



COMPAGNIE NATIONALE DU RHÔNE

**EXPERTISE SUR L'ÉVALUATION DU DÉBIT DE LA CRUE DU
RHONE DE DECEMBRE 2003**

JUIN 2005

M. LANG, B. CHASTAN, E. RENOUF

Cemagref
U.R Hydrologie-Hydraulique
3 bis quai Chauveau
69336 Lyon cedex 09

Tél. : 04 72 20 87 82
Fax : 04 78 47 78 75
lang@lyon.cemagref.fr

RESUME

Ce rapport, réalisé à la demande de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), présente une analyse critique de l'évaluation du débit de la crue du Rhône à Beaucaire, en décembre 2003. Il comporte quatre parties : **la première commente l'estimation des incertitudes des jaugeages en crue**, qui est située selon un rapport du CETIAT (2005) dans une fourchette de 5 à 14% pour les mesures au moulinet et 6 à 7 % pour les jaugeages à l'ADCP. Ces valeurs apparaissent valides pour les débits de faible crue, mais certainement sous-estimées en période de forte crue.

La seconde partie passe en revue les jaugeages effectués lors des crues de 1993, 1994, 1996, 2000, 2002 et 2003. Les valeurs mesurés n'appellent pas de remarques particulières, sauf pour les jaugeages de septembre 2002 (phase de décrue marquée avec un effet d'hystérésis possible sur la courbe de tarage), d'octobre 1993 (sur-estimation du débit non jaugé s'écoulant dans le lit majeur), janvier 1994 (contrôle de cohérence hydraulique non vérifié) et décembre 2003 (élimination de deux jaugeages sommaires de surface).

La troisième partie s'intéresse aux effets possibles de dragages compensatoires réalisés en 1997-98 à l'occasion des travaux de construction du nouveau pont de Beaucaire. On note la présence d'excavations en aval de la station de Beaucaire, d'environ 2m sur un tronçon de près de 500 m. **L'abaissement modélisé de la ligne d'eau reste très faible, de l'ordre de 2 cm, et ne peut expliquer une éventuelle modification de la courbe de tarage à Beaucaire.**

La dernière partie traite de l'extrapolation de la courbe de tarage pour le calcul du débit de la crue du 3 au 4 décembre 2003. Le tracé retenu par la CNR début 2005 utilise une courbe moyenne passant par la majorité des intervalles d'incertitude sur les jaugeages. Il conduit à une valeur de 12 500 m³/s, composée d'un débit de 12 000 m³/s obtenu à l'aide de la courbe de tarage (cote maximale de 11.3 m) et d'un débit supplémentaire de 500 m³/s prenant en compte l'effet d'abaissement de la ligne d'eau provoqué par une brèche dans les digues de Fourques (-15 à -25 cm). Nous avons repris le tracé de la courbe de tarage en excluant les jaugeages de septembre 2002 et janvier 1994, et en corrigeant les valeurs d'octobre 1993. Le débit associé à la cote 11.3m est égal à 11 450 m³/s. Si l'on retient l'estimation de la CNR d'un abaissement de 20 cm dû à la brèche de la digue de Fourques, **le débit maximal de la crue de décembre 2003 relatif à une cote de 11.5 m serait de 11 800 m³/s. L'incertitude finale sur cette estimation est de l'ordre de 10%**, ce qui reste remarquablement faible pour un événement de ce type.

Le tracé retenu par la CNR début 2005 apparaît comme un bon compromis pour les prochaines crues, sachant que la dispersion des jaugeages sur la courbe de tarage est à attribuer à un fonctionnement hydraulique complexe, avec une forte variabilité des conditions de propagation des crues. **Le calcul d'incertitude sur la courbe de tarage des prochaines crues conduit à une valeur de 15 à 20%.** Il est donc essentiel de poursuivre les jaugeages en crue, pour réduire cette incertitude, comme cela a été le cas lors de l'événement de décembre 2003.

SOMMAIRE

1	Objet de l'expertise.....	3
2	Estimation des incertitudes des jaugeages en crue au moulinet et par la méthode ADCP	4
2.1	Jaugeages au moulinet.....	4
2.2	Jaugeages à l'ADCP.....	5
3	Analyse des jaugeages sur le Rhône à Beaucaire, pour les plus fortes crues.....	7
3.1	Jaugeages de novembre 1996 et novembre 2000.....	10
3.1.1	Jaugeages de novembre 1996.....	10
3.1.2	Jaugeages de novembre 2000.....	10
3.2	Jaugeages de septembre 2002.....	11
3.3	Jaugeages de novembre 2002 et décembre 2003.....	11
3.3.1	Jaugeages de novembre 2002.....	11
3.3.2	Jaugeages de décembre 2003.....	12
3.4	Jaugeages d'octobre 1993 et janvier 1994.....	12
3.4.1	Jaugeages d'octobre 1993.....	12
3.4.2	Jaugeages de janvier 1994.....	15
4	Etude des influences possibles sur la courbe de tarage d'excavations à l'aval de Beaucaire.....	18
4.1	Données topographiques.....	18
4.2	Données hydrauliques.....	19
4.3	Résultats de la modélisation hydraulique.....	20
4.4	Conclusion.....	22
5	Calcul d'incertitude sur la partie haute de la courbe de tarage du Rhône à Beaucaire.....	23
5.1	Evénement de décembre 2003.....	23
5.2	Estimation du débit des prochaines crues.....	25

1 Objet de l'expertise

La CNR assure la gestion d'un réseau hydrométrique de plus de 150 stations de mesure sur le Rhône et ses affluents. Elle a mis en place une démarche qualité pour l'évaluation des débits, basée sur une double approche hydrologique et hydraulique. Cette procédure a été appliquée pour l'estimation du débit de pointe de la crue du Rhône de décembre 2003, une des plus fortes crues connues à ce jour. Elle a fait l'objet d'un rapport intitulé « *Connaissance et appréciation des débits du Rhône. Evaluation des débits de la crue de décembre 2003, rapport préliminaire* » de janvier 2005.

La CNR souhaite avoir un retour scientifique externe sur ce rapport, d'une part pour mieux apprécier la pertinence des évaluations faites, et d'autre part, pour progresser, s'il y a lieu, dans la démarche qualité d'évaluation des débits.

A cette fin, le Cemagref propose de faire une relecture critique du rapport pré-cité et d'analyser plus spécifiquement certains éléments ayant permis son élaboration :

- Estimation des incertitudes des jaugeages en crue au moulinet et par la méthode ADCP ;
- Analyse des jaugeages sur le Rhône à Beaucaire, pour les dix plus fortes crues ;
- Etude hydraulique des influences possibles d'excavations sur la courbe de tarage ;
- Calcul d'incertitude sur la partie haute de la courbe de tarage du Rhône à Beaucaire.

2 Estimation des incertitudes des jaugeages en crue au moulinet et par la méthode ADCP

La CNR a confié au Centre Technique des Industries Aérouliques et Thermiques (CETIAT) une étude intitulée « Estimation des incertitudes de mesure des débits issus d'un jaugeage au moulinet ou à l'ADCP ». La version 6, en date de mars 2005, évalue l'incertitude de mesure des débits :

- pour les jaugeages au moulinet réalisés en explorant la totalité de la section d'écoulement :
5% d'erreur (avec 6 points par verticale pour 20 à 30 verticales)
- pour les jaugeages au moulinet avec une mesure par verticale à une distance d de la surface :
8% d'erreur ($d = 0.6 h$, où h est la profondeur totale)
8 à 14% d'erreur ($d = 0.2 m$)
- pour les jaugeages à l'ADCP :
6 à 7% d'erreur

Nous commentons les résultats de cette étude.

2.1 Jaugeages au moulinet

Le mode de calcul des incertitudes est réalisé pour les jaugeages au moulinet à partir de deux normes. La première (NF ENV 748, janv. 2002) concerne la mesure des débits en canal à surface libre, la seconde (NF ENV 13005, août 1999) est plus générale et traite des incertitudes de mesure. Les deux normes conduisent à des résultats équivalents.

La valeur minimale d'incertitude de 5% annoncée pour les jaugeages au moulinet par exploration complète du champ de vitesses nous semble un peu optimiste pour les débits de crue. En effet, aucune incertitude supplémentaire n'a été rajoutée pour tenir compte de l'erreur liée au repérage en profondeur (cf. mesure de l'angle par rapport à la verticale du câble soutenant le saumon ; fonds mobile), à la mesure de vitesse (cf. stabilité du saumon pour de fortes vitesses d'écoulement), et à un dépouillement ne tenant pas compte d'un niveau variable en crue. Les deux premiers points pourraient être affinés par la CNR, en fonction de l'expérience de terrain des équipes de jaugeage. Le dernier point fait l'objet d'une recommandation spécifique de dépouillement dans la norme NF ENV 748, à exploiter.

Le mode de jaugeage avec un point par verticale vers le milieu de la profondeur ($d = 0.6h$) n'est pas pratiqué par la CNR, alors que le calcul d'incertitude montre un niveau d'erreur plus faible qu'avec un jaugeage en surface. Ceci s'explique par un temps opératoire plus important, pour positionner le saumon à la bonne profondeur, ce qui induit un risque d'endommagement du matériel de mesure lorsque le Rhône charrie des corps flottants.

Le mode de jaugeage en surface (20 cm) conduit à un niveau d'incertitude qui dépend de la qualité du coefficient de passage entre la vitesse en surface $V(0.2)$ et la vitesse moyenne V_{moy} de la section d'écoulement :

$$C2 = V(0.2) / V_{moy} \quad (1)$$

Une application sur le site de Beaucaire donne une valeur d'incertitude de $\pm 10\%$. Un point important à vérifier est l'absence de tendance du coefficient $C2$ avec le débit Q , la vitesse V_{moy} , ou la hauteur H . Aucune tendance significative n'est détectée, à partir d'un échantillon de 500 jaugeages sur 35 sites différents. Le choix de l'échelle des ordonnées des graphiques de l'annexe 11 et 13 du rapport CETIAT mériterait d'être modifié, pour éviter de trop « compacter » les points (cf. valeurs mini et maxi à prendre, au lieu de 0 et 1.2).

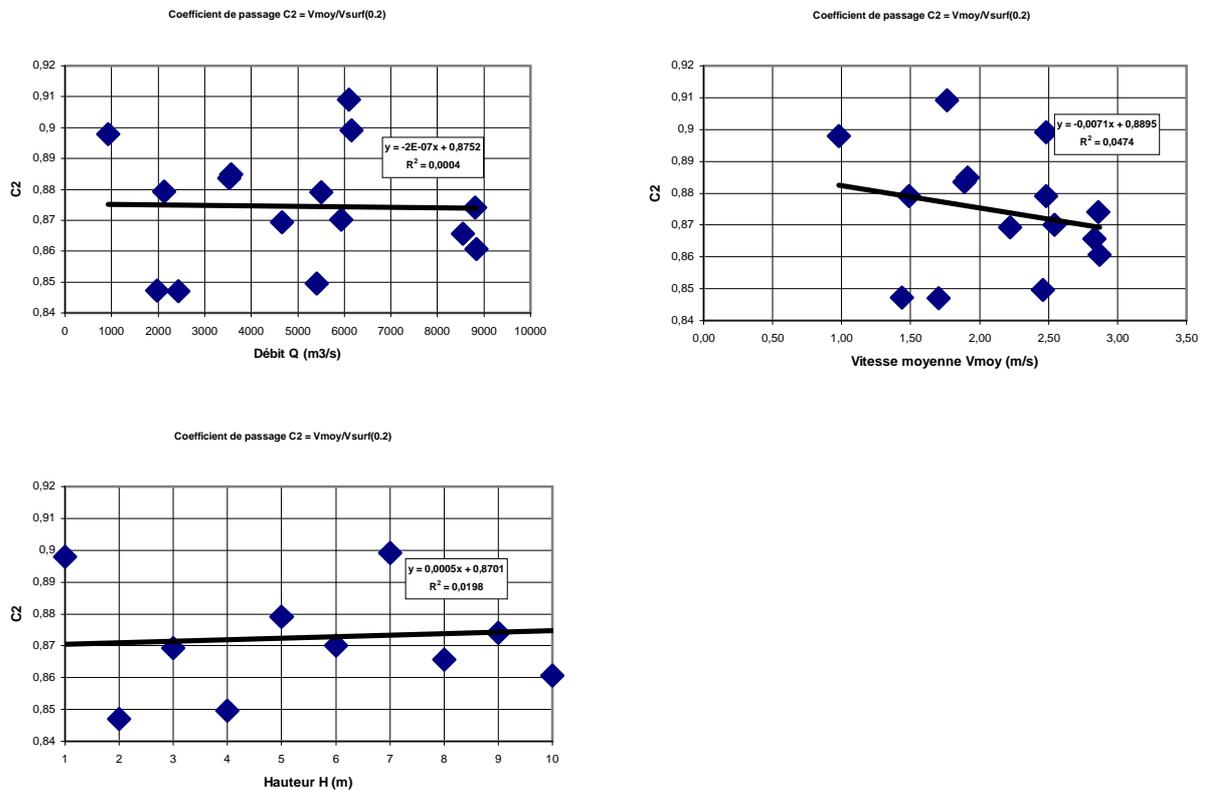


Figure 1 : Valeurs sur le Rhône à Beaucaire du coefficient de passage VitesseMoyenne / VitesseSurface en fonction du débit (a), de la vitesse moyenne (b), de la hauteur (c)

Nous avons vérifié sur le site de Beaucaire le comportement du coefficient $C2$, à partir d'un jeu de 15 jaugeages réalisés d'août 1992 à février 1995. Aucune tendance significative n'existe sur les trois graphiques de la figure 1. La valeur moyenne du coefficient est de 0.87 à 0.88, avec une faible dispersion (entre 0.85 et 0.91).

