient de corrélation R (période 1979-2006) entre les index de septembre produits début août par Arpege 4.6 sur une maille et par Arpege 3 sur les mailles voisines décalées entre -600 et + 600 km vers l'est ou le sud



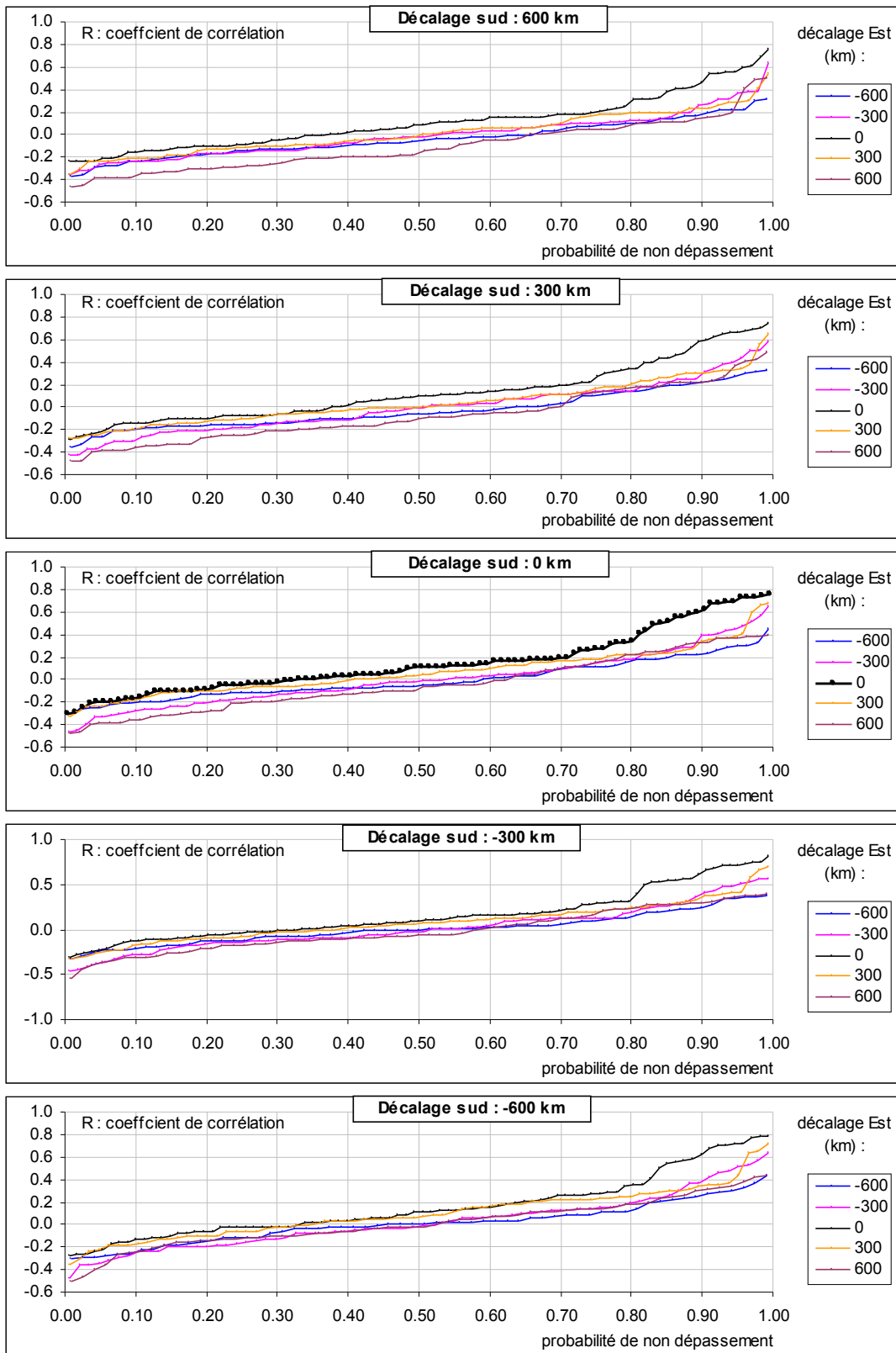


Figure 5 : fonctions de répartition du coefficient de corrélation R (période 1979-2006) entre les index d'octobre produits début août par Arpege 4.6 sur une maille et par Arpege 3 sur les mailles voisines décalées entre -600 et + 600 km vers l'est ou le sud

