

**RAPPORT SUR LES CRUES DU RHÔNE
ET SES AFFLUENTS**

**Daniel DUBAND (SHF)
Philippe BOIS (ENSHMG)**

Rapport sur les crues du RHONE et ses affluents du 1 au 5 décembre 2003
Daniel DUBAND (SHF) Philippe BOIS (ENSHMG)
(4 projets entre le 24-05 et le 15-09-2004, destinés à l'IGE-MEDD)

Analyse préliminaire s'appuyant sur les jaugeages effectués à Beaucaire par la CNR de 1992 à 2003 :

- 1-Ajustements de courbes de tarage,
- 2-Estimation des débits de la crue du 1 au 5 décembre 2003 et de débits de crues antérieures depuis 1993,
- Annexe 1 :le Rhône à Pt de Viviers,remarques sur les débits de pointe de crues et sur les volumes ,
- Annexe 2 :analyse hydraulique rapide des jaugeages du Rhone à Beaucaire

1-Ajustement de courbes de tarage aux jaugeages.

37 jaugeages ont été réalisés par la CNR de 1992 à 2003 (données communiquées à l'IGE/MEDD le 6-05-04) ,pour un niveau supérieur à $N=3m$:

- 23 jaugeages au moulinet, au PK .272.250,
- 8 jaugeages à l'ADCP (Acoustical Doppler Current Profiler),
- 3 jaugeages au moulinet effectués au PK 269.600 en octobre 1993 ,et 3 en janvier 1994 qui n'ont pas été pris en compte dans l'ajustement numérique des courbes de tarage.(4 débits jaugés les 9 et 10/10/1993 ont été corrigés de déversements estimés de 600 à 750 m³/s) .

Deux ajustements de courbe de tarage ont été calculés par la méthode des moindres carrés (MMC) aux $26+8=34$ jaugeages, d'après le niveau $N(N_{gf})$ et le débit Q_0 observé(mesuré).

1.1) ajustement par une relation parabolique :

$Q_1=390N+51,9N^2+214$ avec un coefficient de corrélation $r_1=0,99408165$

l'écart type s_1 des écarts Q_1-Q_0 est égal à **314m³/s**,

soit un intervalle d'incertitude à 90% de $1,645*s_1=\pm 517m^3/s$, constant quelque soit N .

1.2) ajustement par une relation logarithmique :

$\ln Q_2=1,3819\ln N+5,944945$ avec un coefficient de corrélation $r_2 =0,99612467$,

l'écart type s_2 des écarts $\ln Q_2-\ln Q_0$ est égal à **0,0455**,

soit un intervalle d'incertitude à 90% de $1,645*s_2=\pm 0,07485$; en valeurs naturelles :

$Q_2=382N^{1.3819}$, $Q_{5\%}=354N^{1.3819}$, $Q_{95\%}=411N^{1.3819}$

Dans ce cas l'intervalle d'incertitude à 90% croit avec N , donc avec les débits et il est dissymétrique, ce qui paraît plus logique relativement aux mesures.

Pour ce second ajustement, lorsque l'on compare les valeurs naturelles Q_2 et Q_0 , leur coefficient de corrélation $=0,99327$.

Nota :il serait plus judicieux de considérer le rayon hydraulique pour être plus conforme au schéma de Manning Strickler,mais ici la cote à l'échelle et la profondeur paraissent voisines.

1.3) Commentaires.

1.3.1) L'ajustement de la relation Q_1 par MMC donne un poids plus important aux forts débits qui interviennent dans le coefficient du terme N^2 ; alors que l'ajustement de la relation Q_2 par MMC a tendance à pondérer les débits importants lorsque l'on applique la transformation logarithmique aux données, c'est cette courbe de tarage Q_2 que nous privilégions.

1.3.2) Les jaugeages réalisés par ADCP n'ont pas fait l'objet de calcul d'incertitudes sur les mesures de débits particulièrement en crues jusqu'à présent, autant par la société commercialisant les capteurs et logiciels que par les organismes acquéreurs et utilisateurs.

Pendant l'épisode de crue du 3 et 4 décembre 2003, la CNR a effectué 7 jaugeages par Adcp dont 3 avec GPS, ainsi que 2 jaugeages au moulinet, à Beaucaire restitution PK 272.250, qui sont riches d'informations.

On notera dans le tableau suivant, pour les 3 et 4 / 12 /03, les écarts entre les débits observés ou jaugés Q_0 et les débits déduits des courbes de tarage Q_2 (ajustées aux 34 jaugeages) et Q_{Cnr} (établie en 1994, tableaux 2 et 3).

On remarque pour les 5 jaugeages ($N > 10,8$) dont la moyenne des niveaux est 10,91 (écart-type 0,09) que :

($Q_2 - Q_0$) a pour valeur moyenne -193 m³/s et écart-type 353 m³/s (min -605, max +350 m³/s)

($Q_{Cnr} - Q_0$) a pour valeur moyenne +1446 m³/s et écart-type 430 m³/s (min 937, max 2116)

pour un débit moyen $Q_{Cnr} = 12020$ m³/s, et moyen $Q_0 = 10574$ m³/s, et moyen $Q_2 = 10381$ m³/s.

Jaugeage	date	heure	niveau	Q_0	$Q_2 - Q_0$	$Q_{Cnr} - Q_0$
Adcp	3-12-03	9h24	10,77	10881	-689	819
Adcp	3-12-03	10h14	10,82 *	10863	-605	937
Moulinet	3-12-03	11h35	11,03 *	10184	+350	2116
Adcp	4-12-03	11h22	10,99 *	10810	-329	1390
Adcp	4-12-03	12h23	10,88 *	10614	-278	1286
Adcp+GPS	4-12-03	12h32	10,85 *	10401	-104	1499
Adcp+GPS	4-12-03	13h50	10,65	9874	162	1528
Adcp+GPS	4-12-03	16h44	10,12	8929	+423	1271
Moulinet	4-12-03	16h55	9,85	8394	+615	1286

(le niveau maxi. de crue a atteint $N = 11,30$ le 4-12-03 à 3h)

On observe que les écarts ($Q_{Cnr} - Q_0$) les moins importants concernent les 2 premiers jaugeages Adcp en montée de crue peut être imputables aux déplacements en fond de lit du fleuve.

On observe également, en descente de crue, que les écarts ($Q_{Cnr} - Q_0$) sont un peu plus élevés lorsque les mesures Adcp sont effectuées avec GPS. Mais pour $N = 11,03$ le jaugeage au moulinet de 11h35 le 3-12-03 présente le plus grand écart $Q_{Cnr} - Q_0 = 2116$ m³/s.

L'ajustement de la forme analytique Q_1 présente des écarts $Q_1 - Q_0$ proches de $Q_2 - Q_0$, et aussi importants pour les 3 jaugeages du 8/01/1994 ainsi que pour les 4 jaugeages corrigés des 9 et 10 octobre 1993. (cf. tableaux 1 et 4)

1.3.3) Les jaugeages au moulinet de janvier 1994 effectués au PK 269.600 n'ont pas été pris en compte dans les ajustements de Q_1 et Q_2 . On note que pour les 3 jaugeages de la crue d'octobre 1993 (10 et 14) l'écart moyen de $Q_2 - Q_0$ est de -150 m³/s et celui de $Q_1 - Q_0$ est de -215 m³/s. Il est intéressant de comparer les jaugeages moulinet du 10-10-93 au PK 269.600 $Q_0 = 9233$ m³/s pour $N = 9,84$ au PK 272.250 $Q_0 = 9578$ m³/s pour $N = 9,9$ (avec $Q_2 = 9000$ m³/s dans les 2 cas).

RHONE à Beaucaire Restitution

Comparaison 37 jaugeages/C.tarQ2(26M+8A)

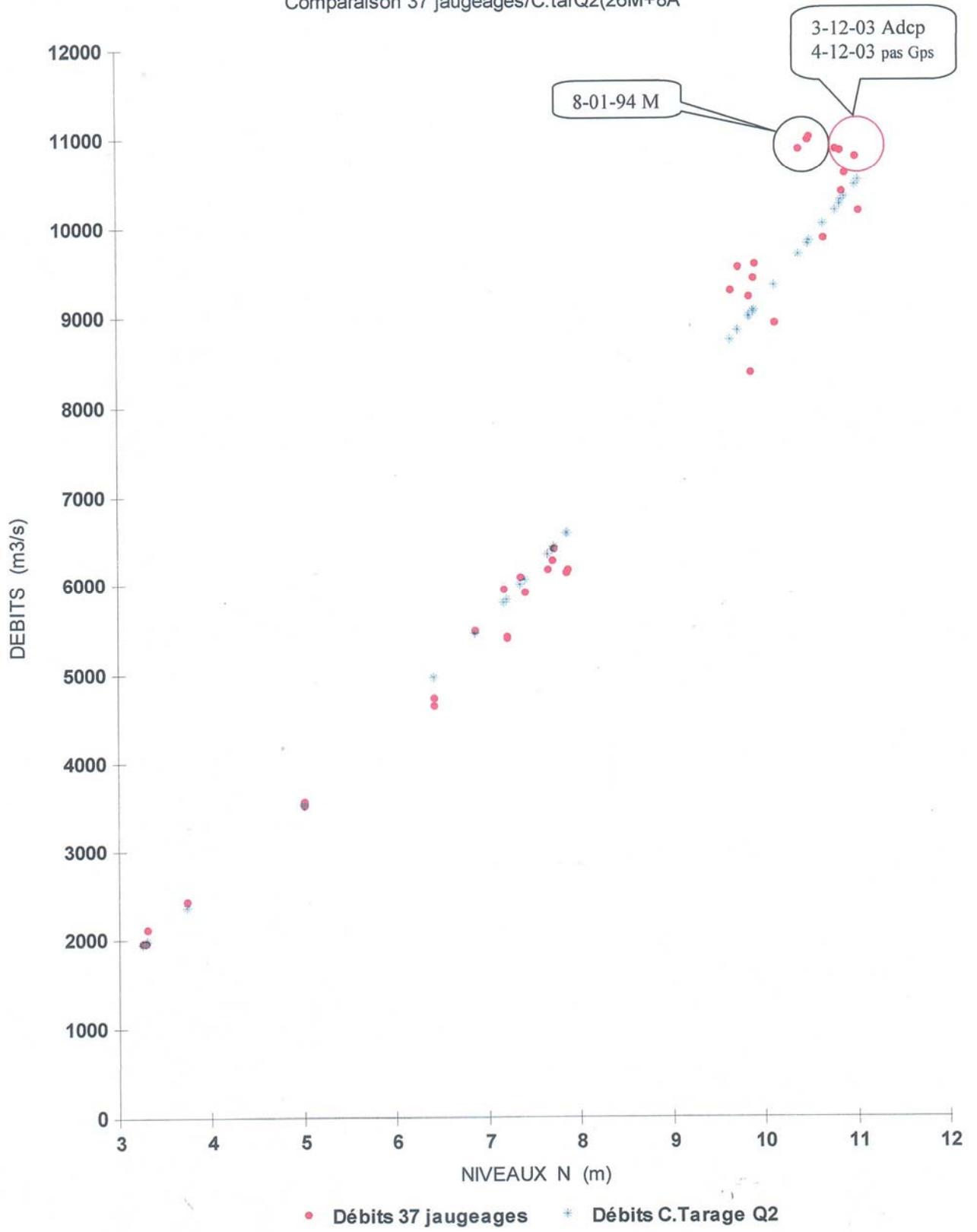


tableau1	N m	Qobs m3/s	Q2	Q1	Q2-Qo	Q1-Qo
05-11-92 M	3,73	2437	2354	2390	-83	-47
18-11-92	6,4	4657	4965	4833	308	176
18-11-92	6,4	4748	4965	4833	217	85
24-11-92	7,2	5407	5842	5710	435	303
24-11-92	7,2	5435	5842	5710	407	275
24-09-93	6,85	5502	5454	5318	-48	-184
24-09-93	7,4	5930	6068	5939	138	9
24-09-93	7,7	6278	6410	6291	132	13
24-09-93	7,72	6423	6433	6315	10	-108
6-10-93	7,85	6148	6584	6470	436	322
6-10-93	7,86	6187	6595	6482	408	295
9-10-93	9,64	9302	8745	8792	-557	-510
9-10-93	9,72	9555	8845	8903	-710	-652
10-10-93	9,9	9578	9072	9157	-506	-421
10-10-93	9,89	9439	9060	9143	-379	-296
14-10-93	7,65	6178	6353	6232	175	54
23-03-94	3,25	1974	1946	2029	-28	55
23-03-94	3,28	1974	1971	2051	-3	77
23-03-94	3,29	2128	1980	2058	-148	-70
24-02-95	5,01	3570	3540	3469	-30	-101
24-02-95	5	3532	3530	3460	-2	-72
03-12-03	11,03	10184	10534	10824	350	640
04-12-03	9,85	8394	9009	9086	615	692
24-02-95 A	5	3540	3530	3460	-10	-80
3-12-03A	10,77	10881	10192	10429	-689	-452
3-12-03A	10,82	10863	10258	10504	-605	-359
4-12-03A	10,99	10810	10481	10763	-329	-47
4-12-03A	10,88	10614	10336	10595	-278	-19
4-12-03Agp	10,85	10401	10297	10550	-104	149
4-12-03Agp	10,65	9874	10036	10249	162	375
4-12-03Agp	10,12	8929	9352	9471	423	542
10-10-93 M	9,84	9233	8996	9072	-237	-161
14-10-93	7,17	5950	5809	5675	-141	-274
14-10-93	7,35	6093	6011	5881	-82	-212
08-01-94°	10,5	11029	9841	10026	-1188	-1003
08-01-94°	10,48	10984	9815	9996	-1169	-988
08-01-94°	10,38	10883	9686	9849	-1197	-1034
10-09-2002	10,27	10539	9544	9688	-995	-851
4-12-2003	11,3	12938	10892	11242	-2046	-1696