La valeur minimale d'incertitude de $\pm 10\%$ annoncée à Beaucaire pour les jaugeages au moulinet en surface nous semble correcte, avec toutefois la même réserve en crue que pour les jaugeages avec exploration complète du champ de vitesses (incertitudes à rajouter sur la profondeur de chaque verticale et la mesure de la vitesse).

2.2 Jaugeages à l'ADCP

Le mode d'estimation des incertitudes est différent, puisqu'il n'est pas possible d'utiliser facilement les normes précédentes. Celles-ci reposent sur l'hypothèse d'indépendance entre les différentes grandeurs intervenant dans le calcul du débit. Dans le cas de mesures par ADCP, l'effet des corrélations est plus important qu'avec les jaugeages au moulinet, avec une exploration fine de l'ensemble de la section d'écoulement. Le principe a été d'exploiter les jaugeages pour lesquels on dispose à la fois d'une mesure du débit par moulinet et par ADCP.

La correspondance, établie pour 19 mesures réparties sur 15 sites différents, est très bonne, avec un écart de 7%, du même ordre de grandeur que les incertitudes de mesure pour des jaugeages au moulinet (5%). L'écart entre les deux types de mesure étant fonction des incertitudes de chacune, il est possible d'en déduire l'incertitude de mesure de l'ADCP, de l'ordre de 5%.

Cette analyse nous semble concluante pour les débits courants, mais elle reste à valider en période de forte crue. En effet l'échantillon des 19 mesures disponibles (cf. annexe 14 du rapport CETIAT) ne contient qu'un événement avec une vitesse moyenne supérieure à 2 m/s, la valeur la plus courante étant plutôt de l'ordre de 1 m/s. Or les vitesses moyennes d'écoulement en crue sur le Rhône à Beaucaire sont de l'ordre de 2 à 3 m/s. Ce point mériterait d'être analysé dans le futur pour évaluer la sensibilité des mesures ADCP au mouvement du fonds du lit et à la présence de particules en suspension en période de crue.

Cette remarque ne remet pas en cause le fort intérêt des mesures ADCP, qui constituent une alternative prometteuse aux jaugeages au moulinet en période de crue. Cette technique permet de pouvoir effectuer rapidement une mesure : elle peut ainsi être répétée et vérifiée. D'où un gage de fiabilité, et un intérêt pratique évident en période de crue où la présence de corps flottants rend délicat le déroulement opératoire des jaugeages au moulinet. On trouvera dans Le Coz (2005)¹ une revue bibliographique sur la métrologie ADCP en rivière, qui indique notamment qu'un travail important de validation de cette technique a été réalisé aux Etats-Unis, avec maintenant plus de dix ans d'expérience. Une norme internationale ISO est en cours de préparation².

¹ Le Coz Jérôme (2005). Mesures par ADCP en rivières. In « Fonctionnement hydro-sédimentaire des bras morts de rivière alluviale ; cas des lônes de l'Ain et du Rhône ». Doctorat en cours , Cemagref Lyon, 2004-07, 28p.

² ISO 24154 Measurement of liquid flow in open channels : measuring river velocity and discharge by acoustic Doppler systems.

3 Analyse des jaugeages sur le Rhône à Beaucaire, pour les plus fortes crues

L'échelle limnimétrique de la station de Beaucaire est située juste en aval de la jonction entre la restitution du Vieux-Rhône (qui reçoit les apports du Gardon) et le canal de fuite de l'aménagement de Vallabrègues. Elle est située au PK 269.600. Une traîlle de jaugeage a été installée plus en aval, au PK 272.250, jusqu'en 1995 date à laquelle elle a été emportée par un bateau.

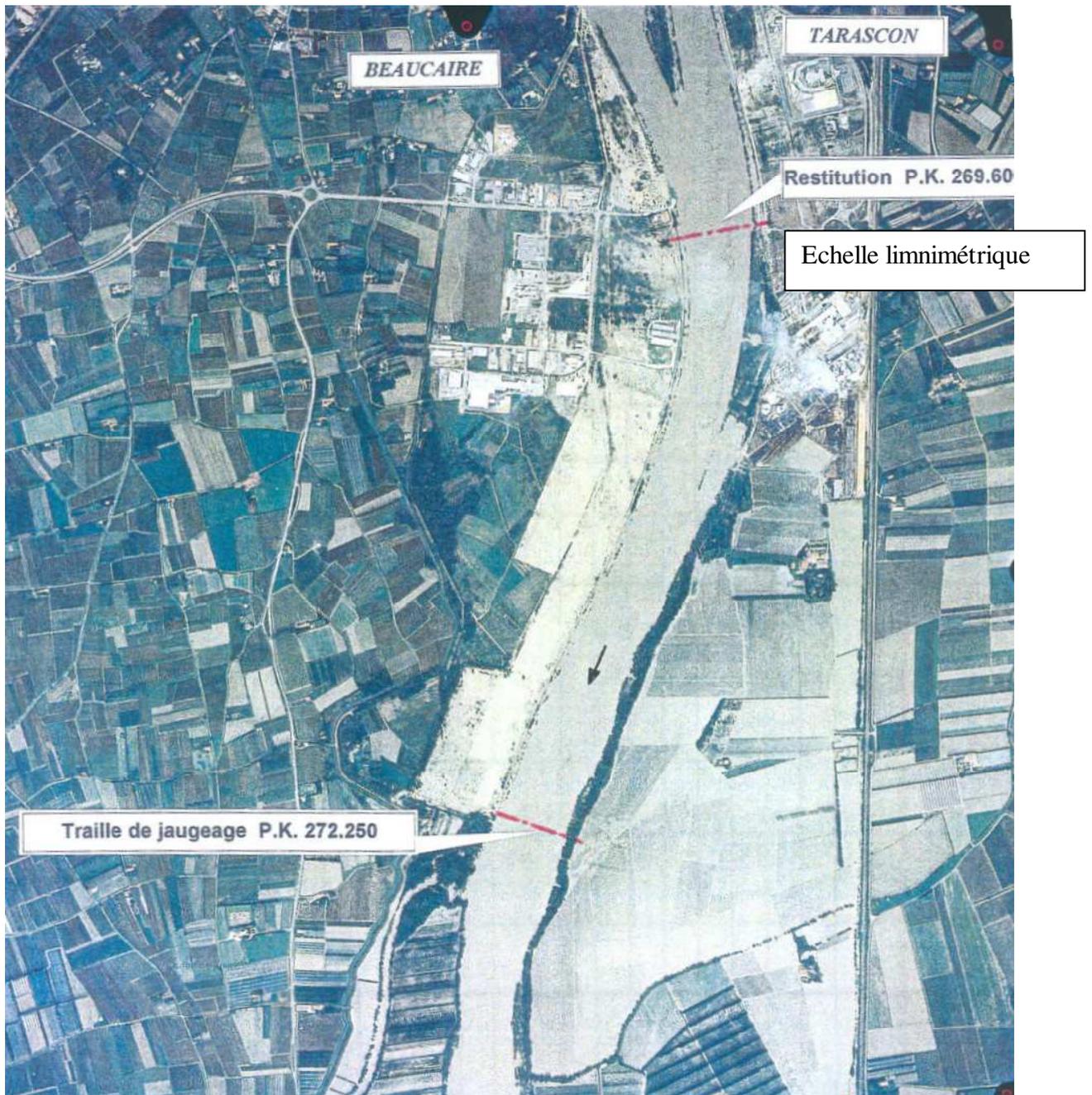


Figure 2 : Vue aérienne de situation de la station de Beaucaire sur le Rhône (document CNR)

On dispose d'une série de 113 jaugeages :

- 32 jaugeages au moulinet (du 06/08/1992 au 04/12/2003), effectués à la traîle de jaugeage, sauf pour 8 jaugeages réalisés pendant les crues d'octobre 1993, janvier 1994 et décembre 2003) au droit de l'échelle limnimétrique ;
- 81 jaugeages à l'ADCP (du 29/09/1994 au 04/12/2003) effectués au droit de l'échelle limnimétrique.

Le report de l'ensemble de ces mesures sur un graphique hauteur-débit (cf. figure 3) montre que l'on dispose de jaugeages sur toute la gamme de hauteurs, avec en particulier une très faible extrapolation de la courbe de tarage en crue (hauteur maxi jaugée à 11.1m pour une hauteur maximale à 11.3m). Globalement, les mesures par moulinet et à l'ADCP sont cohérentes, avec toutefois une plus grande dispersion des jaugeages au moulinet.

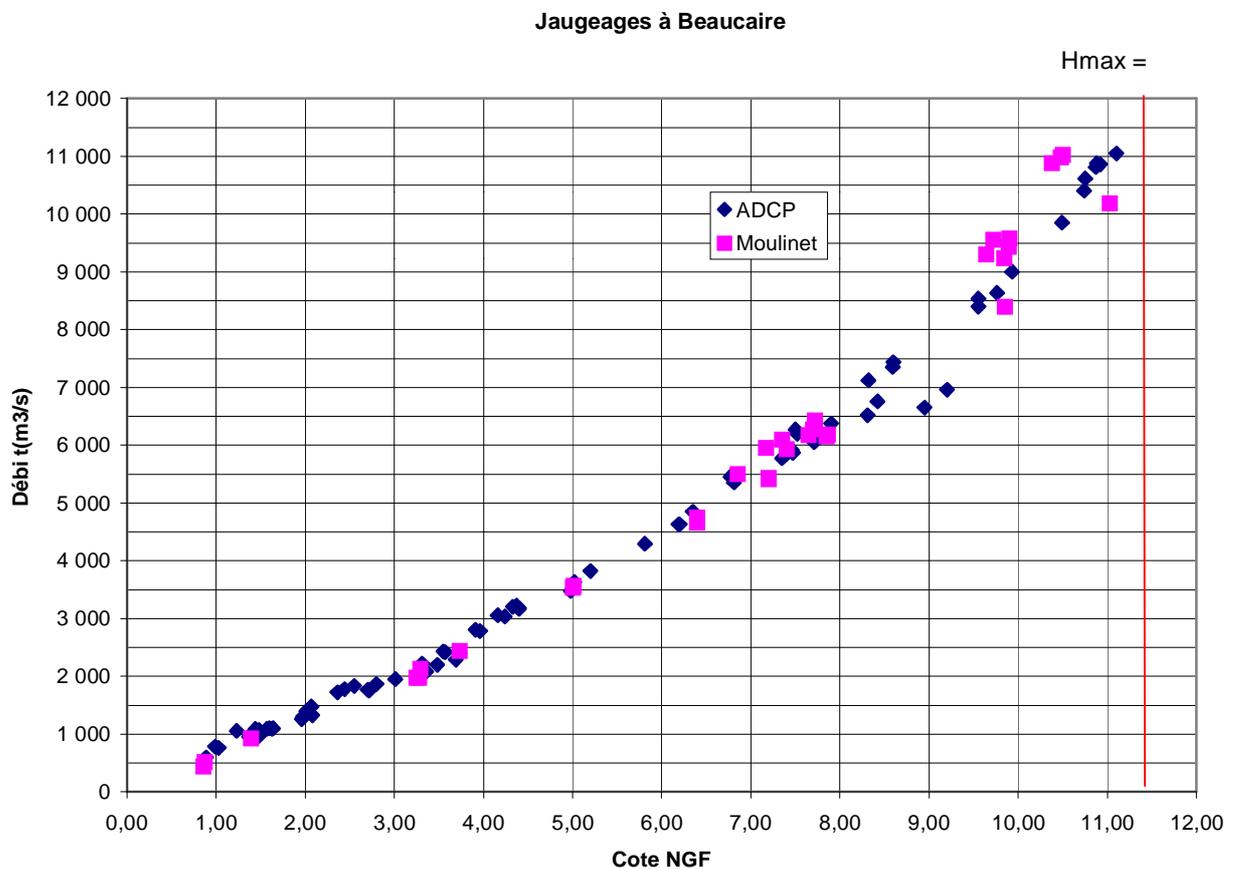


Figure 3 : Report des 140 jaugeages du Rhône à Beaucaire (période 1992-2003)

On note également sur la figure 4 une plus grande dispersion des jaugeages moulinet en surface qu'avec une exploration complète de la section. Les deux jaugeages de contrôle effectués lors de la crue de décembre 2003 se situent un peu en-dessous dans le nuage de points : ($H=11.03$; $Q= 10\ 184$ m³/s) le 3 décembre à 11h et ($H=9.85$; $Q= 8\ 394$ m³/s) le 4 décembre à 17h. Ils correspondent tous deux à une exploration simplifiée du champ de vitesses, avec une mesure en surface, et un nombre plus limité de verticales (respectivement 13 et 18, au lieu d'une quarantaine habituellement).