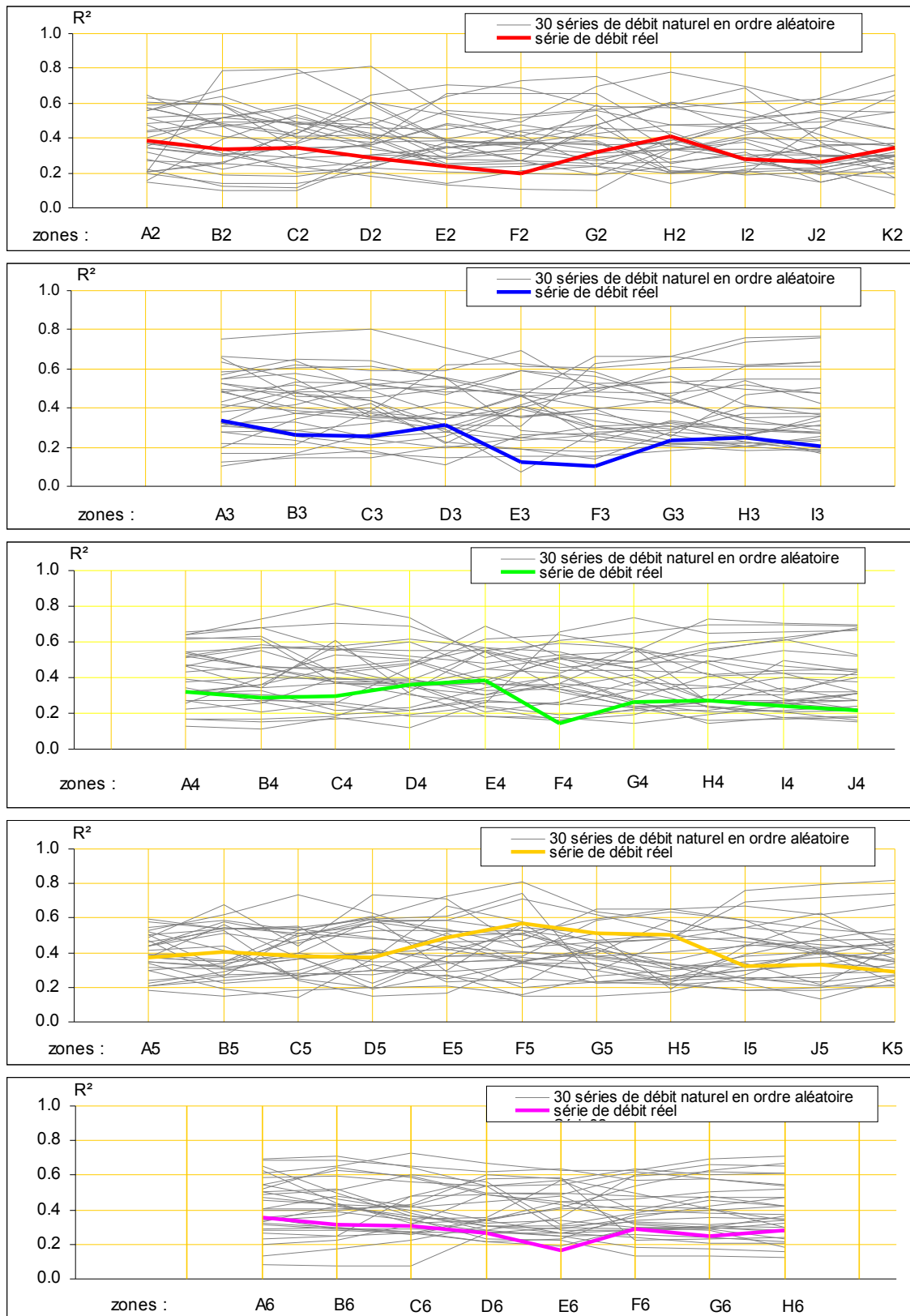


Figure 6 : coefficient de détermination  $R^2$  obtenu (période 1979-2000) entre les 8 premiers vecteurs propres  $V_1$  à  $V_8$  des index et le débit réel  $Q_0$  ou les débits aléatoires  $Q_1$  à  $Q_{30}$ , sur 49 zones testées

