

Prévision saisonnière du débit naturel de crue du fleuve Sénégal à partir des prévisions pluviométriques du modèle de circulation générale de l'atmosphère ARPEGE

Evaluation des prévisions effectuées en temps réel de 2005 à 2015

Collaboration IRD (UMR G-Eau, Montpellier), Météo France (CNRM, Toulouse), OMVS

JC Bader, UMR G-EAU, Montpellier, 09/12/2016

Résumé et conclusion

On rappelle d'abord l'origine du projet et l'intérêt pour l'OMVS d'une prévision saisonnière du débit naturel de crue du fleuve Sénégal, ainsi que le principe du modèle de prévision réalisé par l'IRD. Celui-ci consiste en une adaptation statistique des index pluviométriques produits plusieurs mois à l'avance par Météo France avec le modèle ARPEGE sur l'Afrique de l'ouest.

De 2005 à 2015, sept modèles utilisant les index de cinq versions successives d'ARPEGE ont pu être calés, validés et utilisés en temps réel pour prévoir, selon les cas, le débit de septembre-octobre dès début août ou celui d'août-septembre-octobre dès début juillet. L'objet de cette note est une évaluation a posteriori des prévisions réalisées en temps réel de 2005 à 2015, qui sont au nombre de 11 avec cinq modèles pour la fenêtre de prévision SO et de 3 avec deux modèles pour la fenêtre ASO.

On remarque que la zone des index les plus prédictifs pour le débit de crue du Sénégal varie selon la version d'ARPEGE utilisée et selon la fenêtre de prévision visée. Par rapport au bassin versant du Sénégal, cette zone se situe majoritairement dans un secteur compris entre l'est et le sud-est et à une distance de 1000 à 2000 km environ.

Bien que située 7 fois sur 11 dans l'intervalle de confiance à 90% du modèle utilisé, la prévision en temps réel du débit de septembre-octobre montre des erreurs globalement beaucoup plus fortes que l'erreur de calage de ce modèle, avec une tendance nette à sous-estimer la valeur réelle. La prévision effectuée en 2012, qui est située en dehors de l'intervalle à 99.9907 % du modèle utilisé et donc particulièrement mauvaise, pourrait être due à une utilisation du modèle en dehors de son domaine de calage. En effet, les observations hydrométriques montrent que la répartition des écoulements a été hors norme cette année là, avec une très forte contribution relative de la partie nord du bassin versant à l'écoulement du fleuve, qu'on n'avait jamais observée auparavant. Le coefficient NSE des prévisions en temps réel, qui s'élève à -0.15 sur la période globale 2005-2015, se serait élevé à 0.25 sans la prévision de 2012.

Seules trois prévisions en temps réel ont été réalisées pour le moment, de 2013 à 2015, pour le débit d'août-septembre-octobre. Les résultats obtenus, très compatibles en 2013 et 2014 avec la précision en calage du modèle utilisé, sont mauvais en 2015 avec le dernier modèle utilisé.

Conclusion : Les débits prévus en temps réel pour septembre-octobre ont une précision globalement faible mais acceptable de 2005 à 2011, puis fortement dégradée en 2012, 2013 et 2015. Pour août-septembre-octobre, la précision est correcte en 2013 et 2014, puis très faible

en 2015. Les prévisions globalement moins précises en temps réel qu'en calage montrent un certain manque de robustesse des modèles utilisés. Pour améliorer cette robustesse, il faudrait pouvoir allonger la période de référence des index d'Arpege reconstitués en mode prévision, qui est utilisée pour le calage et la validation de l'adaptation statistique (entre 22 et 29 années selon les différentes versions d'ARPEGE déjà utilisées). On pourrait également améliorer la procédure d'adaptation statistique des index, en doublant le processus de calage et de validation par inversion des échantillons utilisés pour ces deux opérations (Klemeš, 1986).

Origine et objectif de l'étude

L'IRD collabore depuis 2000 avec Météo France sur la prévision saisonnière des écoulements naturels du fleuve Sénégal en période de crue. Ce travail a été initié dans le cadre du POGR (Programme d'Optimisation de Gestion des Réservoirs) réalisé par l'IRD pour l'OMVS (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal), dans le but de fournir une aide à la gestion du barrage réservoir de Manantali implanté sur la principale branche mère du fleuve, le Bafing.

En particulier, on voudrait pouvoir connaître à l'avance le volume d'eau à lâcher du barrage pour soutenir la crue du fleuve Sénégal. Ce volume dépendant beaucoup du volume naturel de crue de septembre-octobre du fleuve à la station de Bakel, située à l'aval, c'est donc une prévision saisonnière du débit naturel de crue du fleuve à cette station qu'on souhaite réaliser.

Principe du modèle de prévision saisonnière de débit

La prévision du débit naturel du fleuve Sénégal à Bakel est basée sur une adaptation statistique (Bader et al, 2006) des prévisions pluviométriques saisonnières produites sur l'Afrique de l'Ouest par le modèle Arpege de Météo France. Les prévisions pluviométriques à longue échéance étant peu précises, y compris dans l'espace et dans le temps, celles qui permettent éventuellement de prévoir le débit du fleuve concernent une zone optimale pouvant être décalée par rapport au bassin versant. Cette zone prédictive optimale, qui diffère selon la version d'Arpege utilisée, est déterminée ainsi :

1. pour chaque zone testée, on relie sur une période de calage les débits naturels de crue réels du fleuve Sénégal avec les N premières composantes principales des prévisions de pluie calculées sur cette zone par Arpege ;
2. on sélectionne parmi les zones testées, celle où la relation établie figure parmi les meilleures en calage et donne de bons résultats sur une période de validation.

Prévisions saisonnières de débit en temps réel, de 2005 à 2014

Depuis l'accord de coopération signé en 2005 entre les deux organismes, Météo France fournit à l'OMVS les prévisions pluviométriques sur l'Afrique de l'Ouest pour les mois à venir, chaque année en début de période de crue. Ces prévisions sont utilisées pour calculer

une prévision saisonnière du débit naturel de crue, portée à la connaissance de la Commission Permanente des Eaux de l'OMVS qui fixe les objectifs de gestion du barrage de Manantali.