Q1= 390N+52NN+214 23+8+3=34j

LnQ2= 1,3819LnN+5,94495 23+8+3=34j

M=moulinet

A=Adcp Agps=Adcpgps

° Jaugeages non pris en compte

tableau 2	N	m	Qobs	m3/s	Q2	Qcnr	Q2-Qo	Qcnr-Qo
05-11-92 M	3,73		2437		2354	2550	-83	113
18-11-92	6,4		4657		4965	4890	308	233
18-11-92	6,4		4748		4965	4890	217	142
24-11-92	7,2		5407		5842	5710	435	303
24-11-92	7,2		5435		5842	5710	407	275
24-09-93	6,85		5502		5454	5340	-48	-162
24-09-93	7,4		5930		6068	5920	138	-10
24-09-93	7,7		6278		6410	6270	132	-8
24-09-93	7,72		6423		6433	6290	10	-133
6-10-93	7,85		6148		6584	6440	436	292
6-10-93	7,86		6187		6595	6450	408	263
9-10-93	9,64		9302		8745	9300	-557	-2
9-10-93	9,72		9555		8845	9450	-710	-105
10-10-93	9,9		9578		9072	9770	-506	192
10-10-93	9,89		9439		9060	9750	-379	311
14-10-93	7,65		6178		6353	6210	175	32
23-03-94	3,25		1974		1946	2180	-28	206
23-03-94	3,28		1974		1971	2200	-3	226
23-03-94	3,29		2128		1980	2210	-148	82
24-02-95	5,01		3570		3540	3620	-30	50
24-02-95	5		3532		3530	3610	-2	78
03-12-03	11,03		10184		10534	12300	350	2116
04-12-03	9,85		8394		9009	9680	615	1286
24-02-95 A	5		3540		3530	3610	-10	70
3-12-03A	10,77		10881		10192	11700	-689	819
3-12-03A	10,82		10863		10258	11800	-605	937
4-12-03A	10,99		10810		10481	12200	-329	1390
4-12-03A	10,88		10614		10336	11900	-278	1286
4-12-03Agp	10,85		10401		10297	11900	-104	1499
4-12-03Agp	10,65		9874		10036	11400	162	1526
4-12-03Agp	10,12		8929		9352	10200	423	1271
10-10-93 M	9,84		9233		8996	9660	-237	427
14-10-93	7,17		5950		5809	5670	-141	-280
14-10-93	7,35		6093		6011	5870	-82	-223
08-01-94°	10,5		11029		9841	11100	-1188	71
08-01-94°	10,48		10984		9815	11100	-1169	116
08-01-94°	10,38		10883		9686	10800	-1197	-83
10-09-2002	10,27		10539		9544	10600	-995	61
4-12-2003	11,3		12938		10892	13000	-2046	62

$$\ln Q2 = 1,3819 \ln N + 5,94495 \quad 23+8+3=34J$$

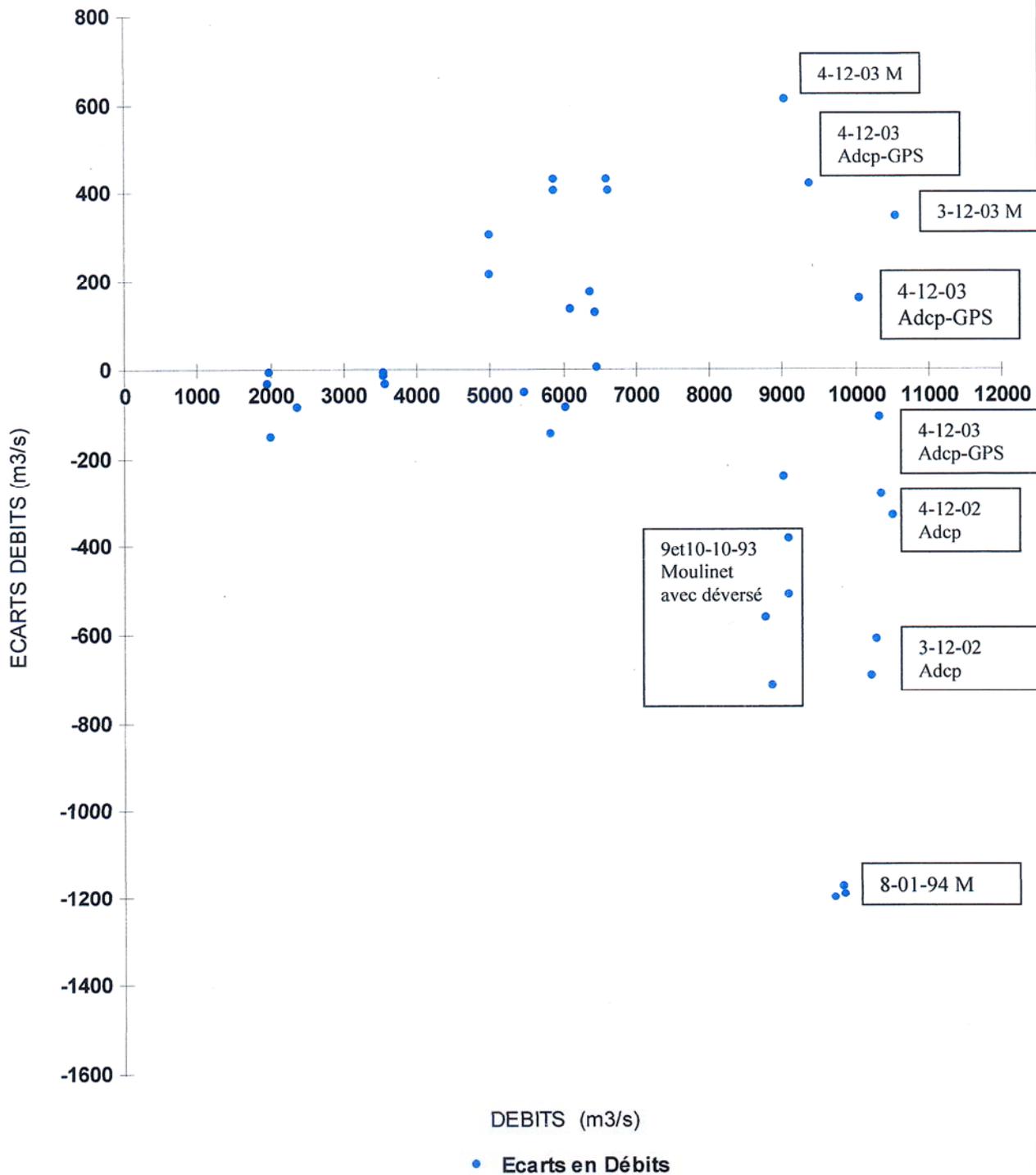
M=moulinet

A=Adcp

° Jaugeages non pris en compte

RHONE à Beaucaire Restitution

Ecarts débits jaugés/estimés C.tar.Q2



RHONE à Beaucaire Restitution

Comparaison 37 jaugeages/2courbes tarag

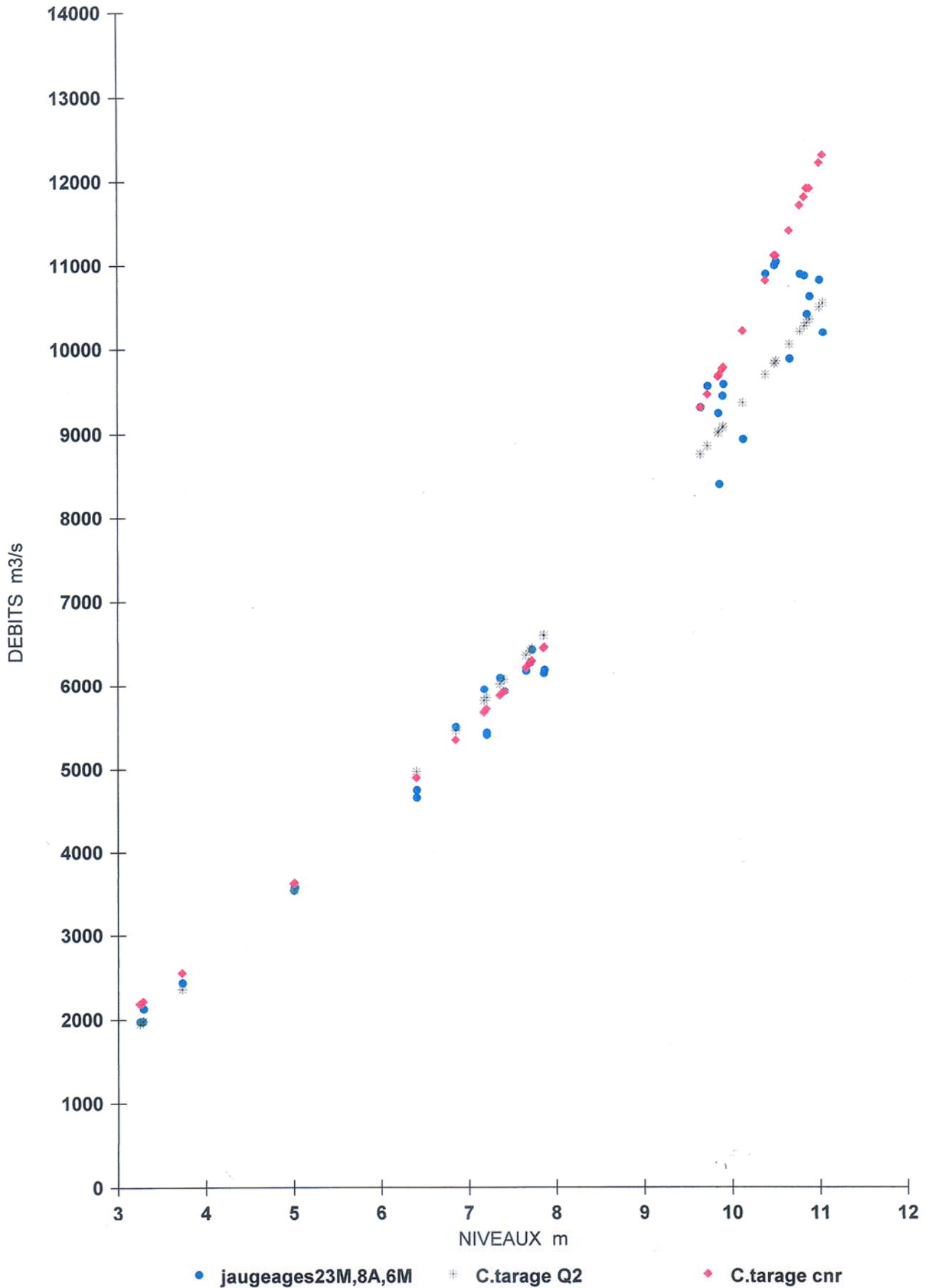


tableau 3 Nm/Qm3/s	Niveau	Courbes		Tarage	Rhone	Beucaire
	N	C.tar	Cnr	C.tar Q2	Q2 05%	Q2 95%
	3		1990	1743	1617	1878
	3,25		2180	1946	1806	2098
	3,5		2360	2156	2001	2324
	3,75		2570	2372	2201	2556
	4		2770	2593	2406	2795
	4,25		2980	2820	2616	3039
	4,5		3180	3052	2832	3289
	4,75		3400	3288	3051	3544
	5		3610	3530	3275	3804
	5,25		3830	3776	3504	4070
	5,5		4050	4027	3736	4340
	5,75		4280	4282	3973	4615
	6		4510	4541	4214	4894
	6,25		4750	4805	4458	5178
	6,5		4980	5072	4707	5467
	6,75		5240	5344	4959	5759
	7		5490	5620	5214	6056
	7,25		5760	5899	5473	6357
	7,5		6030	6182	5736	6662
	7,75		6330	6468	6002	6971
	8		6620	6758	6271	7284
	8,25		6980	7052	6543	7600
	8,5		7330	7349	6819	7920
	8,75		7750	7649	7098	8244
	9		8160	7953	7379	8571
	9,25		8610	8260	7664	8902
	9,5		9050	8570	7952	9236
	9,75		9500	8883	8242	9573
	10		9950	9199	8536	9914
	10,25		10500	9519	8832	10258
	10,5		11100	9841	9131	10606
	10,75		11700	10166	9433	10956
	11		12200	10494	9738	11310
	11,25		12900	10825	10045	11667
	11,5		13500	11159	10354	12027
	11,75			11496	10667	12389
	12			11835	10982	12755