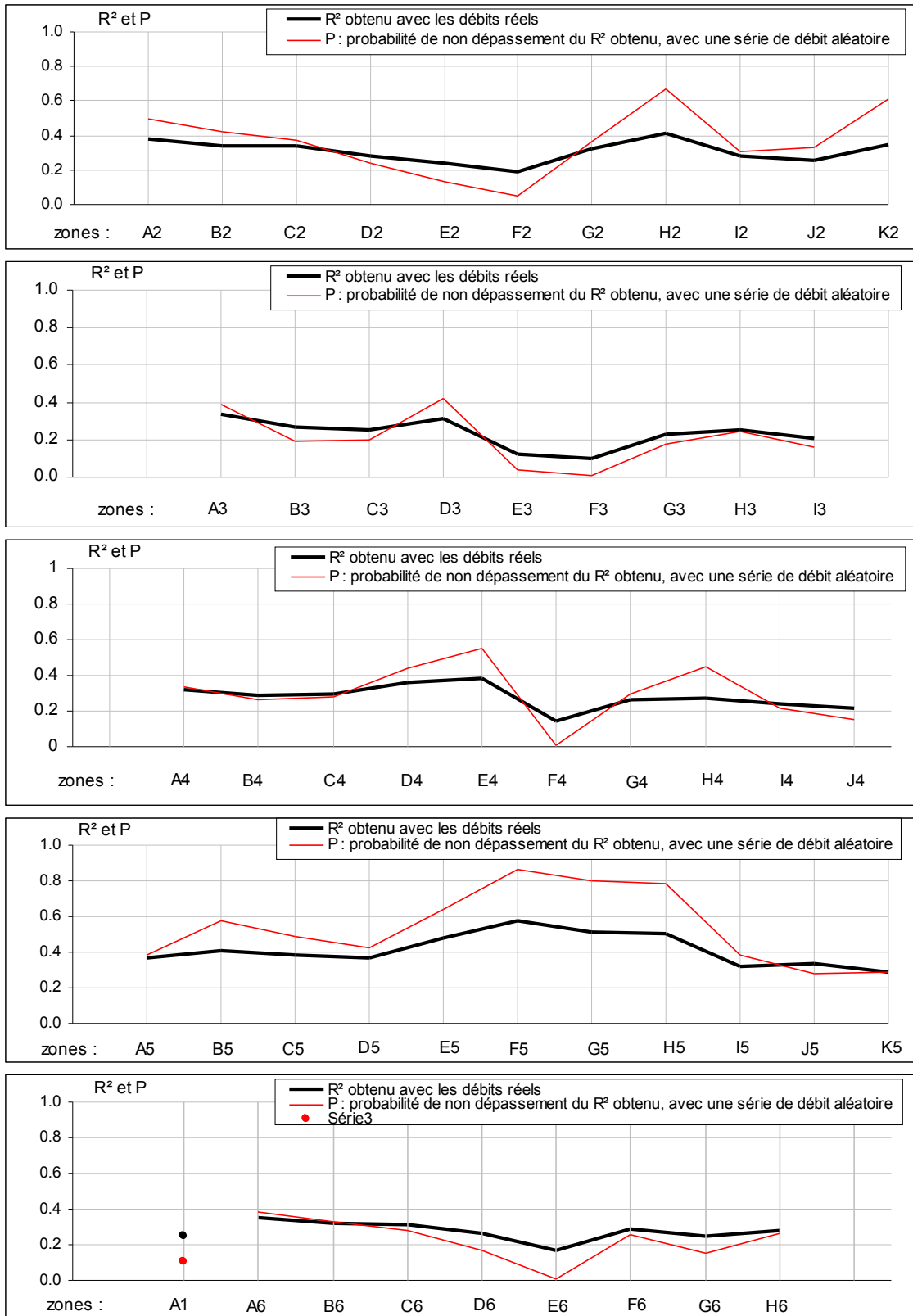


Figure 7 : coefficient de détermination  $R^2$  obtenu entre les 8 premiers vecteurs propres  $V_1$  à  $V_8$  des index et le débit réel  $Q_0$  et probabilité  $P$  pour qu'une valeur inférieure de  $R^2$  soit obtenue entre  $V_1$  à  $V_5$  et une série de débit aléatoire