C'est l'IRD qui, dans la continuité du POGR et à titre informel, calcule ces prévisions de débit en temps réel et se charge en outre de refaire l'adaptation statistique évoquée plus haut, à chaque changement de version du modèle ARPEGE.

De 2005 à 2015, ce sont les prévisions pluviométriques produites sur différentes zones (fig. 1) par cinq versions successives d'ARPEGE qui ont été utilisées pour calculer les prévisions saisonnières de débit en temps réel :

- Débit moyen naturel de septembre-octobre prévu à partir des index pluviométriques de septembre et octobre calculés début août par :
 - ARPEGE 3 forcé sur la zone J2 ($R^2 = 0.6507$ en calage sur la période 1979-2000, validation sur la période 2001-2004) : années 2005 et 2006
 - ARPEGE 4.6 forcé sur la zone G5 ($R^2 = 0.4874$ en calage sur la période 1979-2000, validation sur la période 2001-2006) : année 2007
 - ARPEGE 4.5 couplé sur la zone H5 ($R^2 = 0.6272$ en calage sur la période 1979-2000, validation sur la période 2001-2007) : années 2008 à 2012
 - ARPEGE système 4 sur la zone H8a8 ($R^2 = 0.8293$ en calage sur la période 1991-2012 (excepté les années 1991, 1995, 1999, 2000, 2004, 2009 correspondant à une distribution régulière des valeurs réelles du débit, et utilisées en validation)) : années 2013 et 2014
 - ARPEGE système 5 sur la zone L8a8 ($R^2 = 0.5386$ en calage sur la période 1991-2014 (excepté les années 1992, 1999, 2001, 2002, 2003, 2007, 2008, 2011) correspondant à une distribution régulière des valeurs réelles du débit, et utilisées en validation)) : année 2015

- Débit moyen naturel de août-septembre-octobre prévu à partir des index pluviométriques d'août, septembre et octobre calculés début juillet par :
 - ARPEGE système 4 sur la zone E8b8 ($R^2 = 0.6765$ en calage sur la période 1991-2012 (exceptées les années 1991, 1995, 1999, 2002, 2006, 2010 utilisées en validation)) : années 2013 et 2014
 - ARPEGE système 5 sur la zone B8a8 ($R^2 = 0.6615$ en calage sur la période 1991-2014 (exceptées les années 1991, 1993, 1994, 1996, 1997, 1999, 2008, 2009 utilisées en validation)) : année 2015

Les tableaux 1 et 2 donnent les valeurs annuelles réelles et prévues du débit naturel de 1979 à 2015, respectivement pour les périodes de septembre-octobre et août-septembre-octobre.

Remarque : de 2005 à 2012, deux chroniques de valeurs légèrement différentes sont utilisées pour le débit naturel réel du Sénégal à Bakel. Le premier débit, Qr1, est calculé à partir du débit observé à Bakel et des débits observé et naturel à Manantali, alors que le second, Qr2, fait intervenir en plus le niveau observé dans le réservoir. Le calage et la validation des modèles exploitant les résultats des versions 3, 4.6 et 4.5 d'ARPEGE sont effectués sur le débit Qr1. Pour les modèles utilisant les résultats d'ARPEGE système 4 et système 5, ces opérations sont effectuées sur le débit Qr2.

Bilan

Position des zones prédictives

Les modèles utilisés en temps réel, après avoir été calés et sélectionnés indépendamment par la procédure décrite plus haut, utilisent les index pluviométriques produits sur des zones dont la position varie selon la version d'ARPEGE utilisée et la fenêtre de prévision. Par rapport au bassin versant du Sénégal à Bakel, la plupart de ces zones sont situées dans un secteur compris entre l'est et le sud-est, à une distance approximative de 1000 à 2000 km (fig. 1).

Débit de septembre-octobre prévu début août

Pour chacune des onze prévisions effectuées en temps réel, le tableau 3 indique à quel intervalle de confiance du modèle utilisé (calculé par une loi normale centrée à partir de l'erreur type de calage) correspond l'erreur commise. Le classement de ces intervalles de confiance donne pour chacun d'entre eux le nombre de prévisions qui en sont exclues au sens large (situées sur une des bornes de l'intervalle, ou en dehors). On constate que les probabilités d'observer ces nombres dans un échantillon de 11 prévisions, évaluées par la loi binomiale et toutes comprises entre 0.00024 et 0.01441 (tab. 4), sont très faibles. Ceci montre que globalement, les erreurs des 10 prévisions réalisées en temps réel sont anormalement fortes par rapport aux erreurs de calage des modèles.

Par ailleurs, on constate que l'erreur de prévision, évaluée par rapport au débit réel Q_{r2} , est négative 9 fois sur 11 (tab. 3, fig. 2 à 6). La prévision en temps réel sous-estime globalement le débit réel.

Le critère d'efficacité NSE des prévisions en temps réel (valant 1 pour un modèle parfait et 0 pour le modèle trivial de la valeur moyenne), évalué par rapport à l'écart type des débits réels de la période 1979-2014, présente une valeur acceptable sur toutes les périodes 2005-aaaa tant que l'année aaaa reste inférieure à 2012 (tab. 3). La prévision de 2012, exclue de l'intervalle de confiance à 99.9907 % du modèle utilisé, et dans une moindre mesure celles de 2013 (exclue de l'intervalle à 99.7898%) et de 2015 (exclue de l'intervalle à 95.2890%), font malheureusement chuter le critère NSE de façon dramatique. Celui-ci, qui s'élève finalement à -0.15 sur la période globale 2005-2015, se serait élevé à 0.25 sans la prévision de 2012.