RHONE à Beaucaire
 Courbe tarage Cnr, Courbe tarage Q2 90%

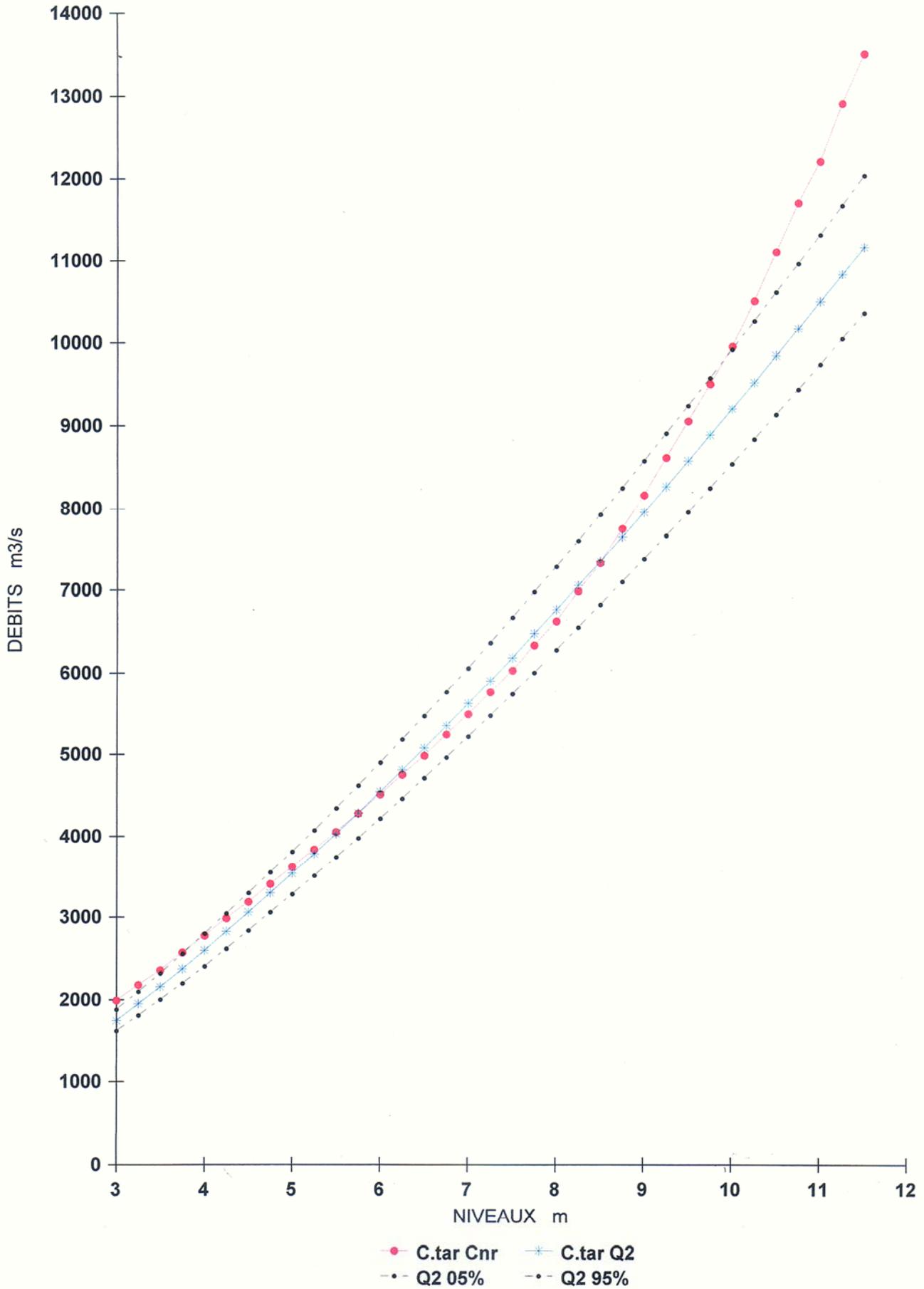
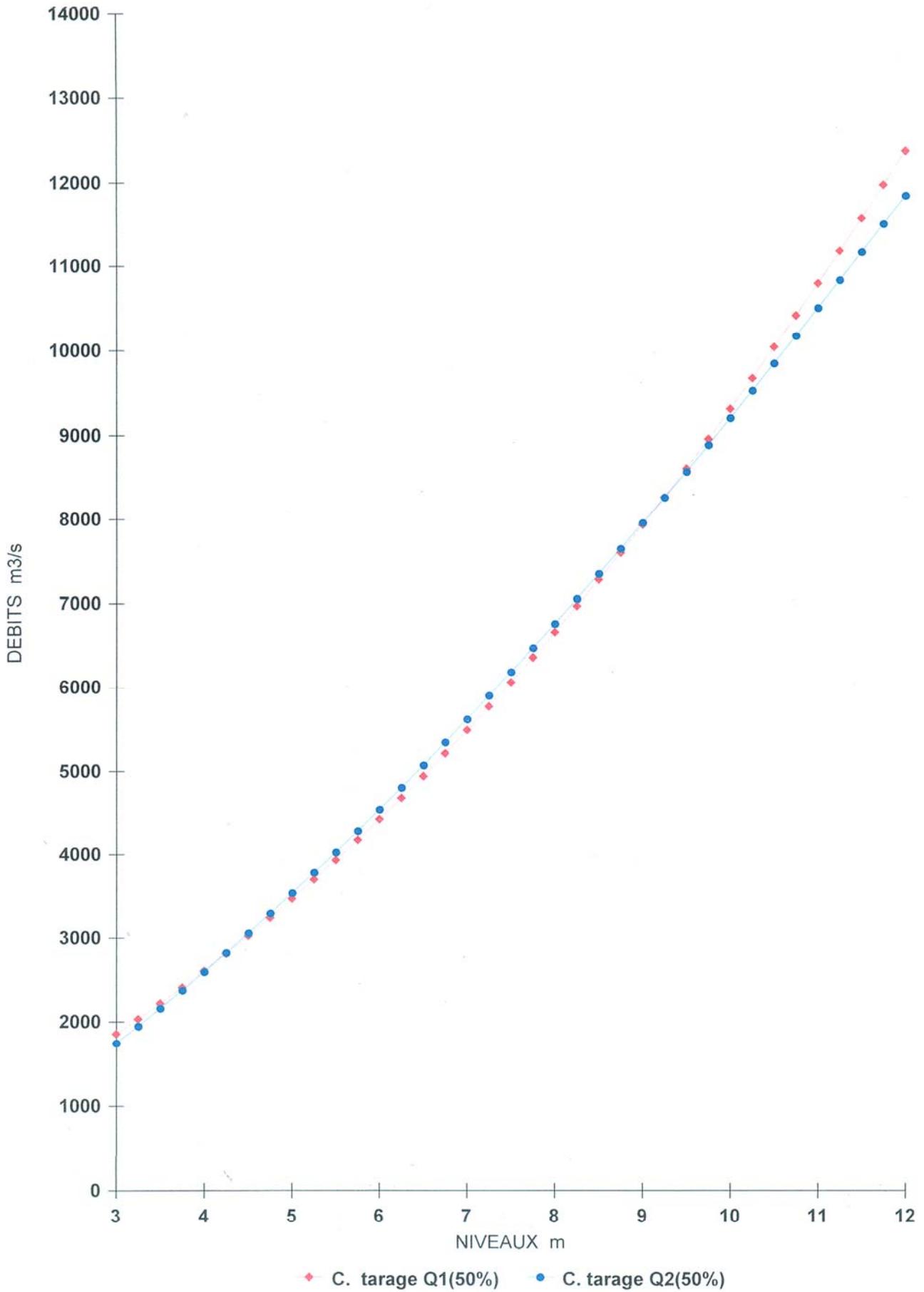


tableau 4 Nm/Qm3/s	Niveau N	C.tarageRHONE Beaucaire	
		Q1 50%	Q2 50%
	3	1851	1743
	3,25	2030	1946
	3,5	2215	2156
	3,75	2406	2372
	4	2604	2593
	4,25	2809	2820
	4,5	3020	3052
	4,75	3237	3288
	5	3462	3530
	5,25	3692	3776
	5,5	3929	4027
	5,75	4172	4282
	6	4422	4541
	6,25	4679	4805
	6,5	4942	5072
	6,75	5211	5344
	7	5487	5620
	7,25	5769	5899
	7,5	6058	6182
	7,75	6354	6468
	8	6656	6758
	8,25	6964	7052
	8,5	7279	7349
	8,75	7600	7649
	9	7928	7953
	9,25	8262	8260
	9,5	8603	8570
	9,75	8950	8883
	10	9304	9199
	10,25	9664	9519
	10,5	10031	9841
	10,75	10404	10166
	11	10784	10494
	11,25	11170	10825
	11,5	11563	11159
	11,75	11962	11496
	12	12368	11835

Rhone à Beaucaire courbes tarage Q1,Q2

Courbes tarage ajustées 34 jaugeages



Par contre, les 3 jaugeages réalisés le 8-01-94 au PK 269.600 posent question, puisque pour un débit jaugé moyen de 10965 m³/s, l'écart moyen de $Q_2 - Q_0 = -1185 \text{ m}^3/\text{s}$ et l'écart moyen de $Q_1 - Q_0 = -1008 \text{ m}^3/\text{s}$, ce sont de véritables horsains (cf. Annexe 2).

On remarque que le rapport $V_m/V_{0,20}$ (vitesse moyenne à vitesse m à 20cm sous la surface) de ces trois jaugeages de surface à été pris $=0,91$, or le rapport de ces deux vitesses pour 10 jaugeages au moulinet réalisés à toutes profondeurs de 1992 à 1995 est compris entre 0,85 et 0,87 soit 700 à 800m³/s de moins. Ces jaugeages constituent probablement la cause de la surestimation à 13000m³/s du débit de pointe de la crue du RHONE à Beaucaire le 4-12-2003 : en conditionnant la courbe de tarage établie par CNR en 1994, ils ont été privilégiés au détriment des 5 jaugeages de crue les 3 et 4 décembre 2003 déjà cités (3ADCP, 1 moulinet, 1 ADCP-Gps) pourtant promus par la CNR, à juste titre (à condition d'analyser en profondeur les différentes sources d'incertitudes associées aux mesures en fortes crues).

Questions à CNR : -quelles différences entre PK.269.600 et PK.272.250 ? quelles explications hydrométriques et hydrauliques pour les jaugeages du 8-01-1994 ?

2. Estimation proposée des débits de pointe de crues du RHONE à Beaucaire PK 272.250 .

le 4 décembre 2003, niveau $N=11,30$

courbe de tarage Q_2 $Q=10892 \text{ m}^3/\text{s}$ (au lieu de 12940 m³/s)

intervalle d'incertitude à 90% : 5% $Q=10106 \text{ m}^3/\text{s}$ _ 95% $Q=11738 \text{ m}^3/\text{s}$

courbe de tarage Q_1 $Q=11242 \text{ m}^3/\text{s}$

intervalle d'incertitude à 90% : 5% $Q=10725 \text{ m}^3/\text{s}$ _ 95% $Q=11760 \text{ m}^3/\text{s}$

le 10 septembre 2002, niveau $N=10,27$

courbe de tarage Q_2 $Q=9544 \text{ m}^3/\text{s}$ (au lieu de 10540 m³/s)

intervalle d'incertitude à 90% : 5% $Q=8856 \text{ m}^3/\text{s}$ _ 95% $Q=10286 \text{ m}^3/\text{s}$

courbe de tarage Q_1 $Q=9689 \text{ m}^3/\text{s}$

intervalle d'incertitude à 90% : 5% $Q=9172 \text{ m}^3/\text{s}$ _ 95% $Q=10206 \text{ m}^3/\text{s}$

On note ainsi la surestimation de 2000m³/s du débit de pointe de crue du 4-12-03, annoncé sans précaution (fourchette d'incertitude) en décembre 2003 à 13000 m³/s (à la cote 10,9m il y avait déjà 1500m³/s en trop, cf §1.3.2, qui préfigurait l'écart de 2000m³/s à la cote 11,3m). Egalement, le débit annoncé pour la pointe de crue du Rhône le 10-09-02 paraît surestimé de 1000m³/s ce qui modifie le volume reconstitué pour la crue du GARD du 9-09-02.

