

***Conférence de consensus sur le débit du Rhône à Beaucaire pour la
crue de Décembre 2003***

CONTRIBUTION DE LA CNR



Pont de Beaucaire-Tarascon PK 269.60 – photo prise le 3 décembre 2003

**Evaluation de la crue de décembre 2003
DOCUMENT DE SYNTHESE**

 © Compagnie Nationale du Rhône 2 rue André Bonin 69316 Lyon cedex 04	DIRECTION DU PATRIMOINE FLUVIAL ET INDUSTRIEL Département Patrimoine Fluvial Référence : DPFI-PF 05-0434 AK/ suivie par : A. KHALADI Tél. : 04.72.00.18.03 Fax : 04.72.00.67.75 e-mail : a.khaladi@cnr.tm.fr Juin 2005
---	--

LISTE DES DOCUMENTS COMPOSANTS LA CONTRIBUTION DE LA CNR

Pièce 1 : Document de synthèse

Pièce 2 : Evaluation de la crue de décembre 2003 - Analyse hydrométrique,

Pièce 3 : Evaluation de la crue de décembre 2003 - Analyse hydraulique,

Annexe I : Fortes précipitations de décembre 2003 et conséquences sur les bassins du Rhône, *rapport de Météo France*

Annexe II : Détermination du débit avec un ADCP,

Annexe III : Influence d'un fond mobile sur un jaugeage ADCP – Prise en compte de ce phénomène dans le dépouillement d'un jaugeage à l'ADCP

Annexe IV : Estimation des incertitudes de mesure des débits issus d'un jaugeage au moulinet ou à l'ADCP, CETIAT

Annexe V : Estimation des incertitudes des débits calculés à partir des relations hauteur/débit, CETIAT

Annexe VI : Historique de l'aménagement du fleuve – Palier d'Arles 1967 – 1973

Annexe VII : Evolution des fonds du Rhône en aval de Beaucaire – Hydrographie

Annexe VIII : Simulations complémentaires des écoulements des crues du Rhône entre Beaucaire et la mer, BCEOM

RESUME DE LA CONTRIBUTION CNR

PREAMBULE

Début décembre 2003, le Rhône, dans sa partie aval a connu une crue exceptionnelle qui se situe parmi les plus importantes de ces deux derniers siècles.

Dans la nuit du 3 décembre, le Rhône a enregistré un niveau record à la station de mesure de Beaucaire. La détermination et la validation du débit correspondant font l'objet de la conférence de consensus organisée par le préfet de bassin.

Le présent rapport est la contribution CNR à ces travaux.

PRINCIPAUX ELEMENTS DEVELOPPES DANS LA CONTRIBUTION

Episode pluvieux

Cette crue est due à **un épisode pluvio-orageux et généralisé sur le quart sud-est de la France.**

Cette situation intervient après un mois de novembre pluvieux avec des précipitations mensuelles pouvant atteindre 400 mm dans les Cévennes. **Les précipitations soutenues du 1^{er} au 3 décembre arrivent donc sur des sols saturés en eau** provoquant une réaction rapide des cours d'eau.

L'événement pluvieux n'a pas été exceptionnel par son intensité mais par :

- **son amplitude géographique** (20 départements concernés par la mise en vigilance de Météo France, soit toute la vallée du Rhône au sud de Lyon) ;
- **sa durée dans le temps** de plus de 48 heures (les phénomènes similaires ne dépassent habituellement pas 24 à 36 heures).

Dynamique de la crue

Genèse de la crue

A partir de débits relativement faibles en aval de Lyon (<Q10) mais soutenus sur une longue durée, l'ensemble des affluents sont venus gonflés les débits du Rhône progressivement de l'amont vers l'aval avec des débits correspondant le plus souvent à des périodes de retour de l'ordre de 10 ans.

Les crues de 2 des derniers affluents, la Durance et plus particulièrement le Gard, sur un débit du Rhône particulièrement fort sont venues former la crue exceptionnelle du delta du Rhône.