Jaugeages Moulinet

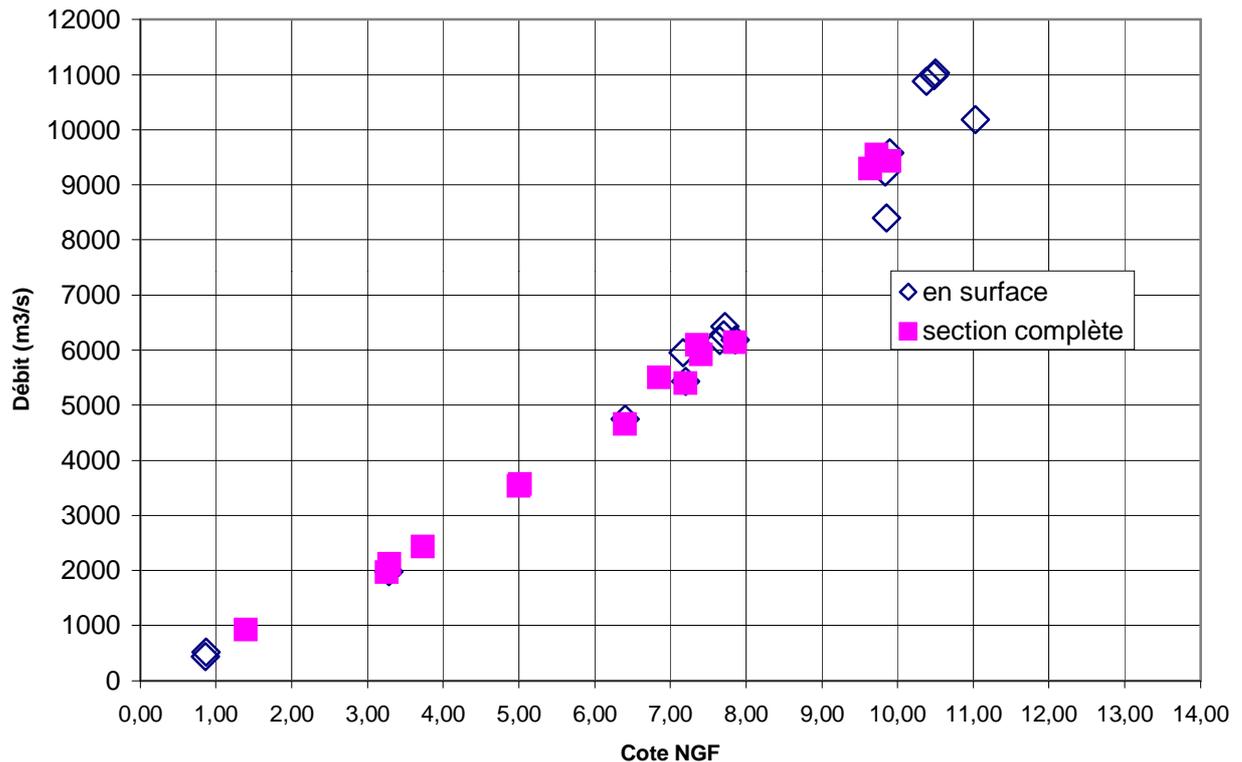


Figure 4 : Report des 32 jaugeages au moulinet sur le Rhône à Beaucaire (période 1992-2003)

Nous allons maintenant analyser la cohérence des plus forts jaugeages, et donner une interprétation des jaugeages manifestant un comportement particulier. Nous avons retenu un ajustement polynomial du second ordre sur les jaugeages de débit faible à moyen, avec une cote comprise entre 3 et 8 m, tous réalisés au droit de la traîle de jaugeage. On observe sur la figure 5 que les plus forts jaugeages (cote supérieure à 8m) peuvent être répartis en quatre ensembles :

- les jaugeages de novembre 1996 et novembre 2000, situés près de la cote 8m et dans la continuité de la courbe extrapolée ;
- 2 jaugeages de septembre 2002 , situés en-dessous de la courbe extrapolée ;
- les jaugeages de novembre 2002 et décembre 2003, situé un peu au-dessus de la courbe extrapolée ;
- les jaugeages d'octobre 1993 et janvier 1994 situés très au-dessus de la courbe extrapolée.

Report de l'ensemble des jaugeages réalisés à Beaucaire sur la période 1992-2003

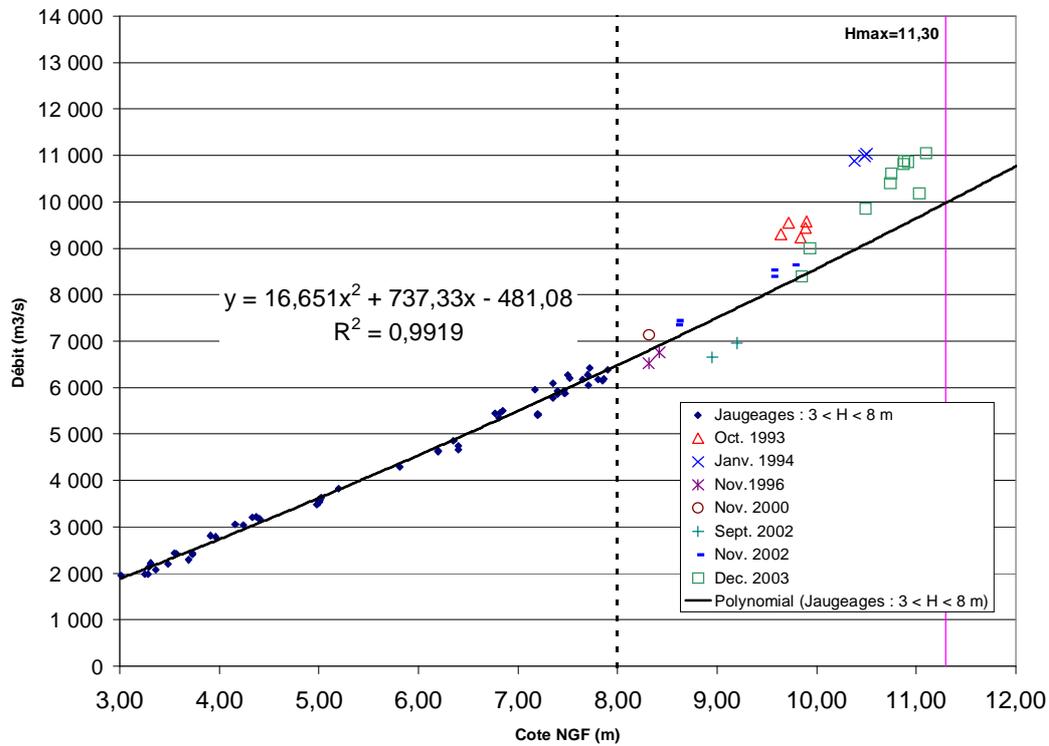


Figure 5 : Contrôle de cohérence des jaugeages sur le Rhône à Beaucaire (période 1992-2003)

3.1 Jaugeages de novembre 1996 et novembre 2000

3.1.1 Jaugeages de novembre 1996

Hmax = 9.45 m le 13/11/1996 à 22h.

Deux jaugeages ont été réalisés par ADCP le 14/11/1996 :

Heure Début	Heure Fin	Cote (m)	Débit (m3/s)	Commentaire
9h02	9h33	8.42	6759	Moyenne de 3 mesures
9h47	9h50	8.31	6520	Moyenne de 3 mesures

Les valeurs mesurées n'appellent pas de remarque particulière.

3.1.2 Jaugeages de novembre 2000

Hmax = 8.35 m le 24/11/2000 à 17h.

Un jaugeage a été réalisé par ADCP le 24/11/2000 :

Heure Début	Heure Fin	Cote (m)	Débit (m3/s)	Commentaire
16h58	17h20	8.32	7124	Moyenne de 3 mesures

La valeur mesurée n'appelle pas de remarque particulière.

3.2 Jaugeages de septembre 2002

Hmax = 10.27 m le 10/09/2002 à 2h.

Deux jaugeages ont été réalisés par ADCP le 10/09/2002 :

Heure Début	Heure Fin	Cote (m)	Débit (m3/s)	Commentaire
8h42	9h13	9.20	6961	Moyenne de 4 mesures
9h24	9h43	8.95	6652	Moyenne de 4 mesures

Il est mentionné par la CNR que ces deux jaugeages ont été effectués dans une phase de décrue marquée, avec une forte baisse du niveau. Ceci pourrait expliquer le fait que ces jaugeages sont situés sous la courbe extrapolée. En effet en régime transitoire avec des effets de propagation d'onde de crue, la courbe de tarage peut présenter un effet de boucle dans la phase crue-décrue. Une analyse hydraulique doit permettre d'évaluer si la configuration du site en aval de Beaucaire correspond plutôt au cas (a) de la figure 6 qu'au second cas (b). A ce stade d'analyse, nous avons considéré que ces deux jaugeages ne doivent pas être inclus pour l'établissement de la courbe de tarage.

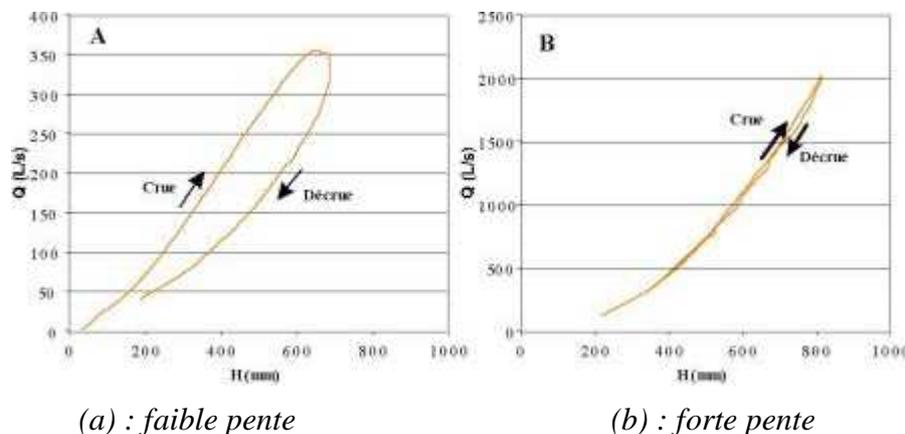


Figure 6 : Exemple de courbe de tarage (tiré de Benoist et Birgand, 2002)

3.3 Jaugeages de novembre 2002 et décembre 2003

3.3.1 Jaugeages de novembre 2002

Hmax = 9.57 m le 17/11/2002 à 14h ; Hmax = 10.12 m le 26/11/2002 à 9h.

Cinq jaugeages ont été réalisés par ADCP les 16, 18 et 27 /11/2002 :

Date	Heure Début	Heure Fin	Cote (m)	Débit (m3/s)	Commentaire
16/11/02	8h03	8h31	8,60	7435	Moyenne de 6 mesures
16/11/02	8h36	9h05	8,59	7353	Moyenne de 6 mesures
18/11/02	11h54	12h37	9,55	8537	Moyenne de 6 mesures
18/11/02	12h50	13h20	9,55	8399	Moyenne de 6 mesures
27/11/02	10h12	10h46	9,76	8637	Moyenne de 6 mesures

Les valeurs mesurées n'appellent pas de remarque particulière.