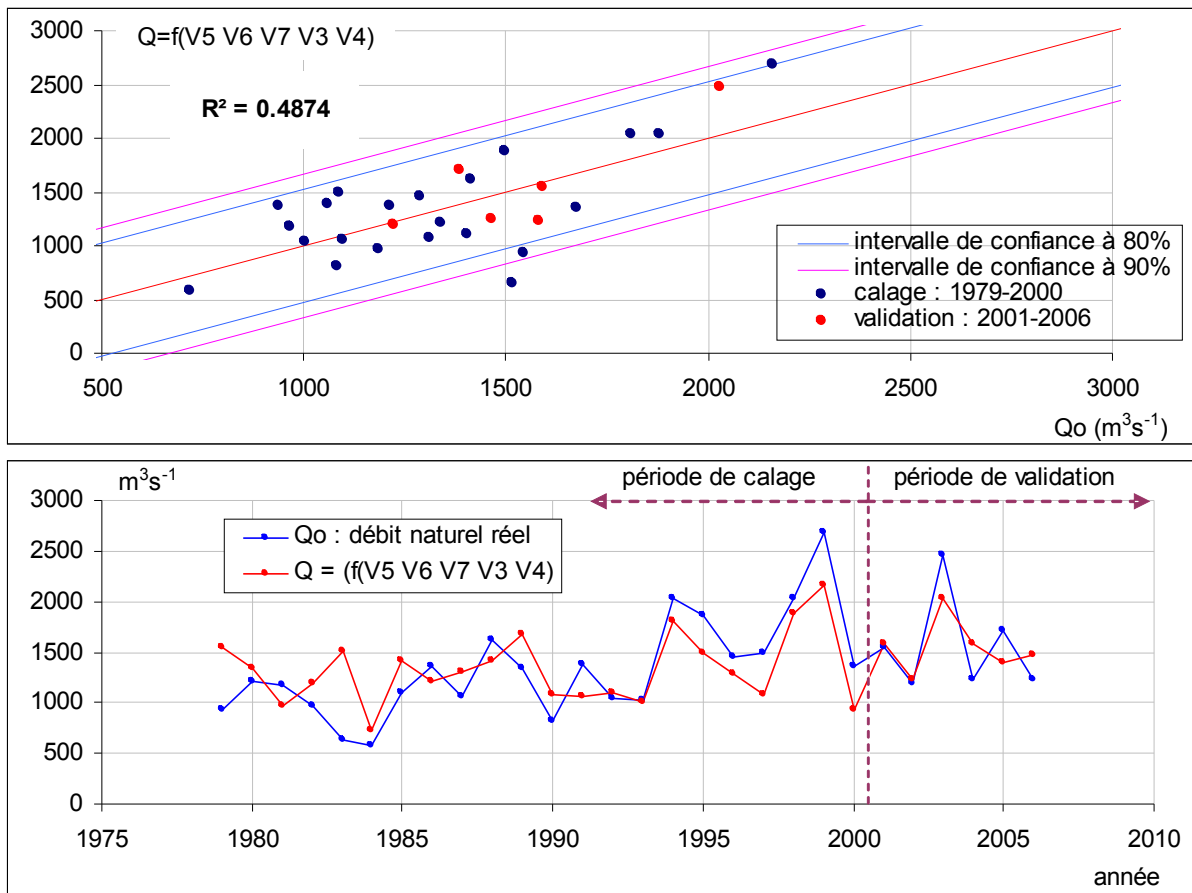


Figure 8 : Comparaison des valeurs observées ( $Q_o$ ) et modélisées ( $Q$ ) du débit de septembre octobre ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ). Résultats obtenus avec le modèle utilisant les vecteurs propres d'index V5, V6, V7, V3 et V4 sélectionnés par régression descendante sur la zone G5.