L'analyse des débits naturels observés à plusieurs stations situées sur le haut bassin du fleuve Sénégal montre que l'année 2012 se distingue nettement des autres pour ce qui concerne la répartition spatiale des apports en eau dans le réseau hydrographique, et donc celle des pluies sur le bassin. Ceci apparaît de façon évidente quand on considère le débit Q_{int} des apports intermédiaires naturels entre les stations de Bafing Makana, Gourbassy, Oualia et Bakel (fig. 7). Pour tenir compte simplement des délais de propagation, ce débit peut être calculé ainsi au jour j à partir du débit naturel Q_{r2} du Sénégal à Bakel et des débits naturels observés Q_b du Bafing à Bafing Makana, Q_g de la Falémé à Gourbassy et Q_o du Bakoye à Oualia :

$$Q_{int}(j) = Q_{r2}(j) - Q_b(j-4) - Q_o(j-3) - Q_g(j-2)$$

L'année 2012 se distingue par un débit intermédiaire Q_{int} beaucoup plus élevé que les autres sur la période septembre-octobre (fig. 8), à la fois en valeur absolue (1137 m³/s, valeur jamais atteinte depuis 1965, au lieu de 397 en moyenne sur la période 1979-2015) et par rapport au débit naturel Q_{r2} à Bakel (41%, valeur la plus forte observée depuis le début des observations en 1961, au lieu de 24% en moyenne sur la période 1979-2015). La partie nord du bassin versant du Sénégal à Bakel a donc contribué beaucoup plus que d'habitude à l'écoulement du fleuve en 2012, d'une façon jamais observée ni pendant la période de calage (1979-2000) ni

pendant la période de validation (2001-2006) du modèle de prévision. Il est donc possible que ce modèle ait été utilisé en 2012 en dehors de son domaine de calage statistique, ce qui pourrait alors être une cause de sa mauvaise performance.

Débit de août-septembre-octobre prévu début juillet

Le tableau 5 et les figures 9 et 10 montrent que les erreurs des prévisions effectuées en temps réel en 2013 et 2014 sont très compatibles avec l'erreur type de calage du modèle utilisé, qui s'élève à 346 m³/s. La loi binomiale indique en effet que pour deux prévisions, la probabilité pour qu'une (resp. deux) soit exclue de l'intervalle de confiance à 84.4216% du modèle (resp. 43.5035%) s'élève à 0.29 (resp. 0.32). Par ailleurs, le coefficient d'efficacité NSE, évalué par rapport à l'écart type des débits réels de la période 1991-2015, s'élève à 0.53 sur la période 2013-2014. Malheureusement, la prévision de 2015 est très mauvaise puisqu'elle sousstime le débit naturel réel de 47% est se trouve exclue de l'intervalle de confiance à 99.8537% du modèle utilisé.

Référence :

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. Hydrol. Sci. J. 51(3) : 406-417.

Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. Hydrol. Sci. J. 31(1): 13-24.

année	prévu à partir des index produits par Arpege					valeur réelle	
	Arpege 3 forcé	Arpege 4.6 forcé	Arpege 4.5 couplé	Arpege système 4	Arpege système 5	Qr1	Qr2
	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
1979	698	1547	1046			929	924
1980	901	1338	1363			1214	1199
1981	866	966	1356			1179	1177
1982	1533	1188	875			962	954
1983	1015	1515	511			641	628
1984	911	718	724			576	560
1985	1022	1407	952			1100	1097
1986	1749	1212	916			1363	1360
1987	1028	1310	1168			1070	947
1988	1573	1415	1457			1612	1897
1989	1228	1677	1780			1347	1527
1990	747	1085	1412			811	814
1991	1589	1059	1628	1531	1198	1383	1513
1992	1247	1095	1150	1020	1597	1048	1164
1993	1387	1002	1367	1229	1053	1029	1136
1994	1787	1810	1651	2344	2101	2034	2415
1995	1400	1498	1862	1640	2303	1869	1859
1996	1462	1290	1427	1578	1513	1457	1421
1997	1665	1090	1233	1235	1315	1499	1459
1998	1925	1882	1520	2113	2113	2027	2020
1999	2166	2159	2159	2485	2407	2682	2679
2000	1299	937	1642	1464	1454	1367	1333
2001	2015	1592	1522	1738	1694	1545	1555
2002	1428	1224	1157	1260	1452	1191	1148
2003	2018	2030	1518	2379	2068	2468	2408
2004	1564	1583	1167	1072	1753	1228	1155
2005	1421	1388	1076	1472	1809	1708	1656
2006	1101	1468	1760	1375	1643	1239	1160
2007		1748	2443	1652	2128	2180	2153
2008			2402	2154	2022	1863	1808
2009			1711	1953	2110	2361	2312
2010			1996	2236	2219	2529	2434
2011			1060	1717	2268	1499	1435
2012			1420	2645	2140		2775
2013				1564	1914		2407
2014				1919	2078		1663
2015					1668		2474

Tableau 1 : débit moyen de septembre-octobre du fleuve Sénégal à Bakel en régime naturel. Valeurs prévues début août à partir des résultats d'ARPEGE (sans surlignage : calage ; jaune : validation ; grisé : temps réel), et valeurs réelles évaluées à partir des données hydrométriques observées à Bakel et Manantali

année	prévu à partir des index produits par Arpege		valeur réelle Qr2
	Arpege Système 4	Arpege Système 5	
	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
1991	2270	1434	1601
1992	1209	1763	1059
1993	1118	1840	1108
1994	2142	2400	2368
1995	1913	1913	1984
1996	1564	1739	1352
1997	1751	1174	1451
1998	1763	1936	1984
1999	2523	2137	2727
2000	1483	1659	1418
2001	1419	1572	1513
2002	1709	1060	1360
2003	1969	2817	2643
2004	2023	1454	1236
2005	1674	1667	1698
2006	1751	1412	1138
2007	2218	2342	2190
2008	1835	2012	1820
2009	2080	2151	2126
2010	1481	2095	2140
2011	1323	1631	1616
2012	2893	2399	2884
2013	1966	1823	2457
2014	1744	1323	1545
2015		1337	2520