3.3.2 Jaugeages de décembre 2003

Hmax = 11.3 m le 04/12/2003 à 3h.

Dix jaugeages ont été réalisés au droit de l'échelle limnimétrique, dont deux au saumon en surface et huit jaugeages par ADCP, les 03 et 04 /12/2003 :

Date	Heure Début	Heure Fin	Cote (m)	Débit (m3/s)	Commentaire
03/12/03	9h11	9h37	10,88	10881	Moyenne de 6 mesures
03/12/03	9h49	10h39	10,92	10863	Moyenne de 8 mesures
03/12/03	12h14	12h49	11,10	11051	Moyenne de 6 mesures
04/12/03	11h53	12h54	10,75	10614	Moyenne de 8 mesures (avec GPS)
04/12/03	11h02	11h35	10,87	10810	Moyenne de 6 mesures
04/12/03	12h04	12h51	10,74	10401	Moyenne de 5 mesures (avec GPS)
04/12/03	13h22	14h12	10,49	9851	Moyenne de 6 mesures (*)
04/12/03	16h10	16h46	9,93	9001	Moyenne de 8 mesures (*)
03/12/03	11h35	?	11,03	10184	Moulinet en surface (C2=0.95)
04/12/03	16h55	?	9,85	8394	Moulinet en surface (C2=0.95)

(*) avec système de repérage spatial Btm

Les valeurs mesurées n'appellent pas de remarque particulière.

Le déversement en rive gauche dans le secteur de Beaucaire a été bien plus étendu que celui constaté pour les crues d'octobre 1993 et janvier 1994. L'origine de cette extension plus importante vient d'une part d'une cote plus élevée dans le Rhône (cote maximale de 11.30 m au lieu de 9.90 m et 10.50 m) et d'autre part de ruptures de trémies sous la voie SNCF (dans la nuit du 3 au 4 décembre) qui ont occasionné le remplissage d'un casier supplémentaire, de près de 9 km de long et 3km de large.

3.4 Jaugeages d'octobre 1993 et janvier 1994

3.4.1 Jaugeages d'octobre 1993

Hmax = 9.90 m le 10/10/1993 à 7h.

Quatre jaugeages ont été réalisés au saumon au droit de la traille de jaugeage, et un au droit de l'échelle limnimétrique, les 09 et 10/10/1993. Une partie du débit s'écoulait en rive gauche, par déversement au-dessus de la crête de digue sur une distance d'environ 1500 m, en aval de la station limnimétrique, mais en particulier au niveau de la traille de jaugeage. Le débit détourné ne revenait complètement dans le lit mineur que plus loin en aval, au niveau du PK 279.

Date	Heure Début	Heure Fin	Cote (m)	Débit (m3/s)	Commentaire
09/10/93	13h00	14h20	9,64	9302	Rajout 750 m3/s
09/10/93	15h15	17h00	9,72	9555	Rajout 750 m3/s
10/10/93	8h40	9h10	9,90	9578	Rajout 600 m3/s Moulinet en surface (C2=0.88)
10/10/93	9h20	10h45	9,89	9439	Rajout 600 m3/s
10/10/93	11h45	12h20	9,84	9233	Jaugeage station limnimétrique (sans déversement rive gauche) Moulinet en surface (C2=0.91)

La CNR a retenu un coefficient $C2$ de passage de la vitesse de surface à la vitesse moyenne qui est différent entre les deux mesures du 10/10/1993 (respectivement 0.88 et 0.91), car les deux sections de jaugeage sont différentes. Pour la première, la CNR a repris la valeur issue d'une analyse des jaugeages faits précédemment à la traille (cf. section 2.1 du présent rapport). Pour la seconde, située vers la station limnimétrique, la CNR a effectué un jaugeage de contrôle 4 jours plus tard (le 14/10/1993) qui a donné la valeur $C2 = 0.91$.

Le débit de déversement a été estimé pour le 09 octobre d'après la hauteur de déversement (0.7 à 1.0 m) et une estimation de la vitesse (0.5 m/s), soit un débit compris entre 525 et 750 m³/s. Le 10 octobre, une mesure a été réalisée au droit de la station limnimétrique, ce qui permet de recouper l'estimation du débit de déversement. On a en effet les informations suivantes :

- débit jaugé entièrement vers 12h, au niveau de la station hydrométrique (PK = 269.600) : $Q = 9233$ m³/s pour une cote à l'échelle de Beaucaire de 9.84m, sans déversement ;
- débit jaugé vers 10h à 8839 m³/s, au niveau de la traille de jaugeage (PK = 272.250), et estimé (compte-tenu du débordement en rive gauche) à : $Q = 9439$ m³/s pour une cote à l'échelle de Beaucaire de 9.89m.

Suivant l'hypothèse de courbe de tarage retenue, avec la courbe CNR ou la courbe proposée par Duband et Bois ³, un écart de 5 cm dans cette gamme de hauteur correspond à 60 ou 90 m³/s (cf. tableau suivant).

H (m)	Q(courbe CNR) (m ³ /s)	Q(courbe Duband-Bois) (m ³ /s)
9.75	9500	8883
10.00	9950	9199
$\Delta Q/Q$ pour 5 cm	90	60

Le débit équivalent pour une cote de 9.89m est égal à : $Q = 9233 + (60 \text{ à } 90 \text{ m}^3/\text{s}) = 9293 \text{ à } 9323 \text{ m}^3/\text{s}$. **Le débit de déversement semble donc surévalué le 10/10/93 de 120 à 150 m³/s** ($9439 - 9323$; $9439 - 9293$). Nous retiendrons pour le 10/10/1993 un débit de déversement de 450 m³/s, au lieu de 600 m³/s.

Par ailleurs, il est assez surprenant que le débit de déversement de 750 m³/s, estimé le 09/10/93 pour une cote de 9.64 à 9.72m, soit supérieur à celui de 600m³/s estimé le 10/10/93 avec une cote de 9.90m. Une explication pourrait être que le lit majeur en rive gauche ait eu un niveau suffisamment bas le 09/10/1993 pour que le déversement se soit effectué en régime dénoyé (i.e débit fonction uniquement de la cote en amont), alors que le déversement serait passé en régime noyé le lendemain, après remplissage du casier. Dans cette configuration, le débit de déversement pourrait être plus fort le premier jour que le second jour, malgré une cote plus basse dans le Rhône.

Cette hypothèse ne semble pas à retenir, lorsque l'on effectue un calcul sommaire sur l'état de remplissage de ce secteur. D'après les indications du rapport Cétiat (2005)⁴ en page 6, « la

³ cf. annexe 2 du rapport de l'IGE sur « la sécurité des digues du delta du Rhône : politique de constructibilité derrière les digues »

transition entre le lit mineur et le lit moyen du Rhône, en aval de la station de la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK = 269.600), se fait approximativement pour un débit de 7300 m³/s. Ce débit correspond à un niveau proche de 8.50m NGF (ortho) au PK 269.600 ». La figure 7 montre que le lit majeur en rive gauche a dû se remplir près de 24h avant les jaugeages.

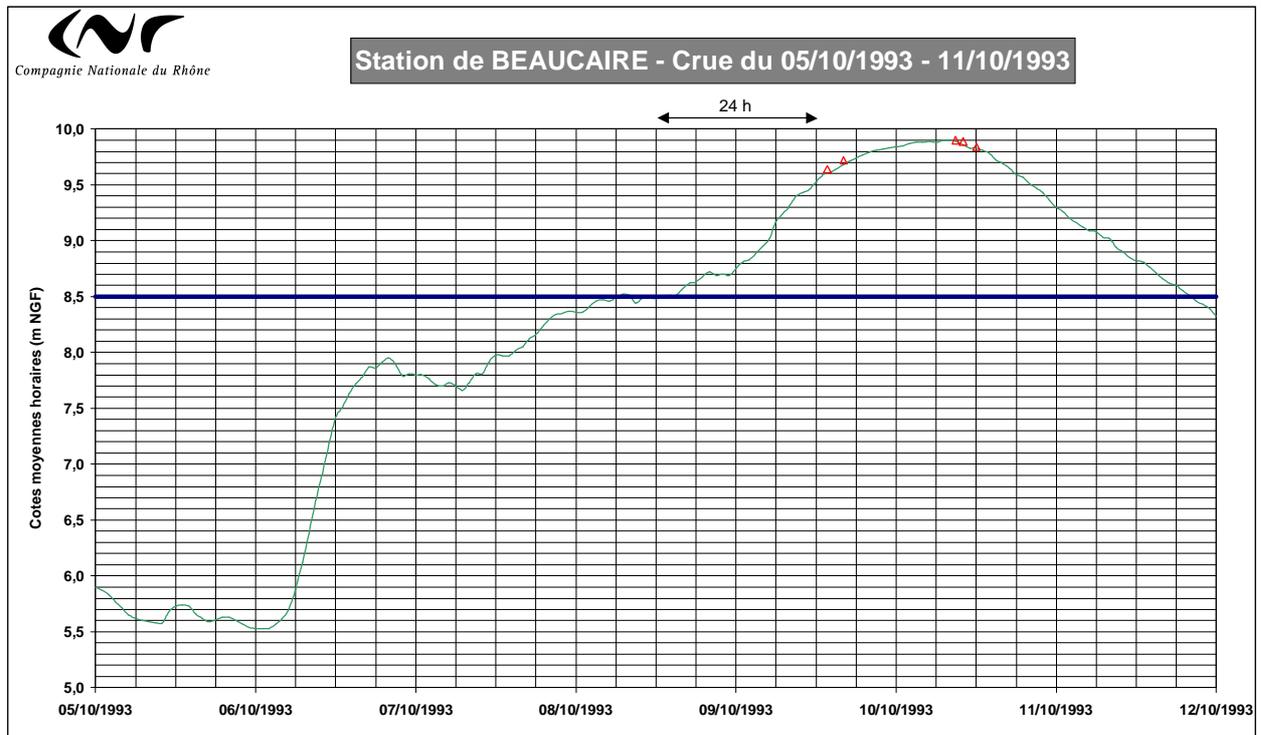


Figure 7 : Période antérieure de submersion du lit majeur en aval de la station de Beaucaire

On peut estimer que la différence de débit au-delà de ce seuil se répartit approximativement à 80% dans le lit mineur et 20% dans le lit majeur rive gauche :

$$450/(9300-7300) = 0.23 \text{ soit environ } 20\% \text{ (et } 80\% \text{ dans le lit majeur).}$$

Le volume d'eau ayant débordé dans le lit majeur pendant les 24h qui ont précédé les jaugeages est alors :

$$V = \frac{1}{2} \times 24(\text{h}) \times 3600(\text{s}) \times (9300-7300) (\text{m}^3/\text{s}) \times 20\% = 17.28 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

En l'absence de retour du débit au Rhône, ceci correspond à une hauteur d'eau dans le secteur rive gauche (9 km x 1 km) de :

$$H = V / 910^6 \approx 2 \text{ m.}$$

qui semble suffisante pour écarter l'hypothèse d'un régime dénoyé le premier jour.

⁴ Cetiati (2005). Estimation des incertitudes des débits annoncés par utilisation des courbes Q=f(h) et des mesures de niveau. Rapport d'étude N° 2460059, 57p.

Le fonctionnement réel de ce secteur ne peut être correctement appréhendé que par modélisation hydraulique, avec un bilan dynamique sur les écoulements. En l'état, nous retiendrons un débit de 450 m³/s à rajouter au débit jaugé dans le lit mineur du Rhône pour les deux jaugeages du 09/10/1993 et les deux jaugeages du 10/10/1993.

Les valeurs à reporter sur la courbe de tarage sont donc les suivantes :

Date	Heure Début	Cote (m)	Débit (m3/s)
09/10/93	14h	9.64	9302 - 750 + 450= 9002
09/10/93	16h	9.72	9555 - 750 + 450= 9255
10/10/93	9h	9.90	9578 -600+450= 9428
10/10/93	10h	9.89	9439 -600+450= 9289
10/10/93	12h	9.84	9233 (totalité du débit jaugé)

3.4.2 Jaugeages de janvier 1994

Hmax = 10.47 m le 08/01/1994 à 7h.

Trois jaugeages ont été réalisés au saumon au droit de l'échelle limnimétrique, le 08/01/1994. La carte du champ d'inondation de la crue montre un déversement en rive gauche analogue à celui de la crue d'octobre 1993.