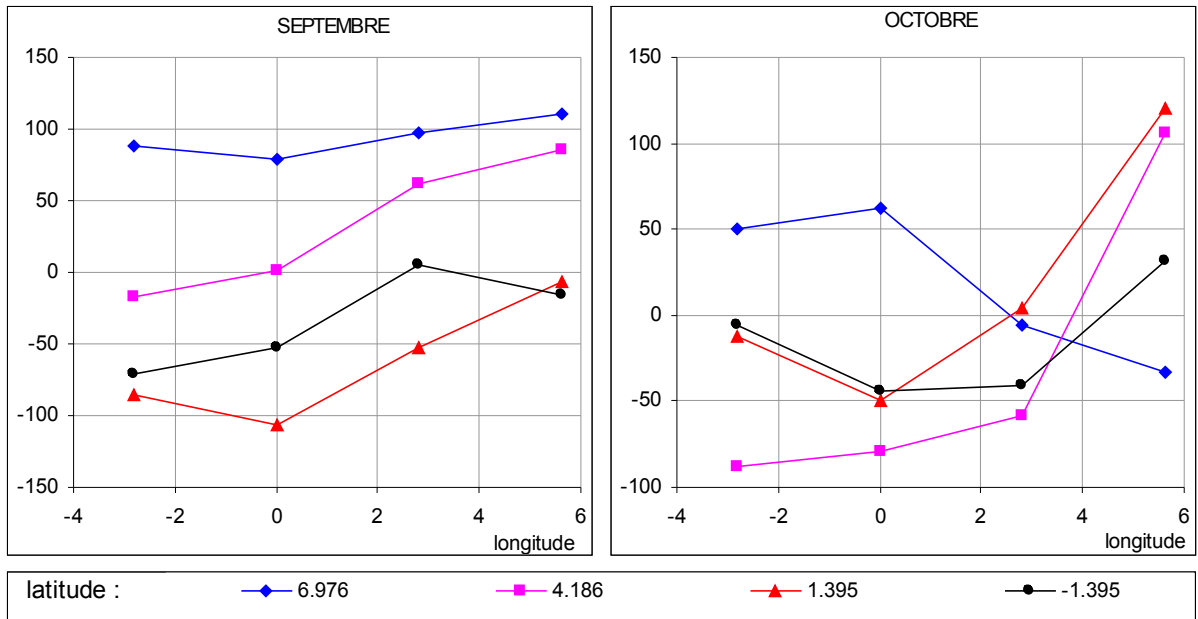


figure 9 : variation est ouest des coefficients d'index dans le modèle basé sur les vecteurs propres de rangs 5, 6, 7, 3 et 4 des index de la zone G5

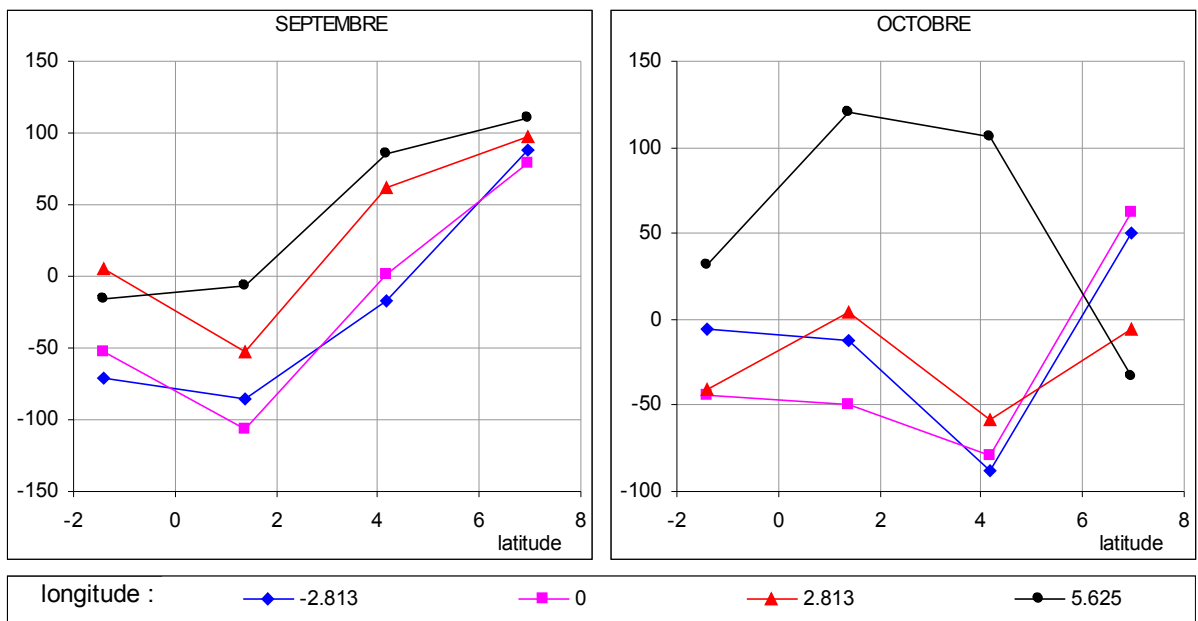


figure 10 : variation nord sud des coefficients d'index dans le modèle basé sur les vecteurs propres de rangs 5, 6, 7, 3 et 4 des index de la zone G5