Des études antérieures avaient montré que « *des crues relativement modestes (de l'ordre de Q10) de plusieurs affluents avec un débit soutenu du Rhône en amont suffisent à créer une crue exceptionnelle à Beaucaire* ». La crue de 2003 en est un bon exemple.

Modélisation de la crue

Afin de :

- compléter l'analyse de la dynamique de la crue ;
 - vérifier la cohérence entre les valeurs mesurées aux différentes stations de mesure ;
- la propagation de la crue de décembre 2003 a été simulée à l'aide de l'enchaînement des modèles mathématiques des biefs du Rhône, entre les stations hydrométriques de Viviers et Beaucaire par le bureau d'étude CNR et sur le delta du Rhône par le BCEOM.
- L'hydrogramme enregistré à la station de Viviers, et les hydrogrammes des affluents entre Viviers et Beaucaire ont été injectés comme condition d'entrée des modèles CNR puis propagés jusqu'à Beaucaire.

Deux scénarios ont été modélisés :

S1- Propagation de la crue du Rhône et des affluents principaux.

- Les hydrogrammes des affluents sont ceux des stations hydrométriques existantes ;
- Les bassins versants intermédiaires (affluents non mesurés ou bassins versants en aval des stations) n'ont pas été pris en compte ;
- Les hydrogrammes mesurés sur l'Ardèche par la CNR et la DIREN, présentant des écarts significatifs, l'hydrogramme de la DIREN dont les débits sont les plus faibles a été utilisé.

S2- Prise en compte des bassins intermédiaires.

- Les hydrogrammes du scénario S1 ont été repris
- Les apports des bassins versants intermédiaires ont été pris en compte. Ces apports ont été calculés à partir des lames d'eau fournies par Météo-France et par application de coefficients de ruissellement calculés par comparaison avec les bassins versants jaugés les plus proches.

La propagation de ces hydrogrammes a permis de calculer deux valeurs encadrantes du débit à Beaucaire, l'un (S1) présente une évaluation basse, l'autre (S2) une évaluation plus forte.

Les résultats de ces simulations donnent :

- des débits de pointe à Beaucaire compris entre 12000 m³/s (scénario S1) et 12 750 m³/s (scénario S2) ;
- les résultats du scénario S2 sont plus proches des niveaux d'eau mesurés le long du Rhône.

Pour sa part, le BCEOM, avec son modèle, conclut que le débit de 12500 m³/s est celui qui permet d'approcher au mieux les observations sur le delta faites pendant la crue.

Mesures

La CNR gère un réseau automatique de mesures hydrométriques de plus de 150 stations. En plus des mesures instantanées des niveaux, des jaugeages sont régulièrement réalisés pour établir et vérifier les courbes hauteur/débit qui permettent de transformer une hauteur d'eau en débit.

Actuellement la CNR utilise deux types d'appareils pour mesurer les champs de vitesse : des moulinets (utilisés pour faire des profils de vitesses complets, ou pour effectuer des mesures de vitesses en surface), et des équipements ADCP (depuis 1994)

Ainsi, depuis 1984, la CNR a réalisé plus de 4 000 jaugeages (dont 1 500 à l'ADCP);

Une étude menée en collaboration avec le CETIAT (Centre Technique des Industries Aérodynamiques et Thermiques) ont permis d'évaluer les incertitudes sur les appareils de mesures des débits utilisés à la CNR :

- jaugeage au moulinet (jaugeage complet) : 7% ;
- jaugeage au moulinet (jaugeage de surface) : 10% ;
- jaugeage à l'ADCP : 5%.

(La référence dans cette étude a été le moulinet qui a permis ensuite par des mesures comparatives d'estimer la précision de l'ADCP)

Courbe de tarage (hauteur/débit) à Beaucaire

108 jaugeages ont été effectués à la station de Beaucaire entre 1992 et 2003 qui ont permis la construction de la courbe hauteur/débit.

On citera en particulier le jaugeage de 11051 m³/s effectué à Beaucaire le 3 décembre 2003 à 12h30, c'est-à-dire 15 heures avant le maximum de la crue, et avant la crue des 2 principaux affluents : la Durance et le Gard.