Date	Heure Début	Heure Fin	Cote (m)	Débit (m3/s)	Commentaire
08/01/94	10h00	11h00	10,50	11029	Moulinet en surface (C2=0.91)
08/01/94	11h15	12h15	10,48	10984	Moulinet en surface (C2=0.91)
08/01/94	15h20	16h30	10,38	10883	Moulinet en surface (C2=0.91)

On note une faible erreur dans le relevé des cotes des deux premiers jaugeages (10.5 m et 10.48 m), qui sont supérieures au maximum de la crue (10.47 m).

L'étude faite par P. Bois ⁵ (oct. 2004) a mis en évidence que les trois jaugeages ont un comportement bien différent des autres, lorsque l'on analyse la relation entre la vitesse moyenne V_{moy} et le rayon hydraulique R_H . Dans l'hypothèse de Manning-Strickler, ces deux variables sont reliées par la relation :

$$V_{moy} = K (R_H)^{2/3} i^{1/2} \text{ où } K \text{ est le coefficient de Strickler et } i \text{ la pente d'énergie.}$$

Le report des points sur un graphique $\text{Ln}(V_{moy}) = f(\text{Ln}R_H)$ donne une indication sur l'homogénéité des différents jaugeages. Nous avons exploité les formules de calcul de la section mouillée Sm (en m²) et du périmètre mouillé Pm (en m), données par la CNR au droit de la station limnimétrique de Beaucaire :

$$Sm = 315.82 * H + 1135.5 \quad Pm = 4.6002 * H + 285.03 \quad \text{où } H \text{ est la cote échelle.}$$

⁵ cf. annexe 2 du rapport de l'IGE sur « la sécurité des digues du delta du Rhône : politique de constructibilité derrière les digues »

On voit bien sur la figure 8 une dispersion des points autour de la droite de régression (coefficient de détermination égal à 0.72), avec le plus fort écart pour les crues de septembre 2002, octobre 1993 et janvier 1994.

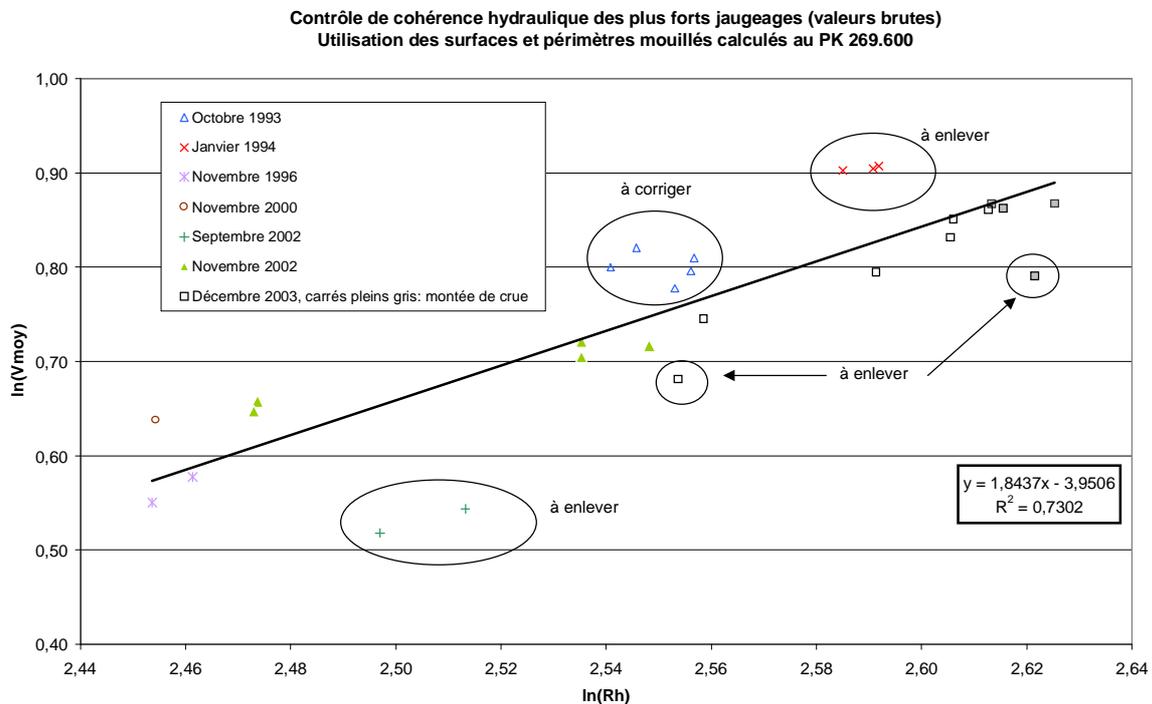


Figure 8 : Contrôle de cohérence hydraulique des plus forts jaugeages (valeurs brutes)

Compte-tenu de la critique précédente, nous enlevons de l'échantillon d'analyse :

- les jaugeages de septembre 2002 (effet d'hystérésis marqué suite à une phase de décrue) ;
- les deux jaugeages de contrôle au moulinet réalisés en décembre 2003 (mesure uniquement en surface, et sur un nombre limité de points) ;
- les jaugeages de janvier 1994 (incohérence hydraulique).

Nous corrigeons les jaugeages de la crue d'octobre 1993 (sur-estimation du débit de déversement). On s'aperçoit sur la figure 9 que la qualité de l'ajustement s'améliore (coefficient de détermination égal à 0.80), avec un comportement bien à part des jaugeages de la crue de janvier 1994. Une analyse complémentaire présentée en section 5.2 permettra de mieux interpréter le positionnement décalé des jaugeages de la crue de janvier 1994 par rapport aux autres jaugeages.

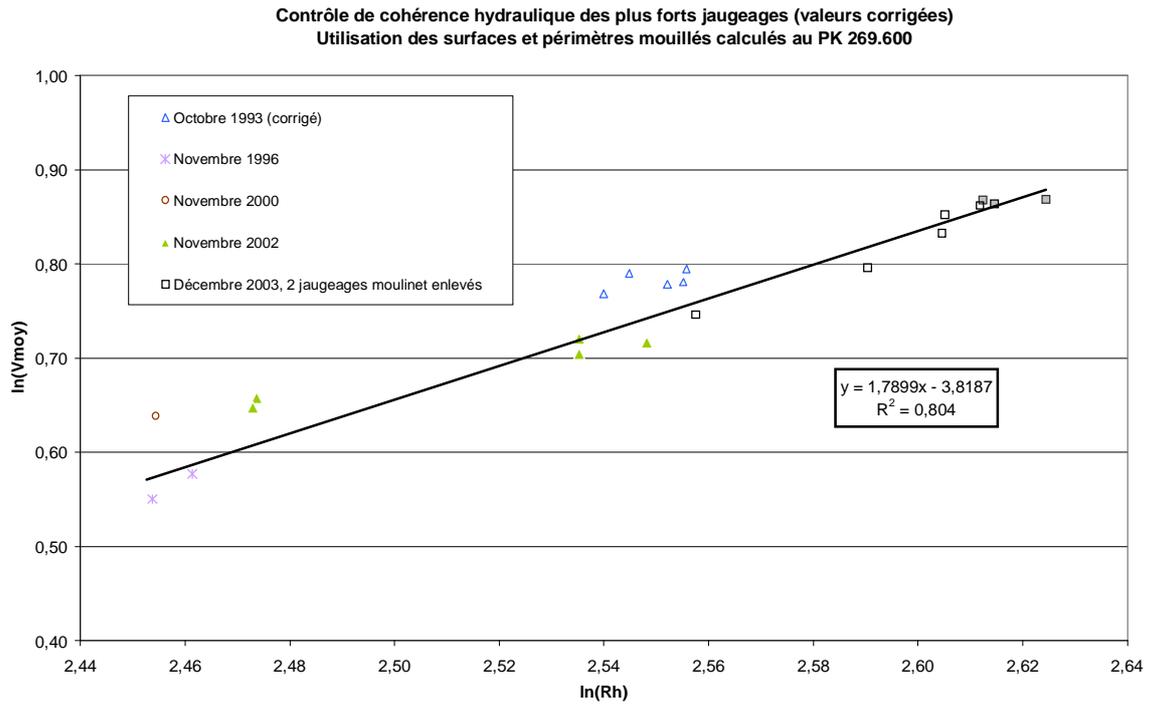


Figure 9 : Contrôle de cohérence hydraulique des plus forts jaugeages (valeurs corrigées)

4 Étude des influences possibles sur la courbe de tarage d'excavations à l'aval de Beaucaire

Plusieurs facteurs peuvent avoir une influence sur la courbe de tarage. Le présent paragraphe vise à cerner l'influence possible de l'un d'entre eux : la variation de géométrie à proximité de la section de jaugeage. Les dragages compensatoires à l'occasion des travaux de construction du nouveau pont de Beaucaire ont en effet modifié la géométrie du lit à l'aval immédiat du pont, la section de jaugeage étant située juste à l'amont de ce pont.

Les calculs présentés ici n'ont pas de prétention à l'exactitude ; ils sont conçus pour cerner la variation induite par l'existence de l'excavation à l'aval du pont, c'est à dire pour estimer la variation à attendre sur les lignes d'eau entre les deux situations avant et après dragage, au delà des hypothèses grossières utilisées et au delà de l'inexactitude des lignes d'eau elles mêmes.

4.1 Données topographiques

- La topographie est tirée des données CNR de sections du lit mineur (**Mars 1999** Palier d'Arles entre Beaucaire et l'embouchure du PK 269 au PK 317 ; profils tous les 100 m entre les PK 269 et 300, puis tous les 500 m entre les PK 300 et 317). L'**excavation, due aux dragages compensatoires**, d'environ 2m entre les PK 269.65 et 270.00 y est visible.
- Sur la zone draguée, on utilise une géométrie avant travaux également tirée des données CNR.
- Seuls les écoulements non débordants (lit mineur seulement) sont étudiés.
- On ne tient pas compte du petit Rhône

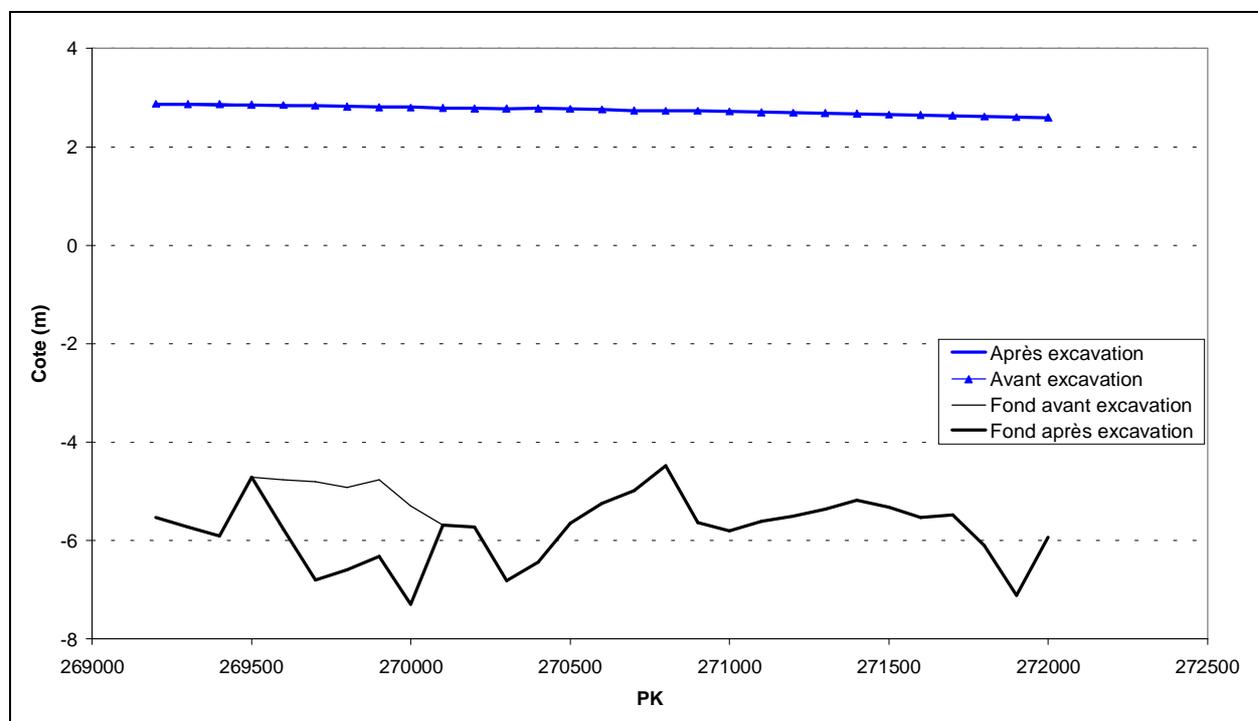


Figure 10 : Profil en long du fond avant et après dragage

4.2 Données hydrauliques

On utilise un modèle filaire (Saint Venant Monodimensionnel) dans la géométrie indiquée ci-dessus. Les calculs sont effectués en régime permanent. Les données hydrauliques nécessaires sont définies comme suit :

- **Condition aval** : deux cas sont examinés
 - Soit, régime uniforme dans la section aval.
 - Soit, cote zéro (niveau de la mer) dans la section aval.