Les surestimations de débits de crues du Rhône à Beaucaire par la courbe de tarage CNR concernent les niveaux supérieurs à $N=9$, soit les débits supérieurs à 8000 m³/s, depuis le 01-10-1993 semble-t-il ?

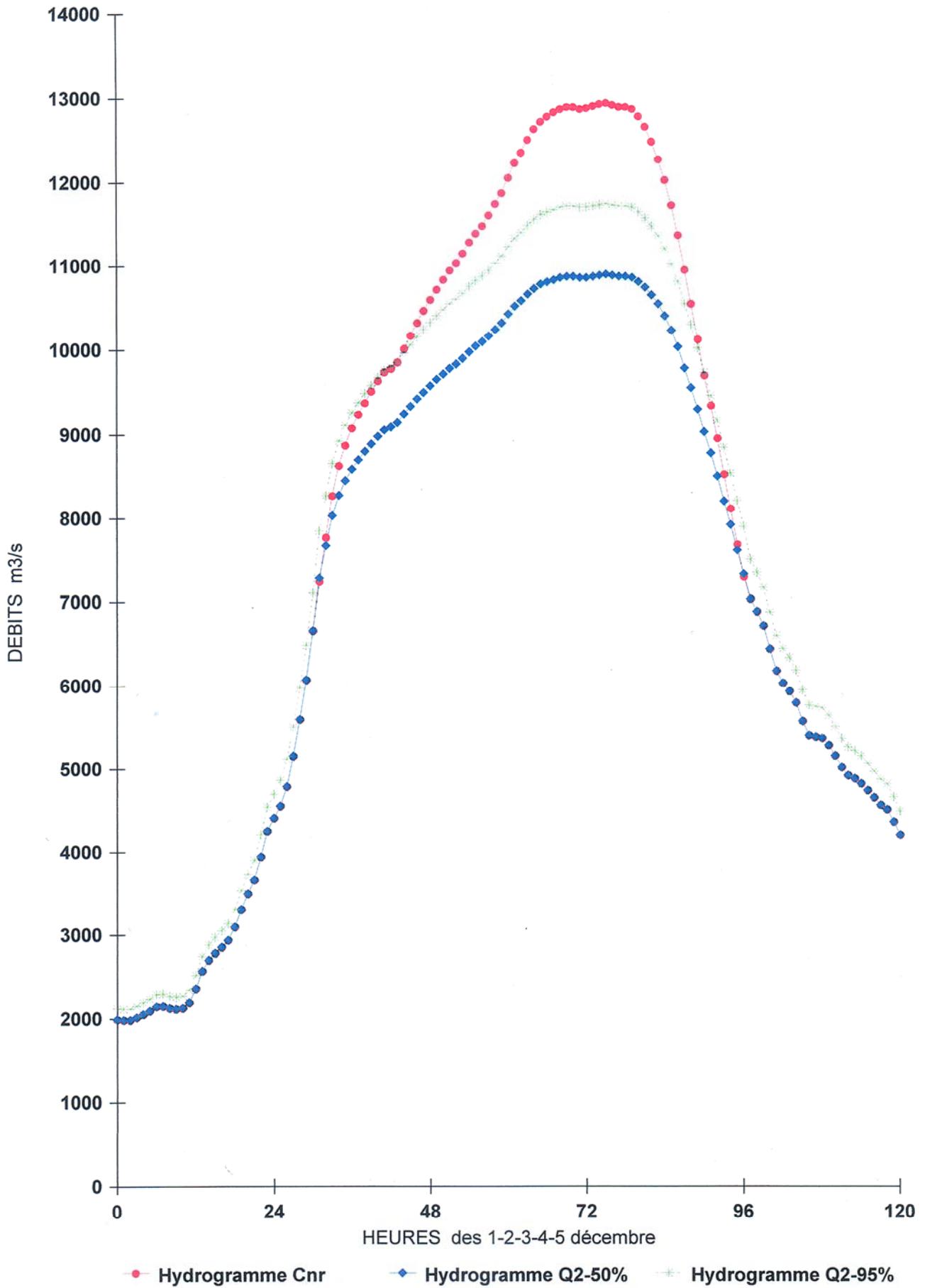
Le 8 janvier 1994, pour $N=10,5$ le débit de pointe est estimé à $Q_2=9900 \text{ m}^3/\text{s}$ (au lieu de 11000 m³/s).

Le 6 novembre 1994, pour $N=9,89$, le débit de pointe de crue est estimé à $Q_2=9060 \text{ m}^3/\text{s}$ (au lieu de 9740 m³/s).

Le 10 octobre 1993, pour $N=9,90$, le débits de pointe de crue est estimé à $Q_2=9070 \text{ m}^3/\text{s}$ (au lieu de 9770 m³/s).

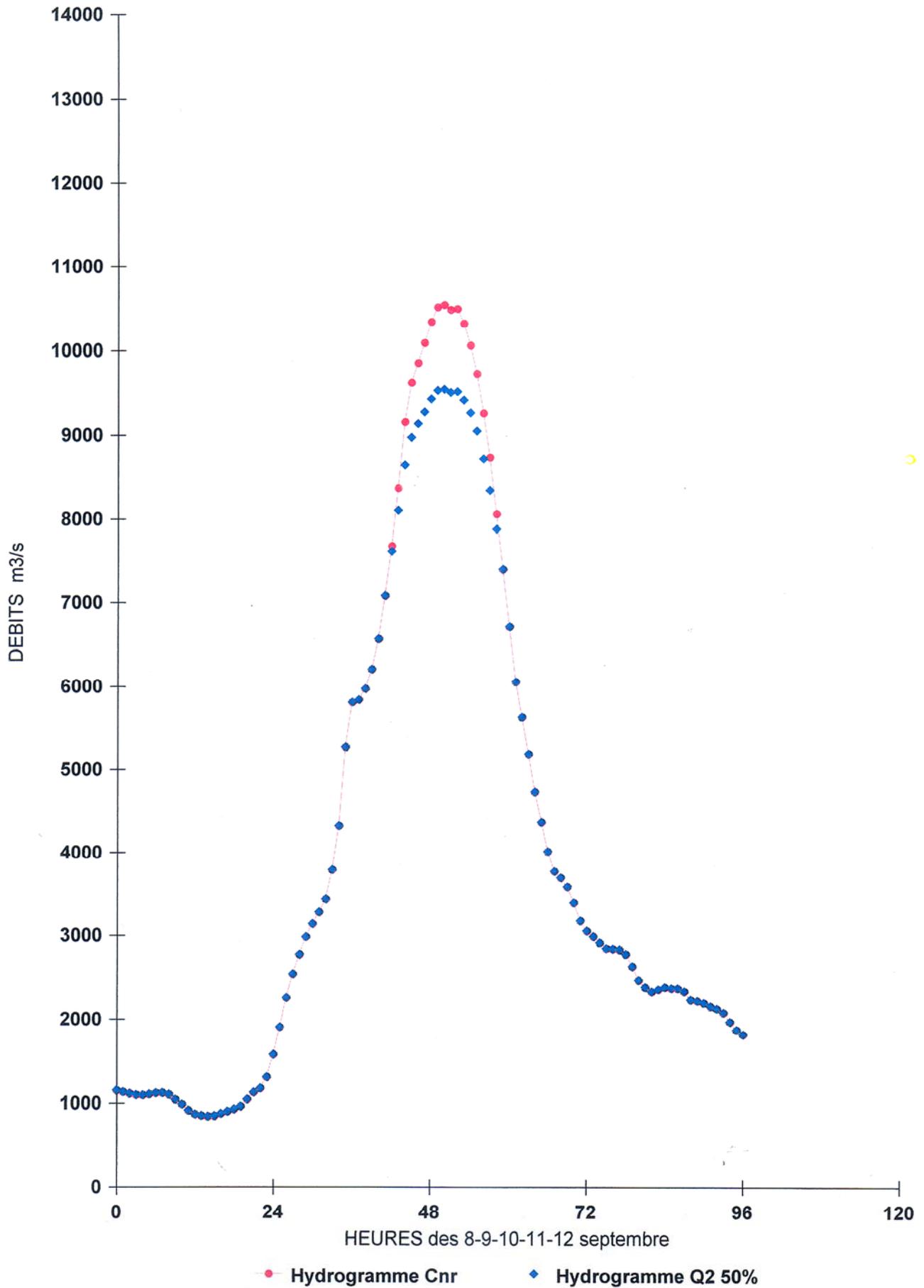
RHONE à Beaucaire Restitution

Hydrogrammes crue du 1-6 décembre 2003



RHONE à Beaucaire

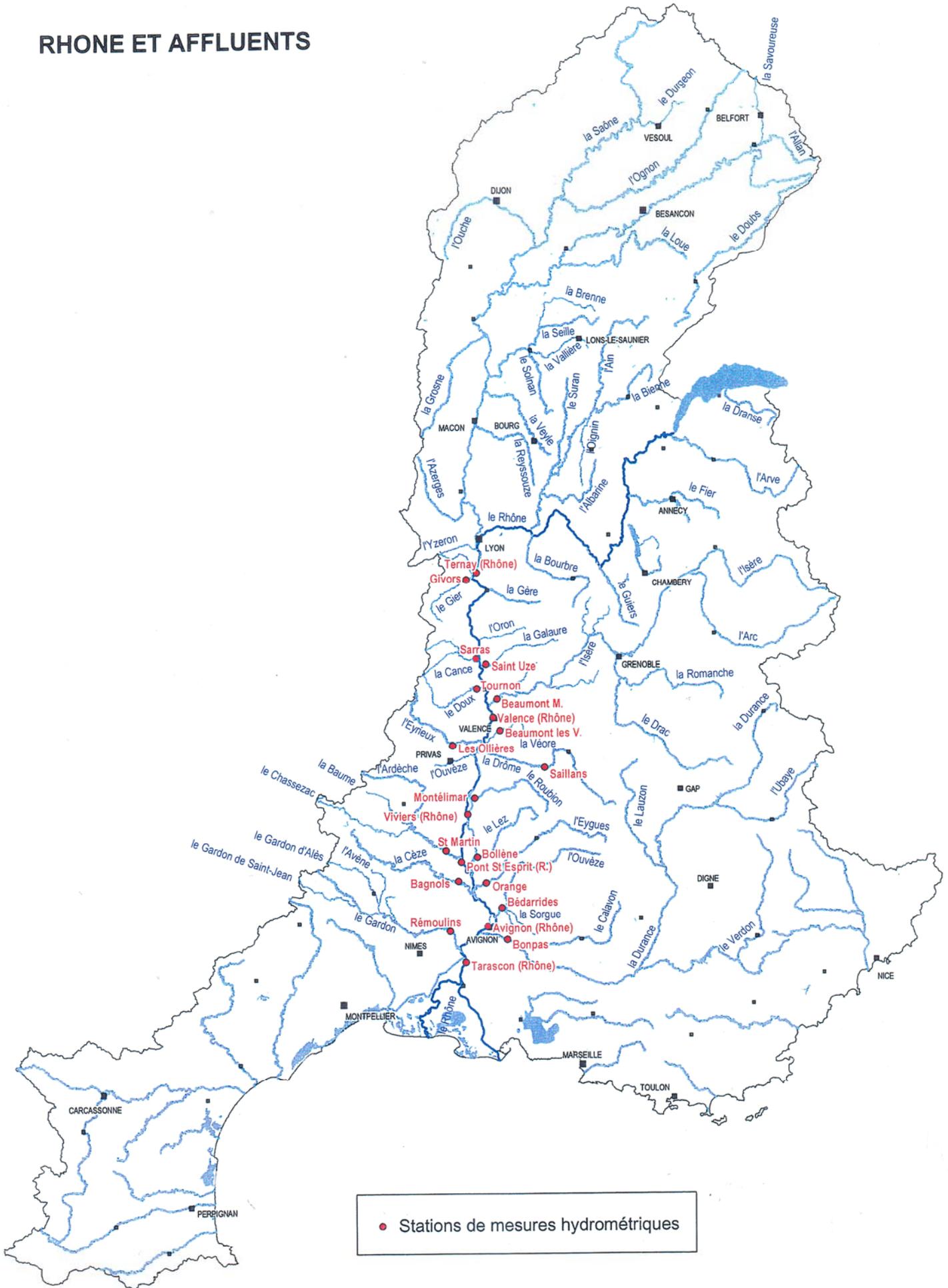
Hydrogrammes crue du 8-11 sept. 2002



Pour ce qui concerne le volume estimé de la crue du Rhône à Beaucaire pendant les 5 jours du 1 au 5 décembre 2003 ,en adoptant le barème de tarage Q2,on obtient un volume global de 3050 hm³ .