Tableau 2 : débit moyen d'août-septembre-octobre du fleuve Sénégal à Bakel en régime naturel. Valeurs prévues début juillet à partir des résultats d'ARPEGE (sans surlignage : calage ; jaune : validation ; grisé : temps réel), et valeurs réelles évaluées à partir des données hydrométriques observées à Bakel et Manantali

Arpege version	année	débit prévu (m ³ /s)	intervalle de confiance (%)	erreur % Qr2		
				absolue (m ³ /s)	relative	NSE depuis 2005
3 forcé	2005	1421	60.7884	-235	-0.14	0.85
	2006	1101	31.9845	-60	-0.05	0.92
4.6 forcé	2007	1748	71.3226	-405	-0.19	0.79
4.5 couplé	2008	2402	87.9739	593	0.33	0.60
	2009	1711	93.9046	-601	-0.26	0.48
	2010	1996	87.5494	-437	-0.18	0.48
	2011	1060	79.3868	-374	-0.26	0.50
système 4	2012	1420	99.9907	-1355	-0.49	-0.08
	2013	1564	99.7898	-843	-0.35	-0.18
système 5	2014	1919	65.0758	257	0.15	-0.08
	2015	1668	95.2890	-806	-0.33	-0.15

Tableau 3 : évaluation des prévisions réalisées début août en temps réel pour le débit naturel de septembre-octobre, de 2005 à 2015

intervalle de confiance (%)	nombre de prévisions exclues de l'intervalle de confiance	probabilité
99.9907	1	0.00103
99.7898	2	0.00024
95.2890	3	0.01297
93.9046	4	0.00322
87.9739	5	0.00620
87.5494	6	0.00098
79.3868	7	0.00237
71.3226	8	0.00314
65.0758	9	0.00200
60.7884	10	0.00061
31.9845	11	0.01441

Tableau 4 : nombre de prévisions constatées en dehors des différents intervalles de confiance des modèles, et probabilité d'observer ces nombres dans un effectif de 11.

Arpege version	année	débit prévu (m ³ /s)	intervalle de confiance (%)	erreur % Qr2		
				absolue (m ³ /s)	relative	NSE depuis 2013
système 4	2013	1966	84.4216	-491	-0.20	0.19
	2014	1744	43.5035	199	0.13	0.53
système 5	2015	1337	99.8537	-1184	-0.47	-0.89

Tableau 5 : évaluation des prévisions réalisées début juillet en temps réel pour le débit naturel d'août-septembre-octobre

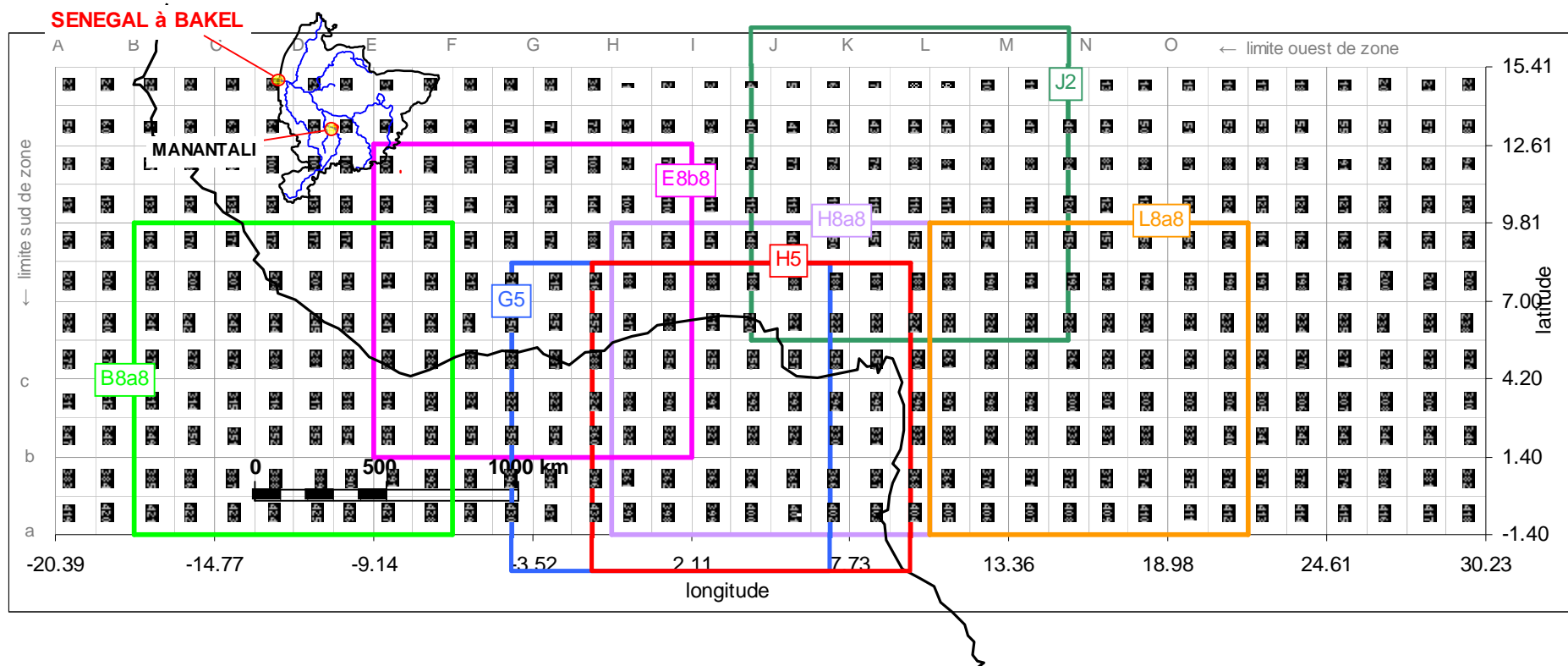


Figure 1 : carte d'Afrique de l'ouest situant le bassin versant du fleuve Sénégal à Bakel, ainsi que les différentes zones d'index pluviométriques utilisées (prévision pour septembre-octobre : J2 pour ARPEGE 3 forcé en 2005 et 2006 ; G5 pour ARPEGE 4.6 forcé en 2007 ; H5 pour ARPEGE 4.5 couplé de 2008 à 2012 ; H8a8 pour ARPEGE système 4 en 2013 et 2014 ; L8a8 pour ARPEGE système 5 en 2015 ; prévision pour août-septembre-octobre : E8b8 pour ARPEGE système 4 en 2013 et 2014 ; B8a8 pour ARPEGE système 5 en 2015)