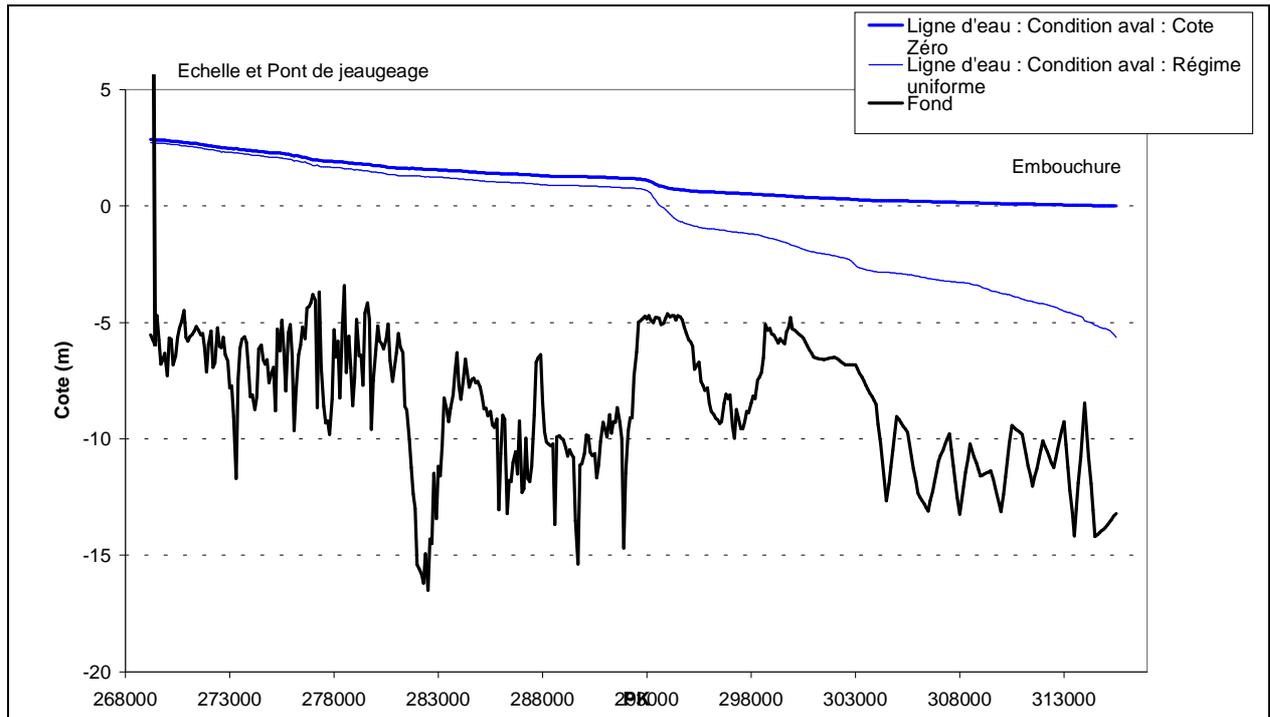


Figure 11 : Lignes d'eau selon la condition aval choisie.

On note la grande différence entre les deux solutions, et l'effet de filtre vers l'amont que joue la zone du palier d'Arles (PK 293). Mais on ne cherche pas ici à expliquer ces différences.

- **Coefficient de Strickler :**

Deux valeurs, non calées sur la réalité sont utilisées : $K = 30$ et $K = 40$

- **Condition amont : débit entrant constant**

Trois valeurs de débits sont testées : 1500, 2000 et 3000 m³/s .

nota : pour 3000 m³/s, les cotes de lignes d'eau débordent la géométrie disponible sur 4 profils en rive droite à l'aval du pont. La géométrie de ces profils a alors été étendue en « paroi verticale » au delà de la dernière cote entrée.

4.3 Résultats de la modélisation hydraulique

- Détails pour la simulation $Z_{aval} = 0$; $K=30$; $Q= 1500 \text{ m}^3/\text{s}$

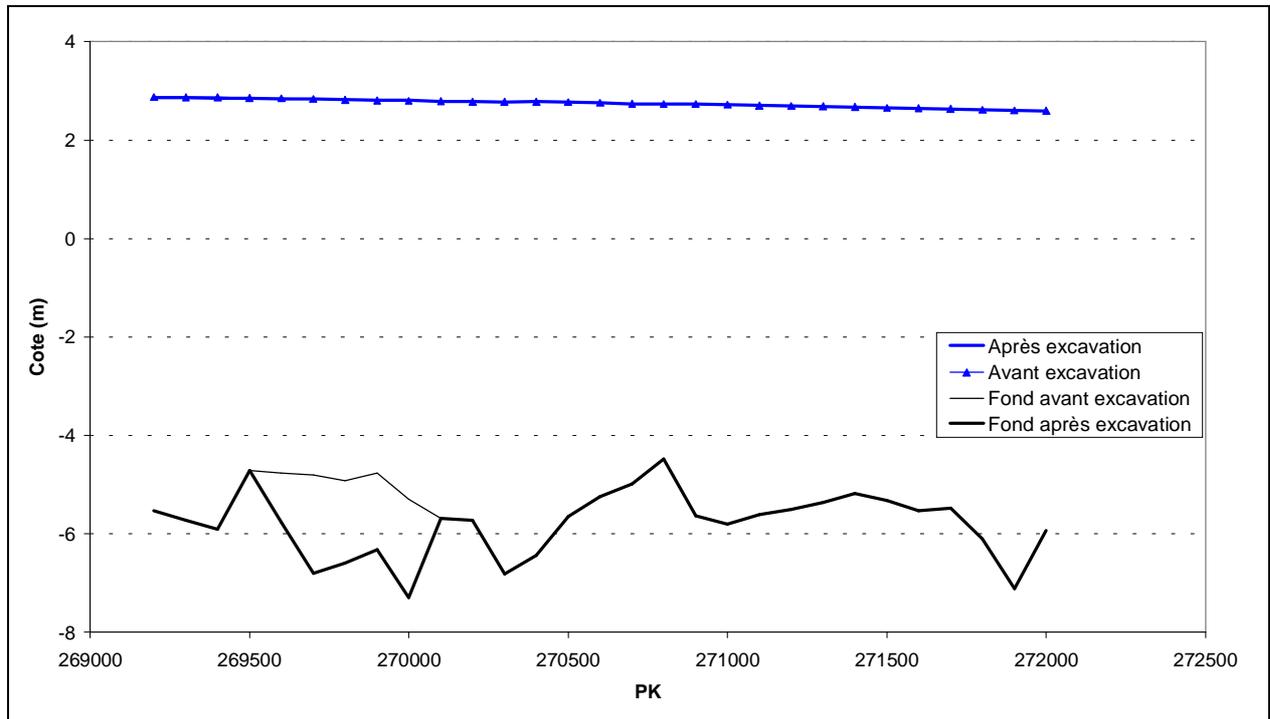


Figure 12 : Ligne d'eau à l'aval du pont avant et après excavation.

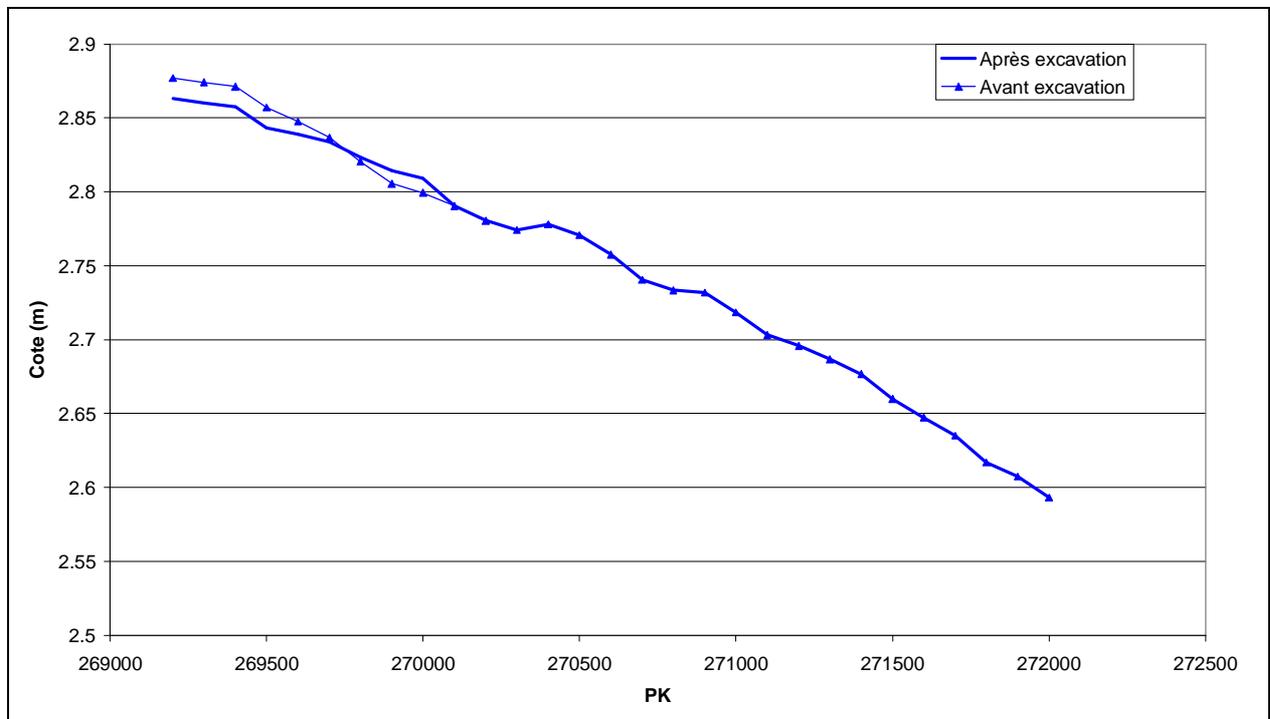


Figure 13 : Zoom à l'aval du pont .

On note un léger abaissement de la ligne d'eau au niveau de la section de jaugeage (PK 269.600), de l'ordre de 1 cm.