En considérant seulement les apports en crues des affluents du bassin versant intermédiaire TERNAY-BEAUCAIRE (BV 45000 km²) supérieurs au volume de base à Beaucaire et en retranchant les apports de crue à l'amont de Ternay, on obtient un volume de: 1750 hm³ (avec le barème de tarage Cnr on note 17% de plus soit 2050 hm³) ; ce chiffre correspond à un écoulement de 52 mm pour 33000 km²(en diminuant de 6000 km² la surface du BV Isère ,et de 6000km² la surface du BV de la Durance),si l'on adopte une lame d'eau pluviale moyenne de 145 mm(valeur estimée d'après des informations fournies par Météo France) on peut évaluer le coefficient de ruissellement moyen global à 36% (chiffre à valider) .

RHONE ET AFFLUENTS



ANNEXE 1 Crues du RHONE et affluents.

A/Le RHONE à Pont de Viviers :

- 1-Analyse des jaugeage, Calage d'une courbe de tarage,
- 2-Incidence sur le calcul des débits de crues récentes.

1-Ajustement d'une courbe de tarage.

D'après les résultats de 16 jaugeages effectués par la CNR entre 1992 et 2003 à Pont de Viviers (données communiquées à l'IGE-MEDD le 6-05-2004), nous avons ajusté une relation linéaire simple entre les débits jaugés Q_0 et les niveaux N en calculant les deux coefficients par la méthode des moindres carrés, soit :

$$Q_1 = 1608 * N - 93652$$

Le coefficient de corrélation étant $r_1 = 0,99384637$

L'écart-type d'incertitude associée à l'écart ($Q_1 - Q_0$) étant $s_1 = 218 \text{ m}^3/\text{s}$, et l'intervalle d'incertitude à 90% étant défini par la plage (-360 à +360 m^3/s) quelques soient les valeurs de N , donc indépendant de l'importance des débits. (tableau 5)

2-Incidence sur le calcul de crues récentes.

Débit de pointe de la crue du 3-12-2003 à 4h :

on obtient une estimation de 7670 m^3/s avec 90% de chances de se situer entre 7300 et 8000 m^3/s , la valeur fournie (non validée) par Cnr étant 7943 m^3/s au niveau $N=63,01$;

Débit de pointe de la crue du 7-01-1994 à 14h :

on obtient une estimation de 7363 m^3/s avec 90% de chances de se situer entre 7000 et 7700 m^3/s , la valeur fournie par Cnr étant 7564 m^3/s au niveau $N=62,82$

B/REMARQUES sur les POINTES de crues d'affluents du Rhône les 2 et 3 décembre 2003.

Débit de pointe de l'Isère à St Gervais (BV 9910 km^2) : 406 m^3/s

Débit de pointe de la Bourne à Pt de Manne (BV 787 km^2) : 567 m^3/s

Débit de pointe de l'Isère au confluent (BV 10900 km^2) : 960 m^3/s à 1h le 3-12

Débit de pointe estimé à confluence Isère-Rhône (BV 11800 km^2) : 1100 à 1200 m^3/s .

Débit de pointe de l'Eyrieux à Pt de Chervil (BV 392 km^2) : 634 m^3/s

Débit de pointe de l'Eyrieux aux Ollières (BV 643 km^2) : 1100 m^3/s , et 1250 m^3/s au confluent.

Débit de pointe de l'Ardèche à St Martin (BV 2240 km^2), on adopte le chiffre Diren : 3000 m^3/s .

Débit de pointe la Durance à Cadarache (BV 11700 km^2) : 1600 m^3/s le 3-12-03 à 4h, il s'étale ensuite en propagation.

Débit de pointe du Gard à Remoulins dont l'hydrogramme est à recalculer : 950 m^3/s ?

Nous ne disposons d'aucunes observations sur les jaugeages du Rhône à Avignon.

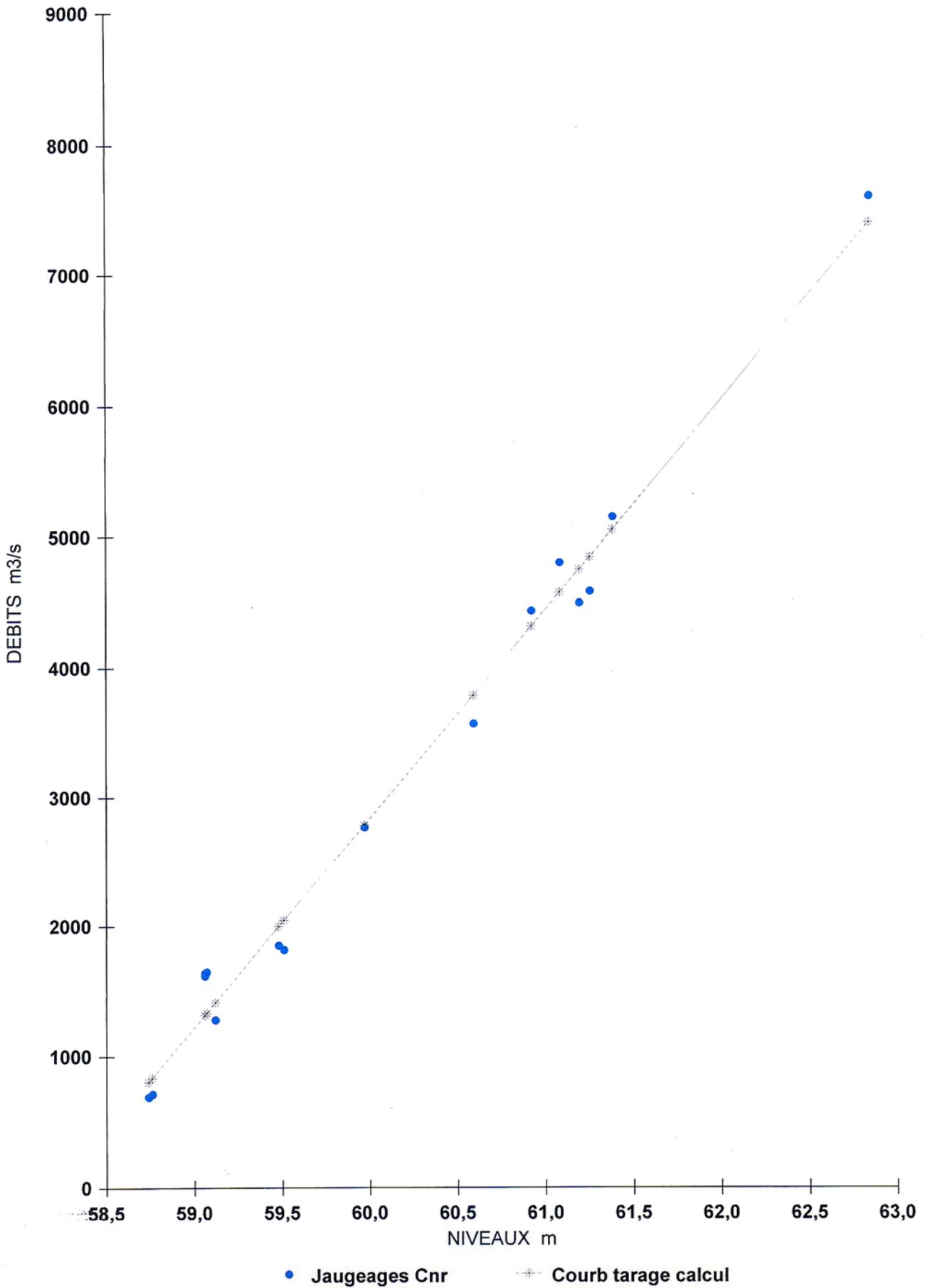
tableau 5		RHONE	à Pontde	Viviers
DATE	N	Qo	Q1	Q1-Qo
25-09-92	59,12	1284	1413	129
2-11-92	59,97	2766	2780	14
18-11-92	61,25	4577	4838	261
25-11-92	61,19	4489	4742	253
5-10-93	60,59	3564	3777	213
9-10-93	62,84	7598	7395	-203
11-10-93	61,38	5147	5047	-100
13-10-93	61,08	4798	4565	-233
4-01-94	60,92	4429	4307	-122
22-03-94	59,06	1621	1316	-305
22-03-94	59,07	1652	1333	-319
22-03-94	59,06	1642	1316	-326
9-06-94	59,51	1818	2040	222
9-06-94	59,48	1850	1992	142
17-10-03	58,76	715	834	119
17-10-03	58,74	691	802	111