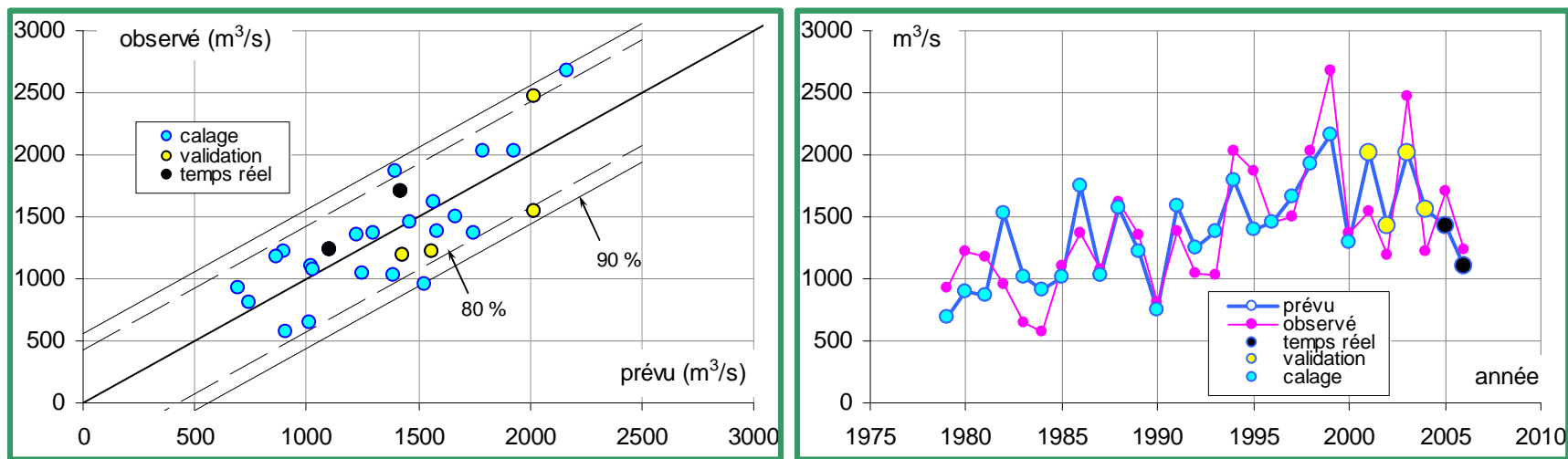


Figure 2 : prévision début août du débit naturel moyen de **septembre-octobre** basée sur les index produits par Arpege 3 forcé (zone J2)

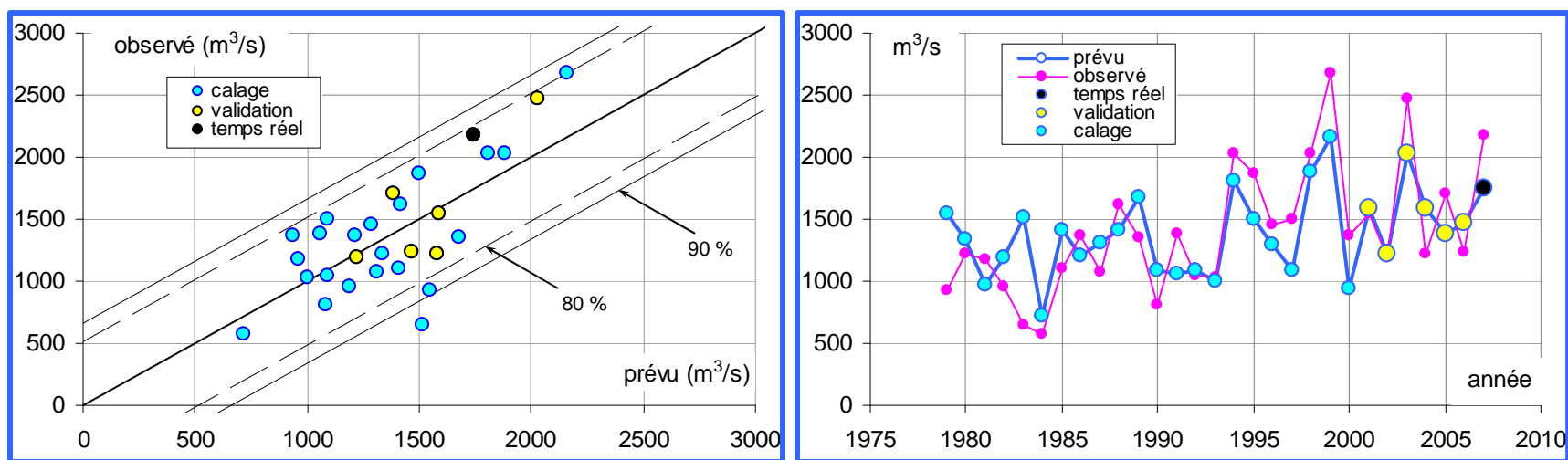


Figure 3 : prévision début août du débit naturel moyen de **septembre-octobre** basée sur les index produits par Arpege 4.6 forcé (zone G5)