• **Résultats pour $Q=1500 \text{ m}^3/\text{s}$**

Variantes : $K=30$ et $K=40$; $Z_{\text{aval}}=0$ (niveau mer) et $Z_{\text{aval}} = \text{régime uniforme (RU)}$ dans la section aval

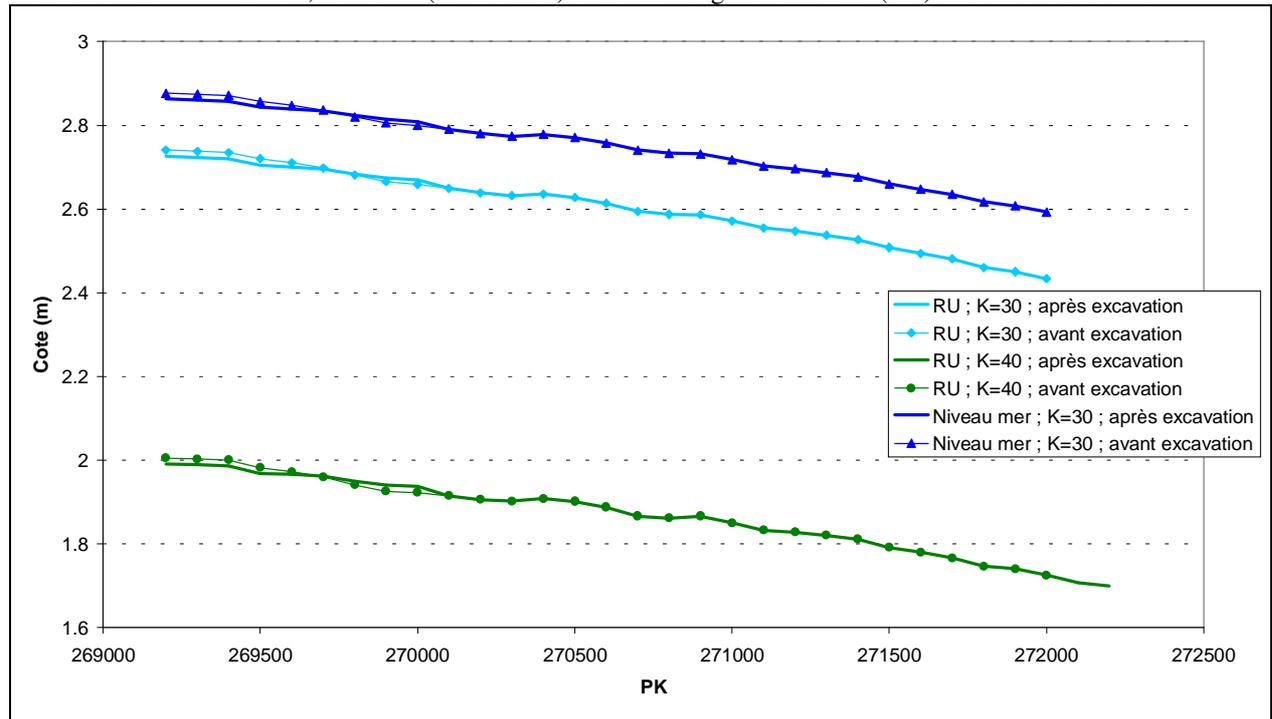


Figure 14 : Zoom sur les lignes d'eau obtenues pour $Q= 1500 \text{ m}^3/\text{s}$

On note la même tendance pour toutes les simulations (abaissement faible, de l'ordre de 1 cm, de la ligne d'eau au niveau de la station de jaugeage).

• **Résultats pour différents débits : $Q = 1500, 2000$ et $3000 \text{ m}^3/\text{s}$**

$Z_{\text{aval}}=0$ (niveau mer) et $K = 30$

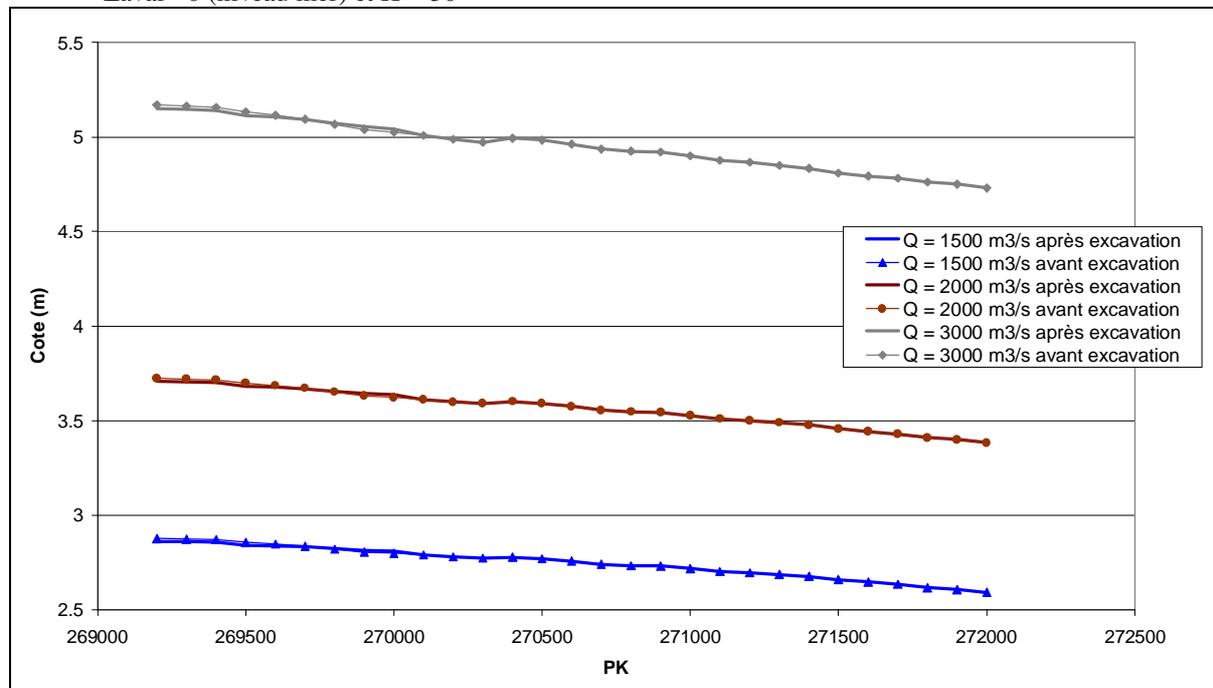


Figure 15 : Zoom sur les lignes d'eau avant et après excavation pour les 3 débits ($1500, 2000$ et $3000 \text{ m}^3/\text{s}$).

On note la même tendance, avec un faible abaissement de la ligne d'eau ; la différence au niveau de la section de jaugeage augmente très légèrement avec le débit, de l'ordre de 2 cm.

4.4 Conclusion

Ce travail de dégrossissage devrait être complété par des simulations pour des débits beaucoup plus élevés, prenant en compte le lit majeur, afin de tester une situation plus proche de celle des fortes crues.

Il semble cependant, au vu de ces premiers résultats, que l'existence d'une fosse à l'aval du pont de Beaucaire, au delà de 1998, ne soit pas une bonne piste pour étayer une éventuelle modification de la courbe de tarage de la station de jaugeage.

5 Calcul d'incertitude sur la partie haute de la courbe de tarage du Rhône à Beaucaire

5.1 Evénement de décembre 2003

La CNR a utilisé deux courbes de tarage pour qualifier l'événement de décembre 2003 :

- la première correspond au tracé en vigueur au moment de la crue, avec une courbe extrapolée à l'aide des informations disponibles. Il s'agissait principalement sur la partie haute des jaugeages d'octobre 1993 et janvier 1994. Le débit associé à la cote 11.3 m était alors de 13000 m³/s.
- la seconde a été actualisée en fonction des jaugeages effectués pendant la crue, et en rajoutant un débit supplémentaire lié à un abaissement de la ligne d'eau à Beaucaire, suite à des brèches en aval à Fourques qui ont provoqué un abaissement de la ligne d'eau estimé entre 15 et 25 cm. La nouvelle estimation du débit est de 12000 m³/s (courbe de tarage) + 500 m³/s (effet des brèches), soit 12 500 m³/s.

La figure 16 (cf. rapport 2005) présente le principe de tracé de la nouvelle courbe de tarage. L'incertitude sur chaque mesure de débit a été reportée en fonction du type de jaugeage (moulinet en surface, moulinet sur la section complète, ADCP). Il a été décidé de retenir une courbe moyenne passant parmi la majorité des intervalles d'incertitude sur les mesures.

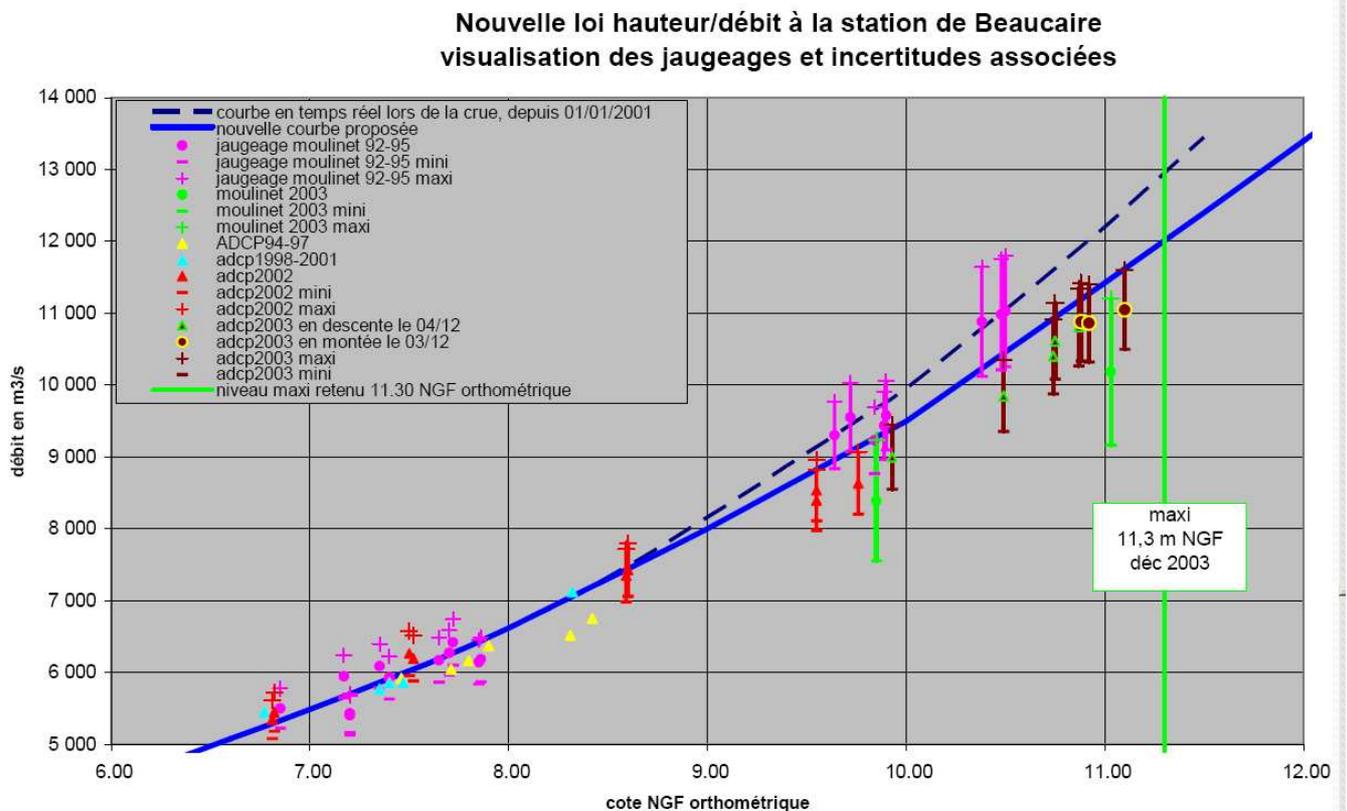


Figure 16 : Tracé de la courbe de tarage à Beaucaire par la CNR (rapport 2005)

Compte-tenu des éléments de critique exposés au chapitre précédent sur les plus forts jaugeages, nous présentons sur la figure 17 un tracé de courbe de tarage avec un ajustement polynomial sur deux tronçons : $3 < H < 8$ m et $H > 8$ m. La seconde partie a été obtenue en excluant les jaugeages de la crue de septembre 2002, de janvier 1994 et les deux jaugeages au moulinet de décembre 2003, et en corrigeant les valeurs d'octobre 1993. **Le débit associé à la cote 11.3m est égal à 11 450 m3/s.**

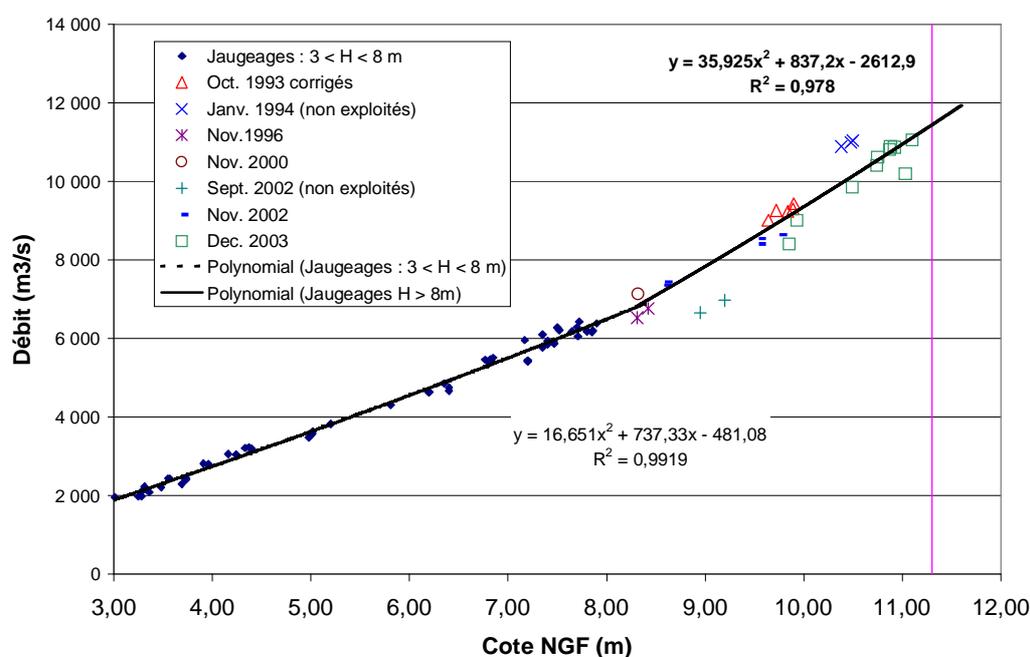


Figure 17 : Tracé de la courbe de tarage à Beaucaire pour la crue de décembre 2003, après critique des jaugeages