60,12625 3040,0625

Q1=(N)*1608-93652

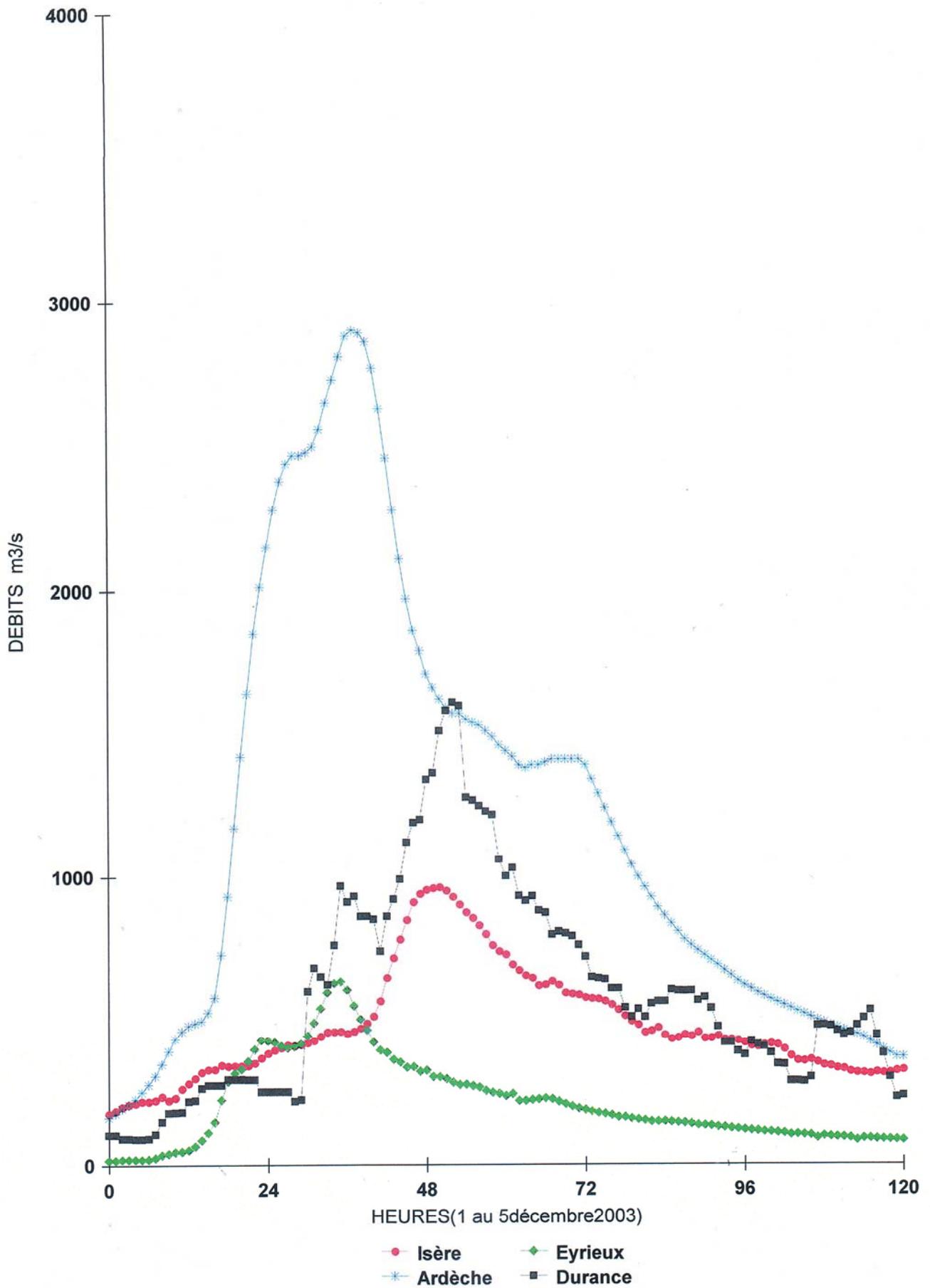
RHONE à Pont de Viviers

Jaugeages Cnr(1992-2003), C. tarage ajust



Affluents RHONE

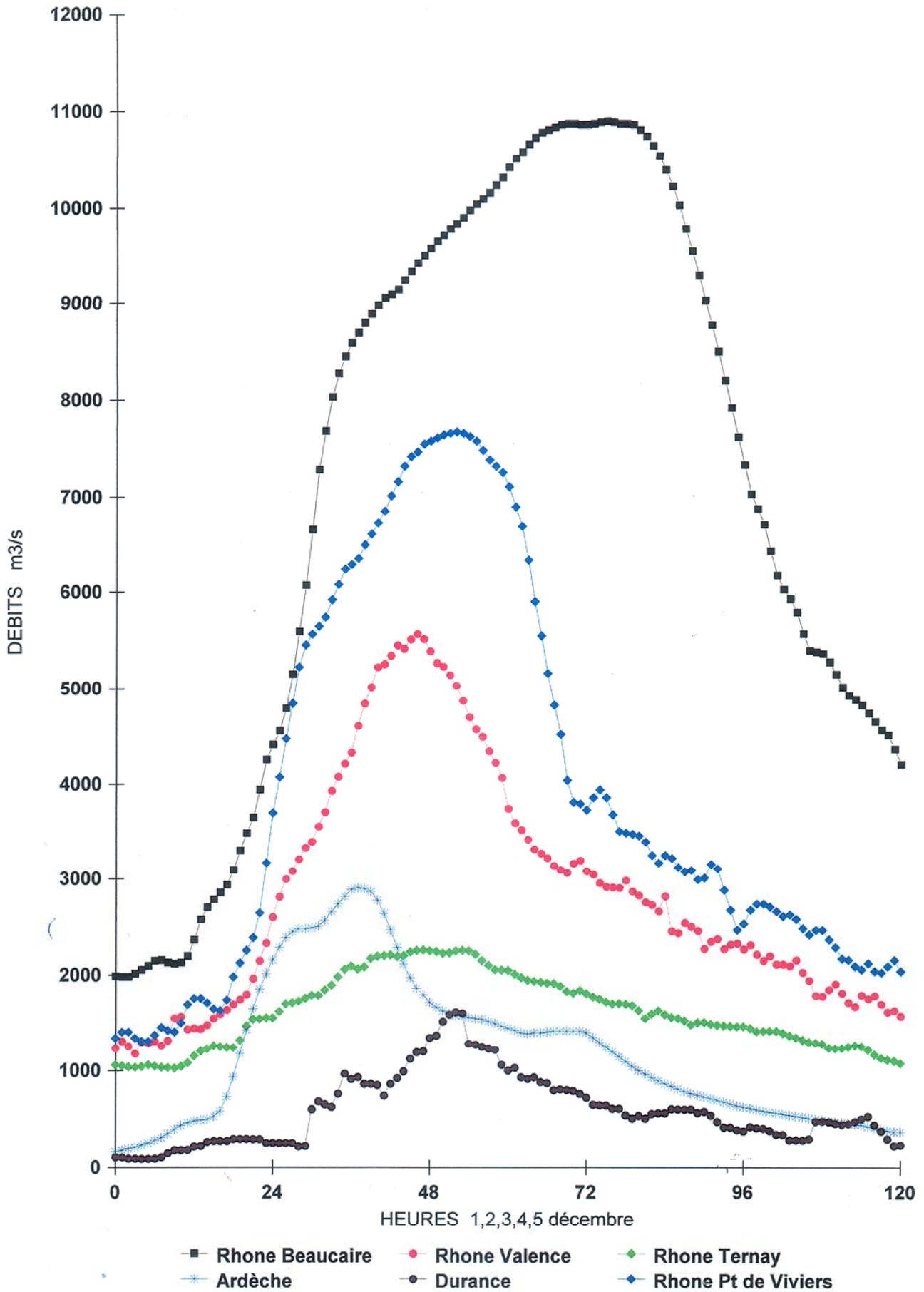
Isère StG+Bourne, Eyrieux, Ardèche, Duranc



RHONE	Affluents	Heure J	DIRENB	CNR estimations			1-5	12	2003
	tableau 6		pointe m3/s	m3/s	m3/s	volume hm ³	vol. base	BVI hm ³	
Ternay		23h/02	2150	2260	2200	680	440		
	Giers	16h/02	340	330		50			
	Cance	13h/02	430	420		50			
	Galaure	17h/02	110			20			
	Doux	12h/02	950	900		110			
	Isère	21h/02-3h/0	1200	1510	1200	240	100	mes.470	
Valence		22h/02	5500	5550	5500	1250	650	570	
	Eyrieux	10h/02	1100	1720	1250	170	20		
	Drome	22h/02	650	850	600	120			
	Roubion	16h/02	750	700		80		mes.370	
Pont Viviers		3h/03	8000	7950	7600	1730	800	480	
	Ardèche	13h/02	2900	3560	3000	500	120	mes.500	
Pont StEsprit		18h/02-12h/	6300	?	8200	2250	920	520	
	Cèze	19h/02	710	740		160			
	Aygues	18h/02	500	500		75			
	Ouvèze	20h/02	590	590		135		mes.370	
Avignon		17h/03	10700		9700	2650	970	400	
	Durance	12h/03	1400	1500	1400	260	90		
	Gard	16h/03	1150	1370	950	110		mes.370	
Beaucaire		2h/04	13000	12000/1300	11000	3050	1060	370	
		Crues BVI	Ternay - Beaucaire		3050-1060 (>vol.base)	1990	-240 (amont Ternay)	1750	
			soit						
Estimations	BVI(45000-12000)km2	Pluie		soit	Ecoulement		Coef. ruisel		
	Ternay-Beaucaire	145mm			52mm		36%		
	Eyrieux 850km2	Pluie 280mm			Ecoulement 176mm		Coef. ruisel 63%		
	Ardèche 2430km2	Pluie 300mm			Ecoulement 158mm		Coef. ruisel 52%		
	Isère 5000km2 (BV11800)	Pluie 110mm			Ecoulement 28mm		Coef. ruisel 25%		
	Durance 7000km2 (BV14000)	Pluie 90mm			Ecoulement 22mm		Coef. ruisel 24%		

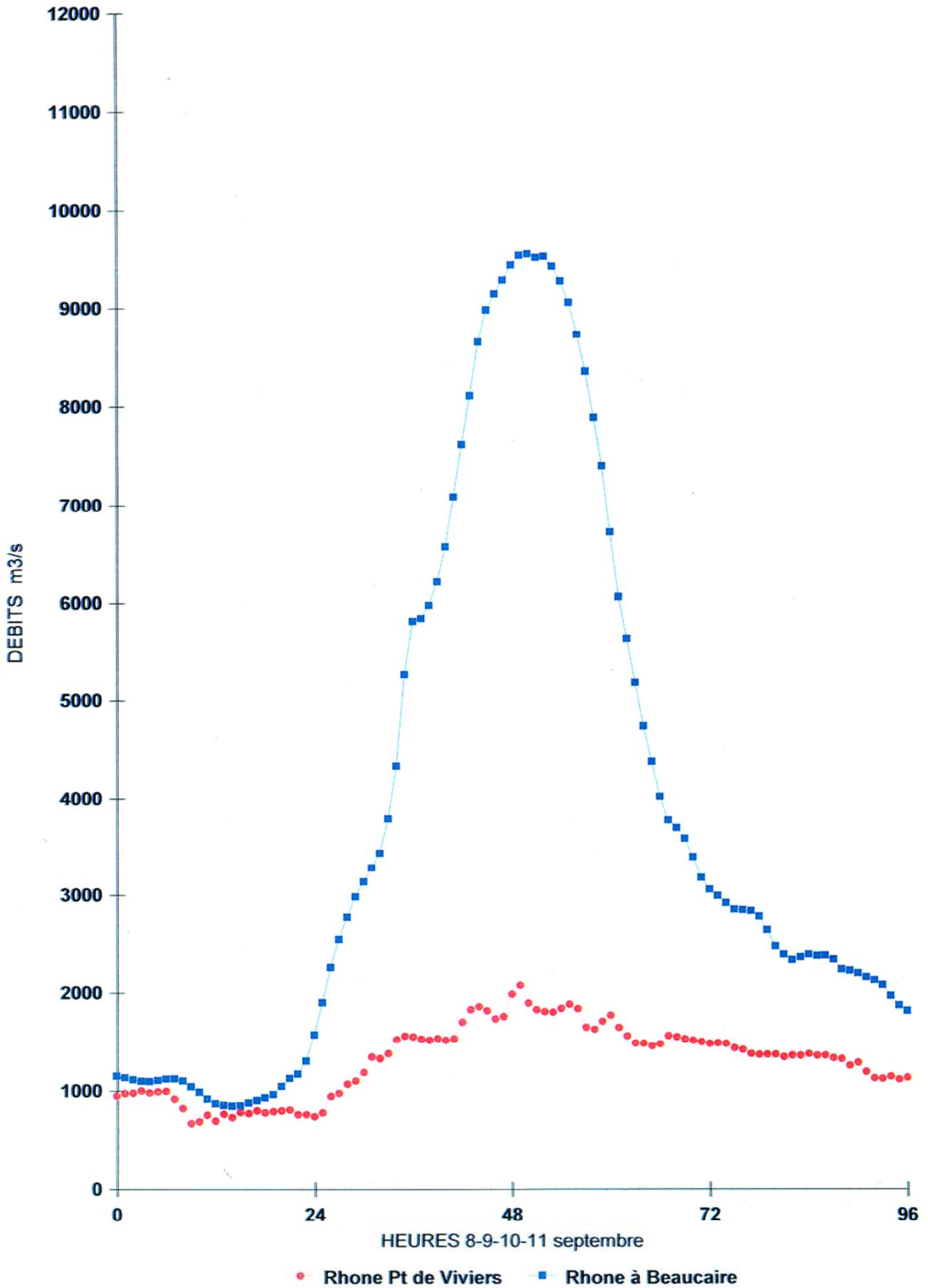
RHONE et Affluents Crue du 1-5/12/2003

Comparaison ondes de crues



RHONE Pt Viv-Beauc,Crue du 8-09-2002

Hydrogrammes amont-aval BVI 25000km2



C/REMARQUES sur les VOLUMES de CRUES du Rhône entre Ternay et Beaucaire.

Pour obtenir une estimation du volume de crue pendant les 5 jours du 1 au 5 décembre 2003

On a soustrait le volume de base au départ de la crue du volume total ,ainsi (tableau 6) :

Rhône à Ternay	240 hm ³ ,
Rhône à Valence	600hm ³ ,
Rhône à Pont de Viviers	930 hm ³ ,
Rhône à Pont St Esprit	1340 hm ³ ,
Rhône à Avignon	1680 hm ³ ,
Rhône à Beaucaire	1990 hm ³ ,

Le volume cumulé des crues du RHONE entre Ternay et Beaucaire est estimé à :

$1990-240=1750$ hm³ du 1 au 5 décembre pour un volume total de 3050hm³ à Beaucaire .

On remarque que les crues des affluents rive droite se produisent à 12h et 18h en rive gauche pour les bassins de moins de 2000km²,elles arrivent avant la crue du Rhône amont et celles de l'Isère et de la Durance .

Crues du RHONE et affluents entre Pont de Viviers et Beaucaire du 8 au 11 septembre 2002 :

En référence à la courbe de tarage Q₂ le volume total d'eau pendant les 4 jours du 8 au 11/09 est estimé à 1250 hm³ pour le Rhône à Beaucaire ,en soustrayant un volume de base de 250 hm³, on obtient un volume de crue de 1000 hm³ ;le volume total du Rhone à Pont de Viviers pendant les 4 même jours est estimé à 390 hm³ ,si on lui soustrait le volume de base de 210 hm³ on obtient un volume de crue de 180 hm³.

Le volume des crues des affluents du Rhône entre Pont de Viviers et Beaucaire c'est-à-dire Ardèche-Cèze-Gard-Lez-Aigues-Ouvèze-Durance peuvent être estimés alors à :

$$1000-180=820 \text{ hm}^3 .$$

Le volume de crue estimé pour l'Ardèche est 80 hm³,pour la Durance de 50hm³, pour le Lez-L'Aigues-l'Ouvèze de 90hm³ soit au total 220 hm³,il resterait pour le Gard et la Cèze :**600hm³** (plage 550-600 hm³ ,à valider).

Hypothèses :on estime à 375 mm la pluie reçue par le bassin du **Gard** (2000km²),soit 750 hm³ ,en adoptant un coefficient de ruissellement global de 50%cela correspondrait à un volume ruisselé de **380 hm³** et donc de **190hm³** pour la Cèze ?

Avec un débit de pointe de **5500 à 6000 m³/s**(durée de retour 200 à 300 ans) et un débit moyen en 36 heures de 2900m³/s on retrouve le volume estimé pour le Gard ;de même avec un débit de pointe de **2800 m³/s** et un débit moyen en 36 heures de 1450 m³/s on retrouve le volume estimé pour la Cèze(à confirmer).