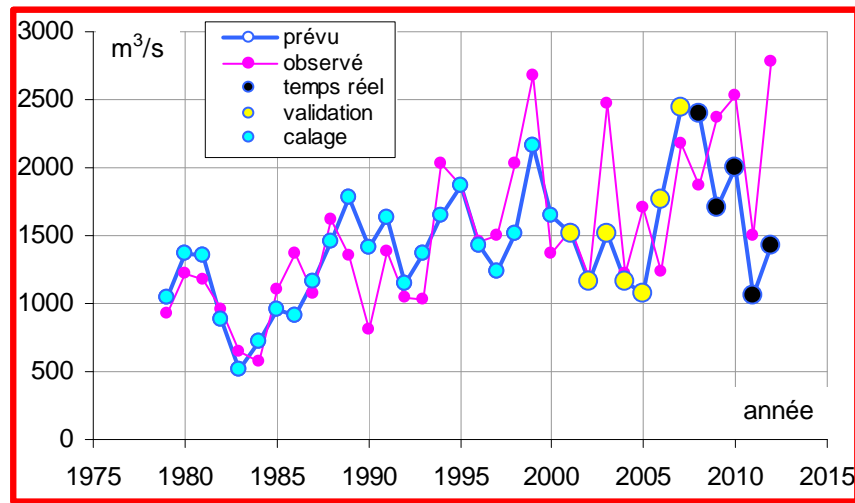
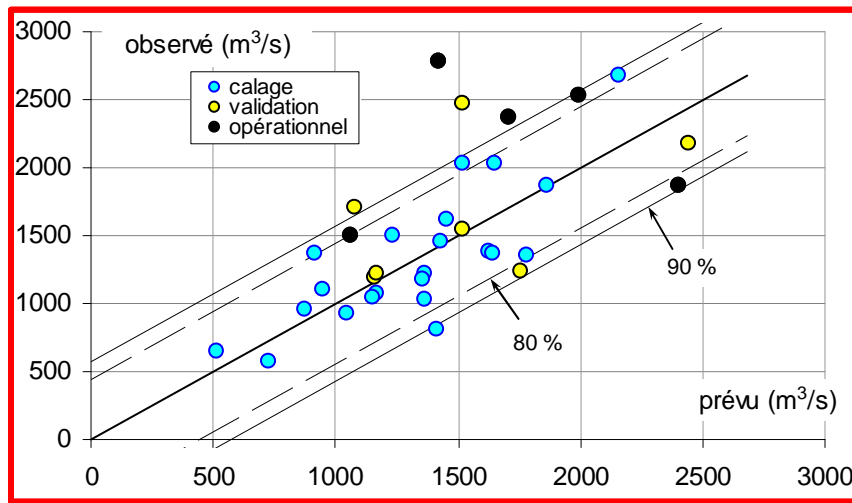


Figure 4 : prévision début août du débit naturel moyen de **septembre-octobre** basée sur les index produits par Arpege 4.5 couplé (zone H5)

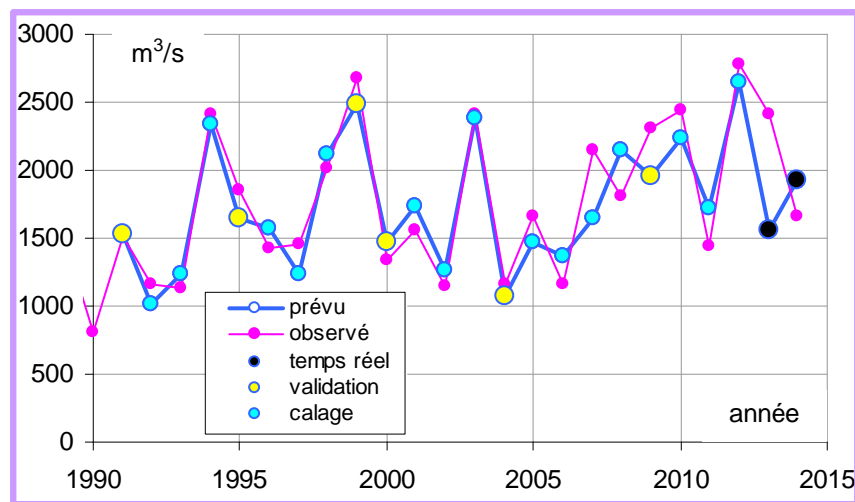
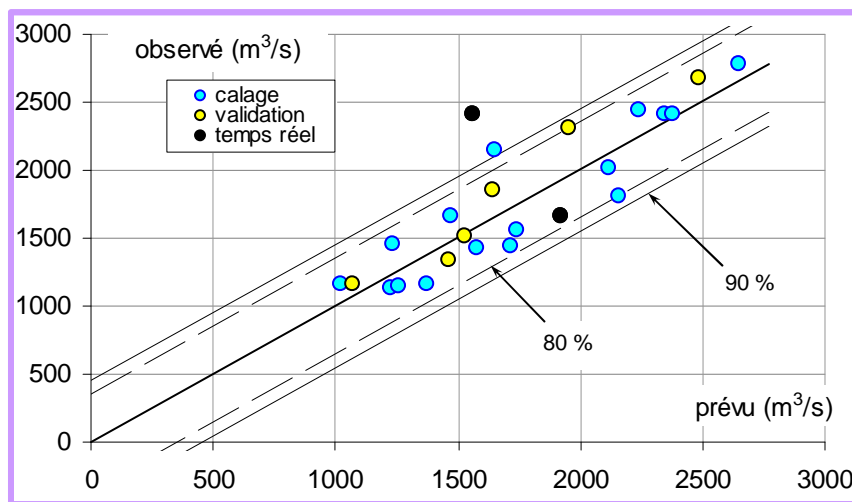


Figure 5 : prévision début août du débit naturel moyen de **septembre-octobre** basée sur les index produits par Arpege système 4 (zone H8a8)