Si l'on reprend l'estimation de la CNR d'un abaissement de la ligne d'eau de 15 à 25 cm suite aux brèches dans les digues à Fourques, il convient d'estimer la valeur de débit associée à la cote $11.3 + 0.20 = 11.5$ m. **Dans ce cas de figure, le débit maximal de la crue de décembre 2003 relatif à une cote de 11.5 m serait de 11 800 m3/s.**

L'incertitude sur l'ajustement de la courbe de tarage, pour le débit de cette crue, peut être obtenue d'après les éléments suivants :

$$I_{90\%} = [\hat{Q}(H) - 1.645\sigma_\varepsilon ; \hat{Q}(H) + 1.645\sigma_\varepsilon]$$

avec :

$$\sigma_\varepsilon = \sigma_Q \sqrt{1 - r^2} \quad \text{et} \quad r^2 = 0.978 \quad ; \quad \sigma_Q = 1425 \text{ m}^3/\text{s}$$

Soit un intervalle d'incertitude à 90 % : [11 600 ; 12 000], qui correspond à un écart relatif de ± 2 %. **Cette valeur est certainement sous-estimée**, compte-tenu du caractère hétéroscédastique des résidus (tendance à la dispersion plus élevée pour les forts débits).

On trouvera dans le rapport du Cetiati (2005)⁶ une méthodologie complète permettant d'apprécier l'erreur globale sur l'estimation des débits de crue. Elle combine les erreurs sur la mesure de la cote, la mesure des débits et l'ajustement de la courbe de tarage. L'incertitude annoncée pour le débit de la crue est comprise entre ± 6 et $\pm 12\%$ (cf. page 9/57 du rapport).

On peut retenir une incertitude finale de l'ordre de 10% , ce qui reste remarquablement faible, pour un événement de ce type. Il faut souligner ici l'abondance d'information disponible qui a permis, après critique des données, d'obtenir une estimation assez fiable du débit de la crue de décembre 2003.

Pour mémoire, si l'on ne disposait pas des jaugeages effectués au-delà de la cote de 8m, ce qui correspond à un débit de l'ordre de 6000 m³/s, voisin de la crue de période de retour 2 ans, on aurait estimé sans jaugeage le débit de la crue de décembre 2003 à 10000 m³/s (cf. figure 5).

5.2 Estimation du débit des prochaines crues

L'analyse des différents jaugeages a mis en évidence une dispersion du nuage des points les plus forts, notamment entre les crues de d'octobre 1993 et janvier 1994, et celle de décembre 2003.

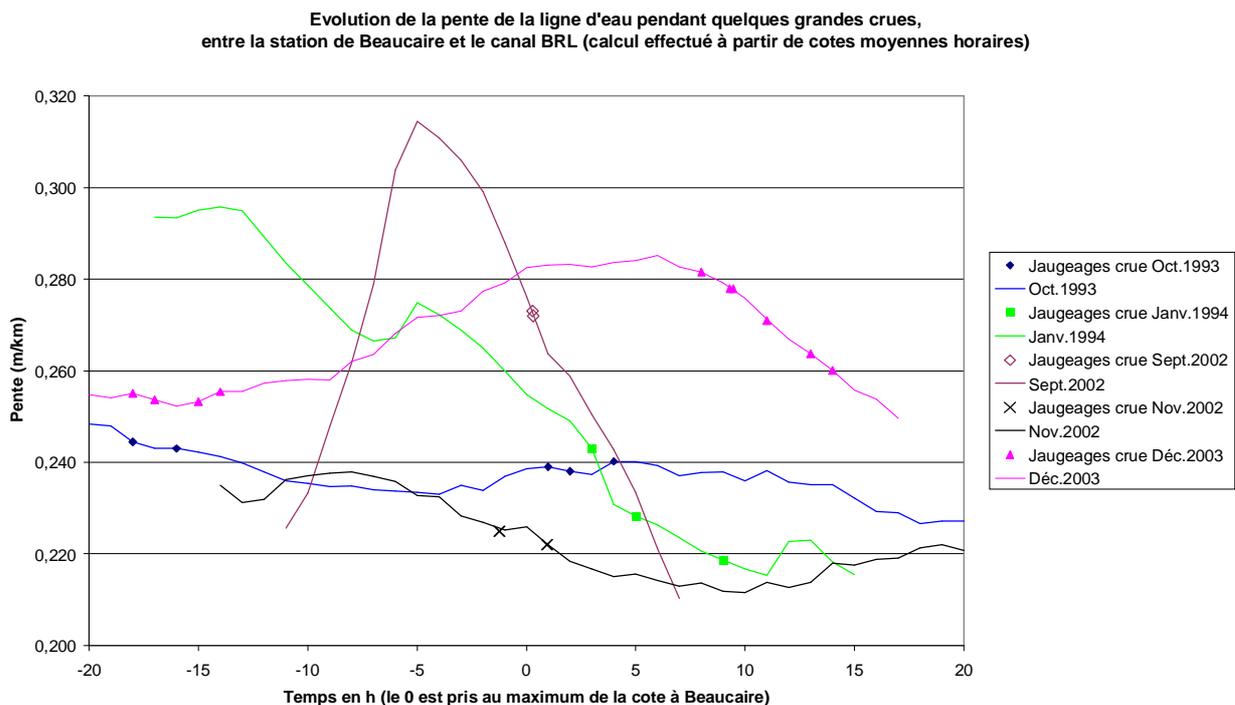


Figure 18 : Analyse de la dynamique des crues à Beaucaire

La figure 18 illustre l'évolution de pente de la ligne d'eau à Beaucaire pour les principales crues étudiées. La pente a été calculée par la CNR à partir des cotes moyennes relevées à la station de Beaucaire (PK = 269.6) et la station « canal BRL » (PK = 277.4). On note que le maximum de vitesse (cf. maximum de la pente de la ligne d'eau) est généralement situé avant celui de la cote (cf. valeur 0 sur l'axe des abscisses). Ceci correspond au phénomène classique

⁶ Cetiati (2005). Estimation des incertitudes des débits annoncés par utilisation des courbes $Q=f(h)$ et des mesures de niveau. Rapport d'étude n° 2460059. 57p.

de propagation d'onde de crue, où un observateur placé au bord d'une rivière en crue voit passer successivement le maximum de vitesse, de débit puis de cote. Le cas particulier de la crue de décembre 2003 pourrait être dû à l'abaissement de la ligne d'eau consécutif aux brèches de la digue de Fourques. On observe en effet un palier au sommet du limnigramme, qui a modifié l'heure du maximum (certainement quelques heures plus tard en l'absence de brèches).

Les jaugeages sont généralement effectués pendant la phase de décrue, mais dans des conditions bien différentes d'une crue à une autre : faibles variations de la pente de ligne d'eau (oct. 1993, nov. 2002), variations moyennes (déc. 2003) à fortes (janv. 1994, sept. 2002).

Si l'on reprend le graphique de cohérence hydraulique utilisé en section 3.4.2 pour critiquer les jaugeages de la crue de janvier 1994, en incluant l'information sur la pente de la ligne d'eau, on voit sur la figure 19 que la qualité de la régression ($r^2 = 0.84$) est analogue à celle obtenue en excluant les jaugeages de 1994 ($r^2 = 0.80$). On note également que les jaugeages de 1994, initialement à l'écart des autres mesures (cf. figure 8), redeviennent cohérents si l'on tient compte de la pente de la ligne d'eau.

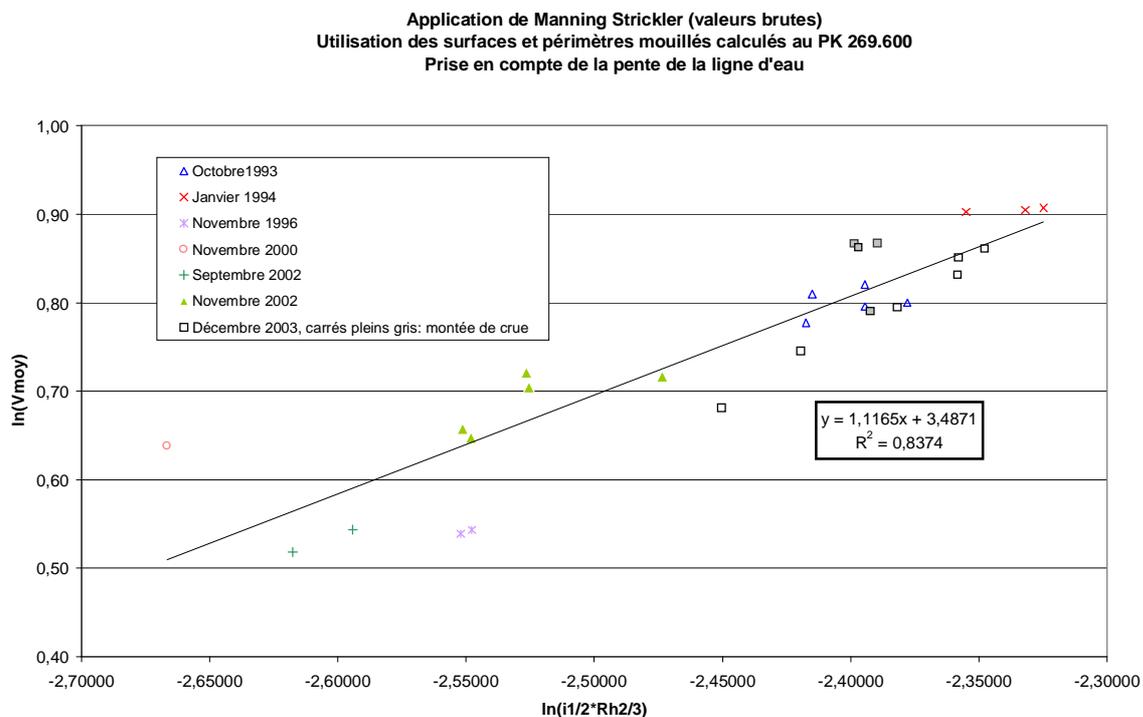


Figure 19 : Contrôle de cohérence hydraulique des plus forts jaugeages, en rajoutant l'information sur la pente de la ligne d'eau

Ceci tendrait à montrer que la dispersion constatée sur la courbe de tarage pour les plus forts jaugeages n'est pas à expliquer par des erreurs de mesure (cf. section sur 2 sur les incertitudes et section 3 sur l'analyse des jaugeages) ou à un détamage de la station dû à un changement de géométrie du lit mineur ou du lit majeur (cf. section 4, analyse hydraulique de l'effet des excavations). C'est plutôt la configuration du site de Beaucaire, **avec des phénomènes de propagation de crue très variables d'un événement à un autre**, qui pourrait expliquer les différents tracés de courbes de tarage.

Ainsi, le tracé de la courbe de tarage proposé pour l'estimation du débit de la crue de décembre 2003 (fig. 17) n'est pas forcément valide pour une prochaine crue dont la dynamique serait plutôt voisine de celle de janvier 1994 ou septembre 2002. Dans ces conditions, **le tracé retenu depuis 2005 par la CNR**, qui passe par la majorité des intervalles d'incertitude sur la mesure des débits (fig. 16), **nous semble un bon compromis pour les futures crues**, puisqu'il n'est pas possible de connaître à l'avance le type de crue à attendre. L'incertitude résultante est forcément plus forte et doit être de l'ordre de 15 à 20%, compte-tenu de la plus forte dispersion des jaugeages (cf. étude Cetiati, 2005, précitée).

Dans cette configuration, il est **essentiel de poursuivre les mesures en crue, car l'incertitude sur la courbe de tarage est trop forte pour s'en tenir au tracé médian retenu.**