Estimation de la probabilité des crues extrêmes dans les bassins versants du GARD et de l'ARDECHE par la méthode du Gradex (mise au point effectuée par Daniel Duband suite à erreur dans le rapport Etude Globale Crues du Rhône et affluents, détectée après la crue de septembre 2002 dans le Gard)

Probabilité	0,1	0,01	0,002	0,001
Durée moyenne de retour (années)	10	100	500	1000

Débits de pointe de crue (m3/s)

Gard à Remoulins (1840km2)	2200	4800	6500	7300
Intervalle d'estimation à 90%	(2100-2300)	(4600-5000)	(6200-6800)	(6900-7700)

Comparaison avec les résultats obtenus sur l'Ardèche en pointe à Sauze St Martin (2240km2)	3700	6900	9000	10000
Intervalle d'estimation à 90%	(3500-3900)	(6600-7200)	(8600-9400)	(9500-10500).

Débits spécifiques comparés (m3/s/km2) :

Gard	1,2	2,6	3,5	4,0
Ardèche	1,7	3,1	4,0	4,5.

(pour le Gard, les chiffres de l'étude SAFEGE ont été rectifiés par D.D en prenant le gradex d'automne de **25,8mm/jour** au lieu de 21mm pour l'année ; avec le même point pivot d'extrapolation de crue décennale et le même rapport moyen débit pointe à débit moyen journalier égal à 2

Pour l'Ardèche les estimations de débits de pointe de crues décennale-centennale-cinquantennale-millennale sont celles de l'étude faite par EDF-DTG) en 1994, elles sont proches des valeurs obtenues par Safège , respectivement : 3400, 6600, 8750, 9700 .

Remarques

Si l'on valide la plage de **5500 à 6000 m3/s en pointe** proposée pour la crue du Gard à l'aval de Remoulins le 9 septembre 2002 (voir rapport IGE Crues du Rhône et affluents des 2-3-4 décembre 2003) cet événement hydrologique aurait une **durée de retour comprise entre 200 et 300 ans**.

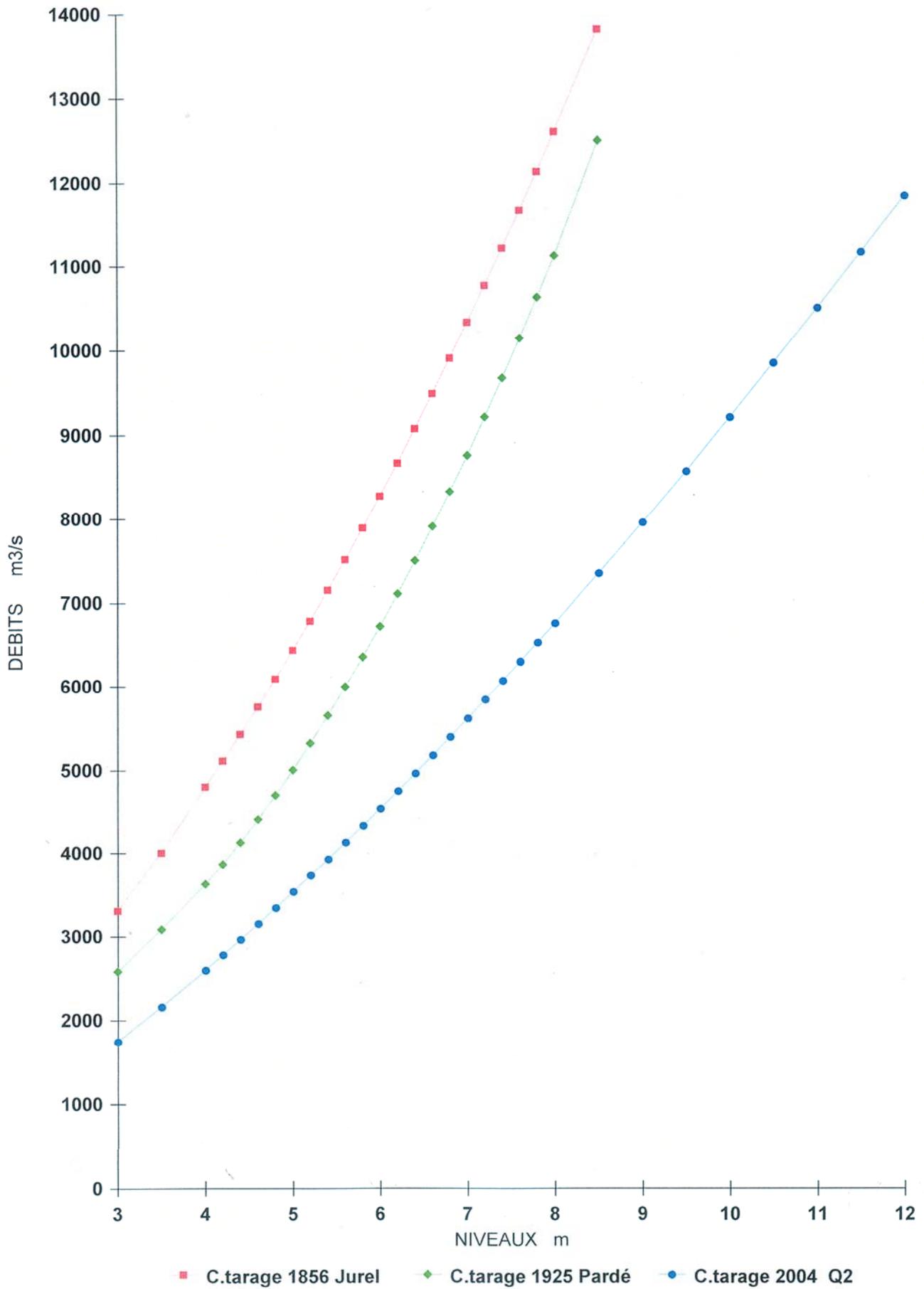
La référence à la première crue du Gard en 1958 (30 septembre et 1 octobre) est intéressante à approfondir ; à ce propos le débit de pointe de 4500 m3/s ne me paraît pas avoir été surestimé pour cette crue, car comme celui de la crue de l'Ardèche évalué aussi à 4500 m3/s, et la Cèze à 2500 m3/s, ils ont été générés par des pluies de plus de 300 à 400 mm en 24h dans les bassins versants supérieurs à fortes pentes, d'où des crues rapides très pointues mais dont les volumes sont relativement modestes (deux fois moindres) par rapport à ceux de septembre 2002, où le centre du bassin a reçu plus de pluies que les hauts bassins versants, et plus longtemps qu'en 1958.

L'analyse des hydrogrammes du Rhône entre le Teil et Beaucaire, ainsi que celle des pluies observées est éloquentes à ce sujet .

Le débat reste ouvert, car les processus hydro-pluviométriques et hydrauliques ne sont pas aisés ni simples à reconstituer et mixer, mais il me semble que l'on dispose d'informations et de mesures certes incomplètes et imparfaites, mais aussi d'expériences-événements historiques, susceptibles de faire progresser notre compréhension .

RHONE à Beaucaire

Comparaison de 3 courbes de tarage Hist



ANNEXE 2 Analyse hydraulique rapide des jaugeages du RHONE à Beaucaire
Philippe Bois (Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble)

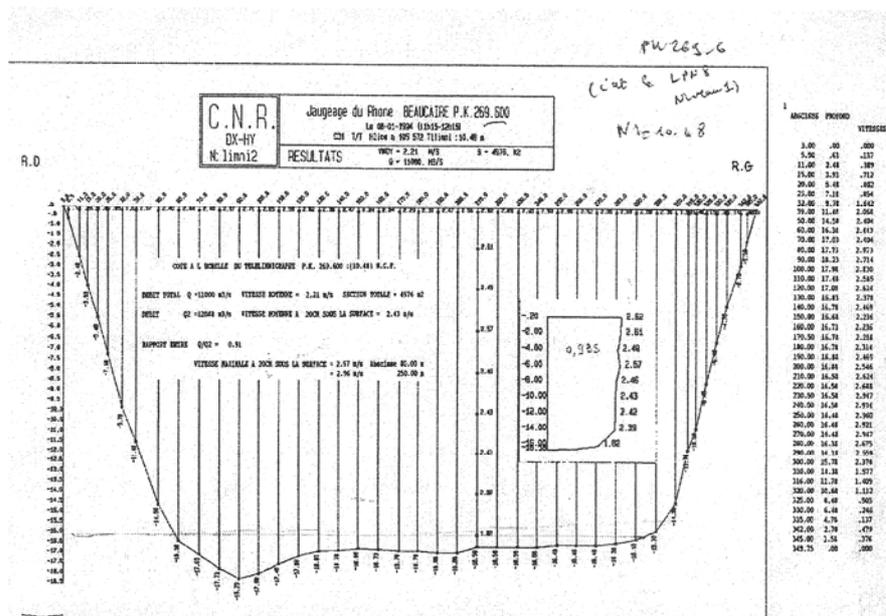
Analyse hydraulique rapide des jaugeages du Rhône à Beaucaire

Données de base : 38 jaugeages effectués de 1992 à 2003. Ces jaugeages n'ont pas tous été effectués au même endroit, mais comme pour chaque jaugeage, la CNR avait relevé le niveau à Beaucaire Restitution (PK 269.6), nous avons fait l'hypothèse raisonnable que le débit mesuré correspondait à celui qui passait à Beaucaire Restitution. Pour cette station, la CNR nous a fourni le profil en travers ayant servi au jaugeage de surface du 8/1/94. Nous avons ainsi pu écrire l'équation de la section mouillée A, du périmètre mouillé P, et du rayon hydraulique R en fonction du niveau du Rhône au PK 269.6 Z :

$$A=200+240*Z+3.656*Z^2 \quad (A \text{ en m}^2, Z \text{ en m}) \quad P=242+Z*3.16 \quad (P \text{ et } Z \text{ en m})$$

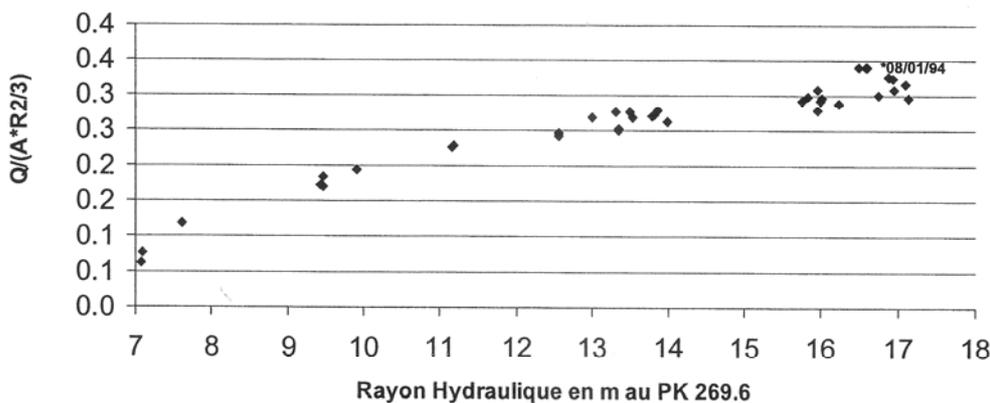
Quelques graphiques :

Section en travers du Rhône à Beaucaire restitution PK 269.6 (celui utilisé lors du jaugeage de 1994).



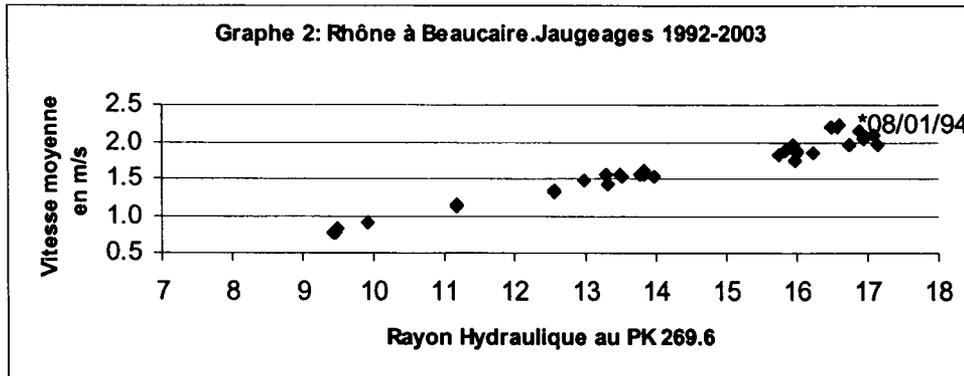
Graph 1 : $Q/(A \cdot R^{2/3}) = f(R)$. Cette quantité dans un écoulement permanent et uniforme à pente d'énergie constante et à rugosité constante doit peu varier (Formule de Manning Strickler).