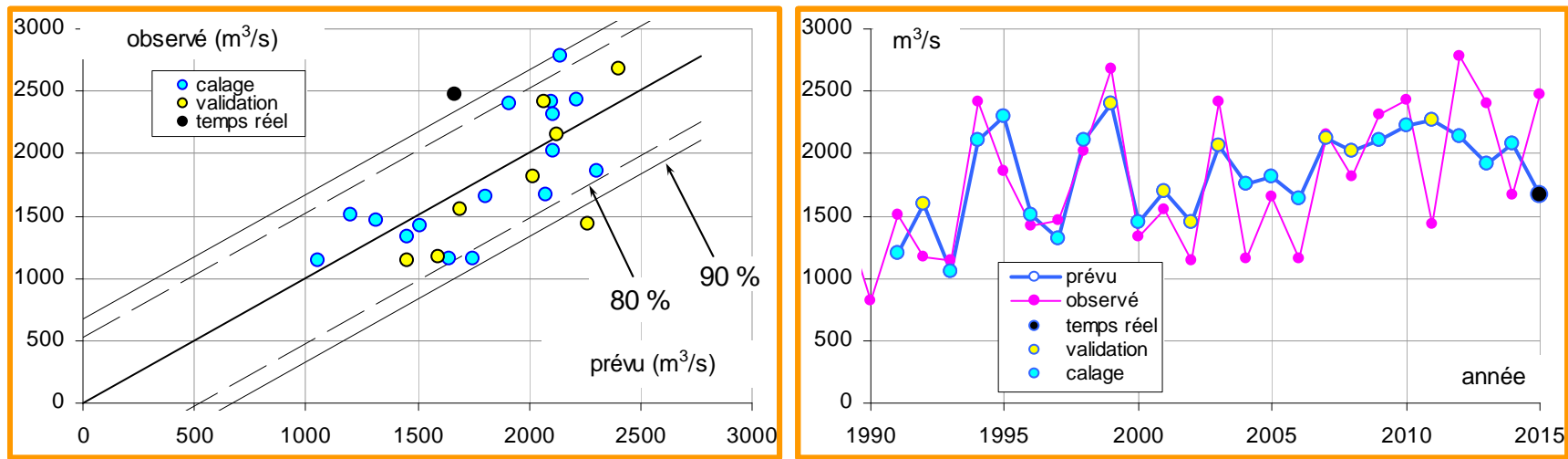


Figure 6 : prévision début août du débit naturel moyen de **septembre-octobre** basée sur les index produits par Arpege système 5 (zone L8a8)

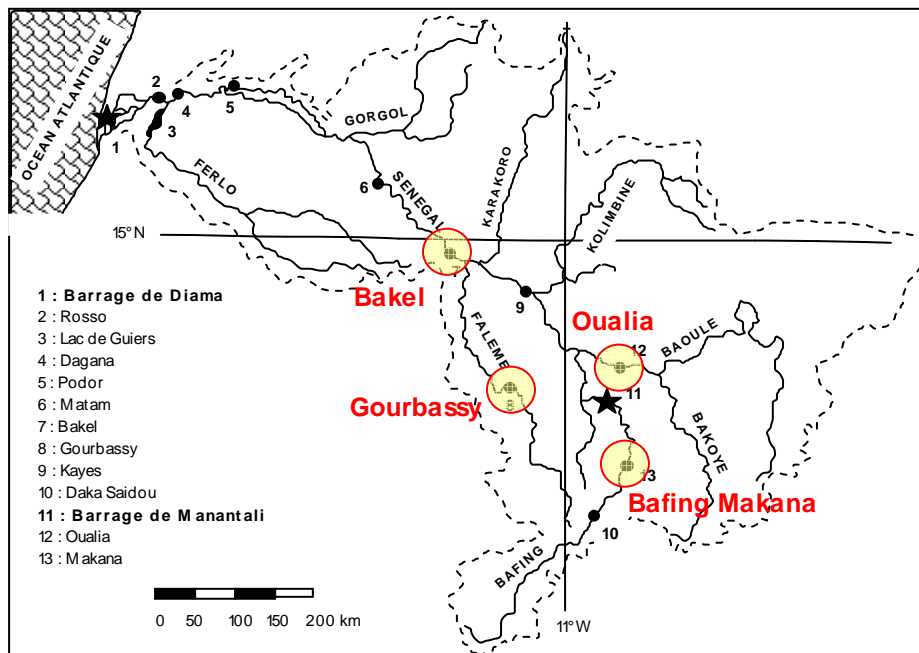


Figure 7 : carte du bassin versant et du réseau hydrographique du fleuve Sénégal

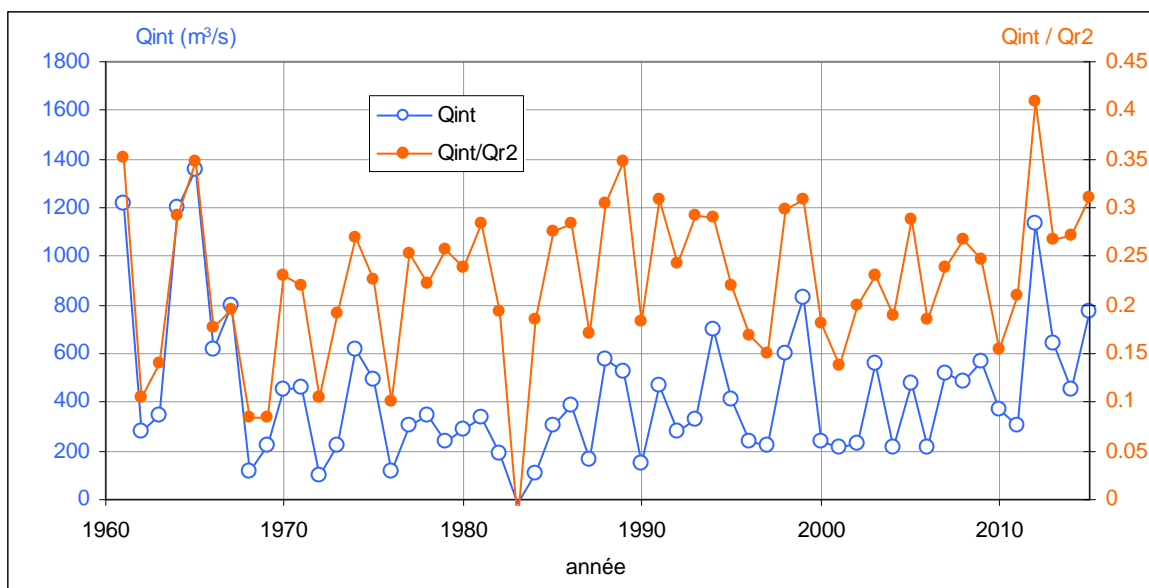


Figure 8 : valeurs moyennes sur la période septembre-octobre du débit Qint des apports intermédiaires dans le réseau hydrographique entre les stations de Bafing Makana sur le Bafing, Gourbassy sur la Falémé, Oualia sur le Bakoyé et Bakel sur le Sénégal