Graph 1: Rhône à Beaucaire. Jaugeages 1992-2003



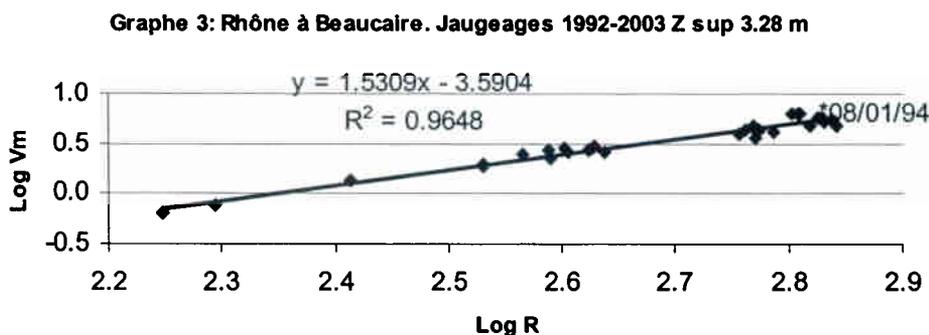
On constate que l'hypothèse précédente est loin d'être respectée et qu'il y a pour des mêmes rayons hydrauliques des écarts de 10% environ entre les valeurs. Les points les plus hauts correspondent aux jaugeages de 1994.

Graphe 2 : $V_m=f(R)$



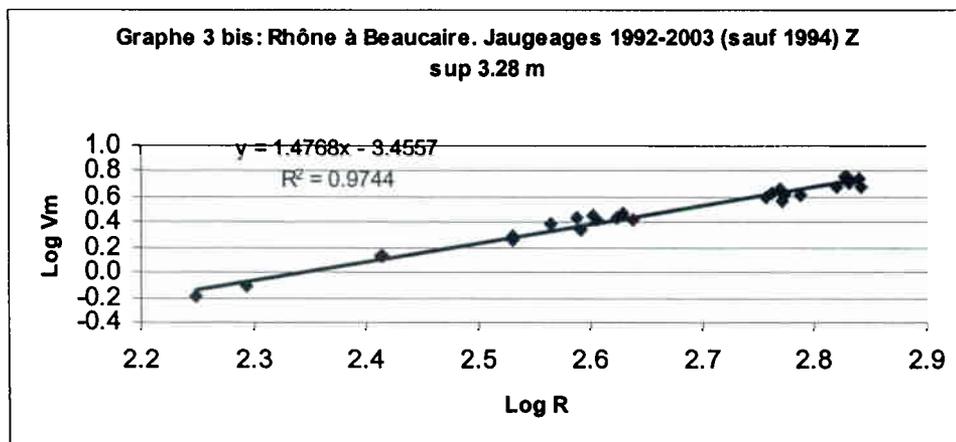
On retrouve évidemment les points précédents écartés d'une ligne moyenne.

Graphe 3 : $\text{Log}(V_m)=\text{Log}(R)$ Ce graphe est intéressant car, dans l'hypothèse de Manning Strickler : $Q/A=V_m=1/n \cdot R^{2/3} J^{1/2}$ n rugosité, J pente d'énergie. En traçant $\text{Log}(V_m)$ en fonction de R, si n et J sont constants, on devrait retrouver comme pente cette puissance de 2/3.



On retrouve bien évidemment les jaugeages de 1994 au dessus de la droite et le fait que l'on est loin de l'hypothèse de Strickler. La pente de la droite qui correspond en variables brutes à la puissance à affecter à R ressemble à la valeur de l'équation d'un déversoir où R serait la hauteur amont au dessus du seuil. La corrélation est bonne mais on a des points dans une très large gamme de Log R.

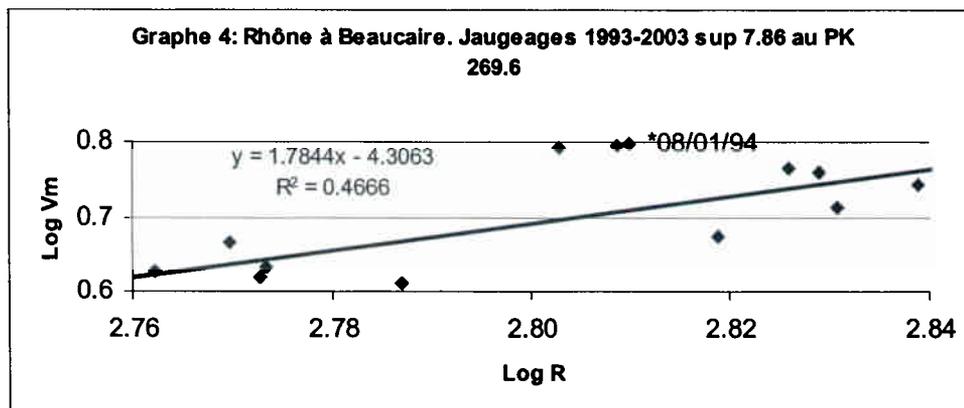
Graphe 3 Bis : le même que précédemment mais sans prendre en compte les jaugeages de 1994.



La corrélation augmente significativement mais le coefficient de régression reste voisin.

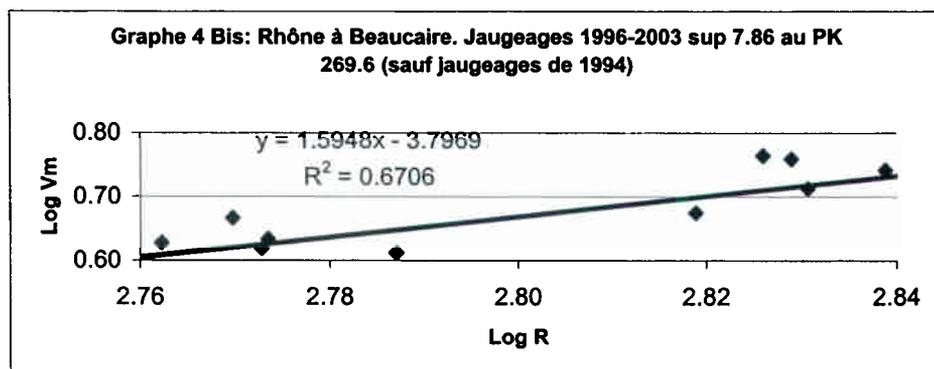
Etude des jaugeages de forts débits :

Graphe 4 : $\text{Log}(V_m) = f(\text{Log}(R))$ pour $Z > 9$ m



On retrouve bien les 3 points de 1994 les plus éloignés de la droite moyenne.

Graphe 4 bis : $\text{Log}(V_m) = f(\text{Log}(R))$ pour $Z > 9$ m (sauf les jaugeages de 1994)



Le nuage de points est évidemment beaucoup moins étalé autour de la droite des moindres carrés et le coefficient de régression décroît un peu.

Recommandations :

Compte tenu des remarques hydrauliques précédentes, il nous semble important d'analyser, même de façon simplifiée, les conditions d'écoulement du Rhône à Beaucaire en fort débit afin de répondre aux questions suivantes :

- L'écoulement à Beaucaire peut-il pour une même hauteur être différent d'une crue à l'autre et dans quelle proportion ?..
- Si l'on peut raisonnablement (avec semble-t-il une précision relative de 5%) avoir une liaison hauteur débit moyenne à Beaucaire, peut-on améliorer cette précision en tenant compte simplement de niveaux amont et aval ?.
- Enfin, quelle est l'influence du régime non permanent.

TABLEAU 1

DATE	HEURE DE LA MESURE		Z NGF [1]	DEBITS en m3/s		SECTION MOUILLEE jaugage en m²	A en l	Vm en l	Pér. Est. en s	R est. en 1	DEBITS en m3/s		Q/A*R ^{2/3}	LN(Vm)	Ln(R)
	Début	Fin		Total	Q						Total	Q			
18/10/03	10h45	11h35	0.86	434	1804	1874	0.23	265	7.08	434	0.063	-1.46	1.96		
18/10/03	11h35	12h15	0.87	522	1807	1877	0.28	265	7.09	522	0.075	-1.28	1.96		
06/08/92	14h05	16h05	1.39	928	1055	2027	0.46	267	7.60	928	0.118	-0.78	2.03		
23/03/94	10h40	12h15	3.25	1974	1615	2580	0.77	274	9.43	1974	0.171	-0.27	2.24		
23/03/94	12h20	12h40	3.28	1974	1615	2589	0.76	274	9.46	1974	0.170	-0.27	2.25		
23/03/94	14h43	15h47	3.29	2128	1625	2592	0.82	274	9.47	2128	0.183	-0.20	2.25		
05/11/92	14h55	16h30	3.73	2437	1688	2727	0.89	275	9.91	2437	0.194	-0.11	2.29		
24/02/95	10h40	12h00	5.00	3532	2110	3123	1.13	280	11.16	3532	0.226	0.12	2.41		
24/02/95	9h00	10h30	5.01	3570	2110	3126	1.14	280	11.17	3570	0.229	0.13	2.41		
18/11/92	10h20	12h00	6.40	4657	2413	3574	1.30	285	12.55	4657	0.241	0.26	2.53		
18/11/92	12h15	12h45	6.40	4748	2417	3574	1.33	285	12.55	4748	0.246	0.28	2.53		
24/09/93	10h50	12h55	6.85	5502	2529	3722	1.48	286	12.99	5502	0.268	0.39	2.56		
*14/10/93	9h20	10h00	7.17	5950	3742	3828	1.55	288	13.31	5950	0.277	0.44	2.59		
24/11/92	10h35	12h30	7.20	5407	2590	3838	1.41	288	13.34	5407	0.251	0.34	2.59		
24/11/92	12h35	12h50	7.20	5435	2590	3838	1.42	288	13.34	5435	0.252	0.35	2.59		
*14/10/93	10h05	12h00	7.35	6093	3801	3888	1.57	288	13.49	6093	0.277	0.45	2.60		
24/09/93	14h50	16h25	7.40	5930	2680	3904	1.52	288	13.54	5930	0.267	0.42	2.61		
14/10/93	15h40	16h00	7.65	6178	2871	3988	1.55	289	13.78	6178	0.269	0.44	2.62		
24/09/93	16h55	17h10	7.70	6278	2758	4005	1.57	290	13.83	6278	0.272	0.45	2.63		
24/09/93	17h10	17h25	7.72	6423	2764	4012	1.60	290	13.85	6423	0.278	0.47	2.63		
06/10/93	16h20	17h35	7.85	6148	2763	4056	1.52	290	13.98	6148	0.261	0.42	2.64		
06/10/93	17h40	17h55	7.86	6187	2763	4059	1.52	290	13.99	6187	0.263	0.42	2.64		
09/10/93	13h00	14h20	9.64	8552	3485	4672	1.83	297	15.76	8552	0.291	0.60	2.76		
09/10/93	15h15	17h00	9.72	8805	3519	4700	1.87	297	15.84	8805	0.297	0.63	2.76		
*10/10/93	11h45	12h20	9.84	9233	4637	4742	1.95	297	15.95	9233	0.307	0.67	2.77		
04/12/03	16h55		9.85	8334	4810	4745	1.76	297	15.96	8334	0.277	0.56	2.77		
10/10/93	9h20	10h45	9.89	8839	3574	4760	1.86	297	16.00	8839	0.292	0.62	2.77		
10/10/93	8h40	9h10	9.90	8978	3592	4763	1.88	297	16.01	8978	0.297	0.63	2.77		
04/12/2003			10.12	8929		4841	1.84	298	16.23	8929	0.288	0.61	2.79		
*08/01/94	15h20	16h30	10.38	10883	4940	4933	2.21	299	16.49	10883	0.341	0.79	2.80		
*08/01/94	11h15	12h15	10.48	10984	4976	4969	2.21	300	16.59	10984	0.340	0.79	2.81		
*08/01/94	10h00	11h00	10.50	11029	4983	4976	2.22	300	16.61	11029	0.340	0.80	2.81		
04/12/2003			10.65	9874		5030	1.96	300	16.76	9874	0.300	0.67	2.82		
03/12/2003			10.77	10881		5073	2.15	301	16.88	10881	0.326	0.76	2.83		
03/12/2003			10.82	10863		5091	2.13	301	16.93	10863	0.324	0.76	2.83		
04/12/2003			10.85	10401		5101	2.04	301	16.96	10401	0.309	0.71	2.83		
04/12/2003			10.99	10810		5152	2.10	301	17.09	10810	0.316	0.74	2.84		
03/12/03	11h35		11.03	10184	5103	5166	1.97	302	17.13	10184	0.297	0.68	2.84		
		Min	0.86	434	1055	1874	0.23	265	7.08	434	0.063				
		Max	11.03	11029	5103	5166	2.22	302	17.13	11029	0.341				