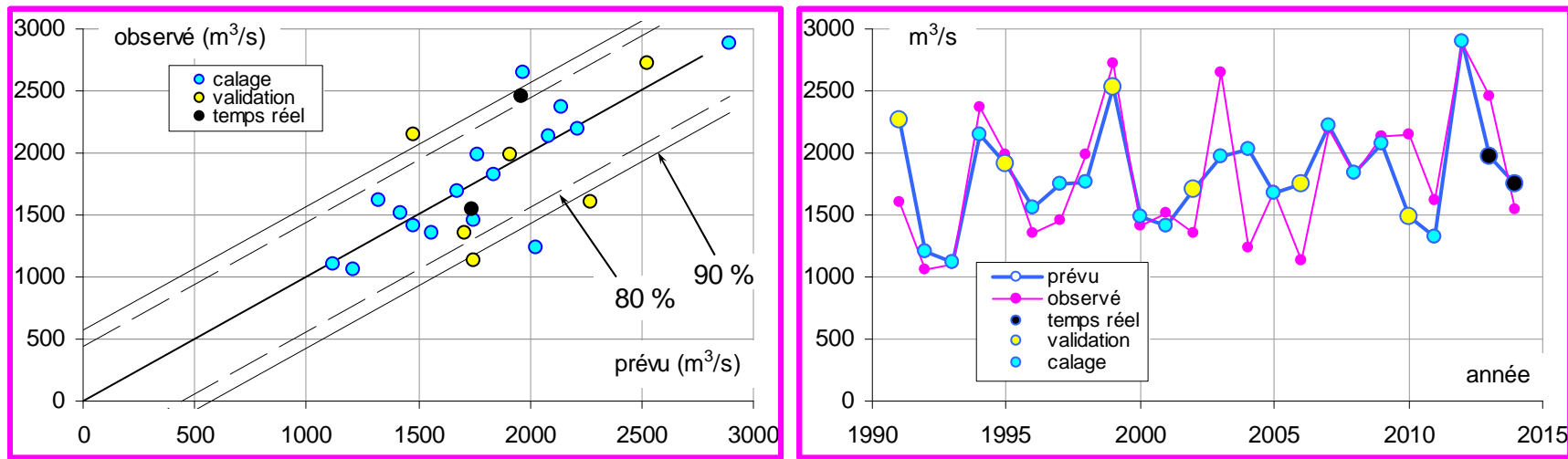


Figure 9 : prévision début juillet du débit naturel moyen d'**août-septembre-octobre** basée sur index d'Arpege système 4 (zone E8b8)

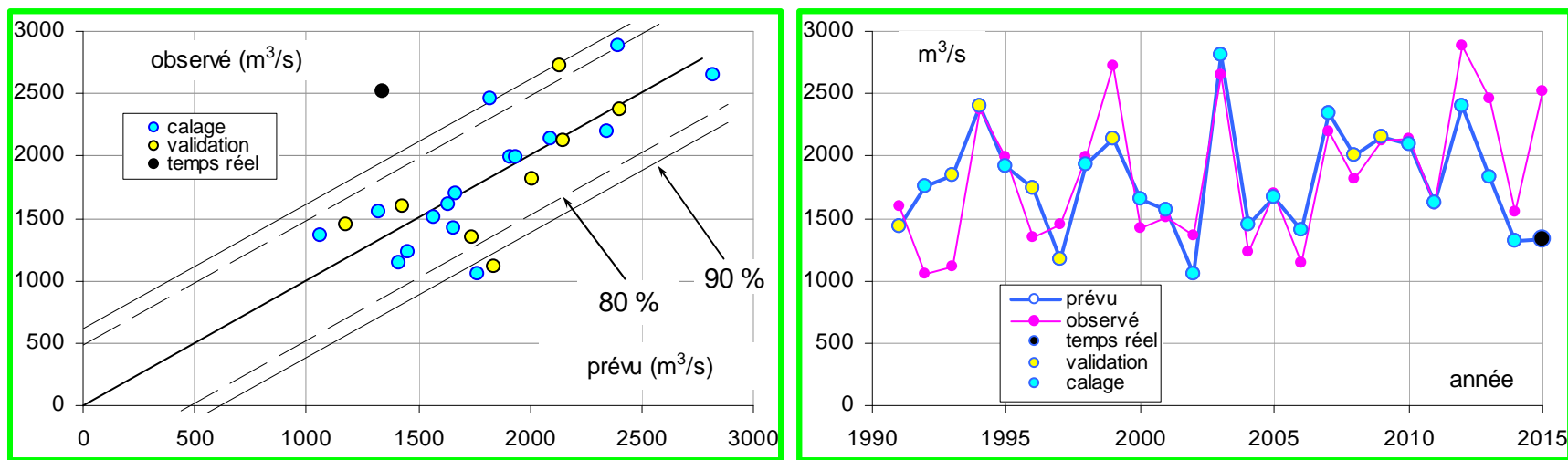


Figure 10 : prévision début juillet du débit naturel moyen d'**août-septembre-octobre** basée sur index d'Arpege système 5 (zone B8a8)