Courbe établie par CNR

La CNR réalise des jaugeages dans des conditions de débits les plus variées possibles. Avant la crue de 2003, seuls quelques jaugeages réalisés en 1993 et 1994 avaient permis de construire la courbe de tarage au-delà du débit de 7300 m³/s. Cependant, compte tenu des nouveaux jaugeages réalisés, **cette courbe a été corrigée peu après la crue.**

La nouvelle courbe a été construite, **à partir d'une analyse hydrométrique**, en privilégiant :

- l'utilisation de l'ensemble des informations disponibles ;
- l'analyse critique de la qualité et des conditions de réalisation de chaque jaugeage ;
- l'affectation d'une incertitude sur chacune des mesures en fonction des conditions de mesure ;
- la prise en compte des conditions hydrauliques du site.

Afin de critiquer et d'analyser la cohérence des 108 jaugeages réalisés au droit de la station de Beaucaire, d'établir une loi hauteur/débit et de déterminer les incertitudes liées à l'utilisation de cette loi, la CNR a confié une mission d'expertise séparément à deux organismes : le CETIAT et le CEMAGREF de Lyon. Ces deux organismes ont menés leurs travaux sur la base **d'une analyse statistique.**

Résultats des expertises

L'analyse comparative de 4 lois d'interpolation (régression linéaire, régression polynomiale du second degré, loi puissance et loi de Manning Strickler) ont conduit le CETIAT à retenir la loi de Manning Strickler, avec distinction de 2 domaines : avant et après débordement des profils en aval.

Le CETIAT propose des lois distinctes suivant que l'on considère l'ensemble des jaugeages (CETIAT 1), ou seulement ceux postérieurs à la crue de 1994 (CETIAT 3).

Le CEMAGREF propose une loi hauteur/débit polynomiale du second degré en distinguant les deux domaines avant et après débordement des profils aval.

Les lois polynomiales de degré 2 et de Manning Strickler sont satisfaisantes d'un point de vue statistique car la distribution des résidus est aléatoire, ce qui constitue une condition indispensable pour apprécier la pertinence d'une loi d'interpolation. La loi de Manning Strickler présente l'avantage de correspondre à une loi physique.

L'analyse hydrométrique des différents jaugeages montre :

- **une cassure de la courbe de tarage pour un débit de l'ordre de 7300 m³/s**, du au début du débordement des profils en aval de la station ;
- des points remarquablement regroupés pour des débits inférieurs à 7300 m³/s ;
- une plus grande dispersion des points pour des débits supérieurs à 7300 m³/s ;
- une certaine stabilité de la courbe pour les débits les plus faibles

Analyse des niveaux observés dans le delta

Les différentes lectures de l'échelle limnimétrique à Beaucaire faites pendant la crue et l'analyse du tracé des limnigrammes montrent que le **niveau a atteint la cote 11,30 NGF (Ortho) à la station de Beaucaire.**

Cependant l'analyse comparative des limnigrammes aux stations de :

- aval barrage de Vallabrègues (en amont de Beaucaire) ;
- Beaucaire ;
- prise d'eau CNABRL (entre Arles et Beaucaire) ;
- Fourques (sur le petit Rhône) ;
- Arles (en aval de la défluence) ;

met en évidence un phénomène hydraulique différent de la propagation attendue des maxima de hauteur d'eau accompagnant l'onde de crue.

En effet, les maxima à Fourques, Arles et BRL précèdent celui de Beaucaire de 8 à 10 heures et sont immédiatement suivis d'un affaissement de niveau consécutif à l'apparition de brèches dans les digues du petit Rhône.

L'étude sur modèle numérique de la propagation de la crue réalisée par le BCEOM à notre demande, met en évidence une influence hydraulique jusqu'à Beaucaire des affaissements de niveaux observés à Fourques.

Les calculs de ce bureau d'étude ont montré qu'en l'absence de ce phénomène hydraulique, le niveau à Beaucaire aurait atteint **30 cm de plus**.

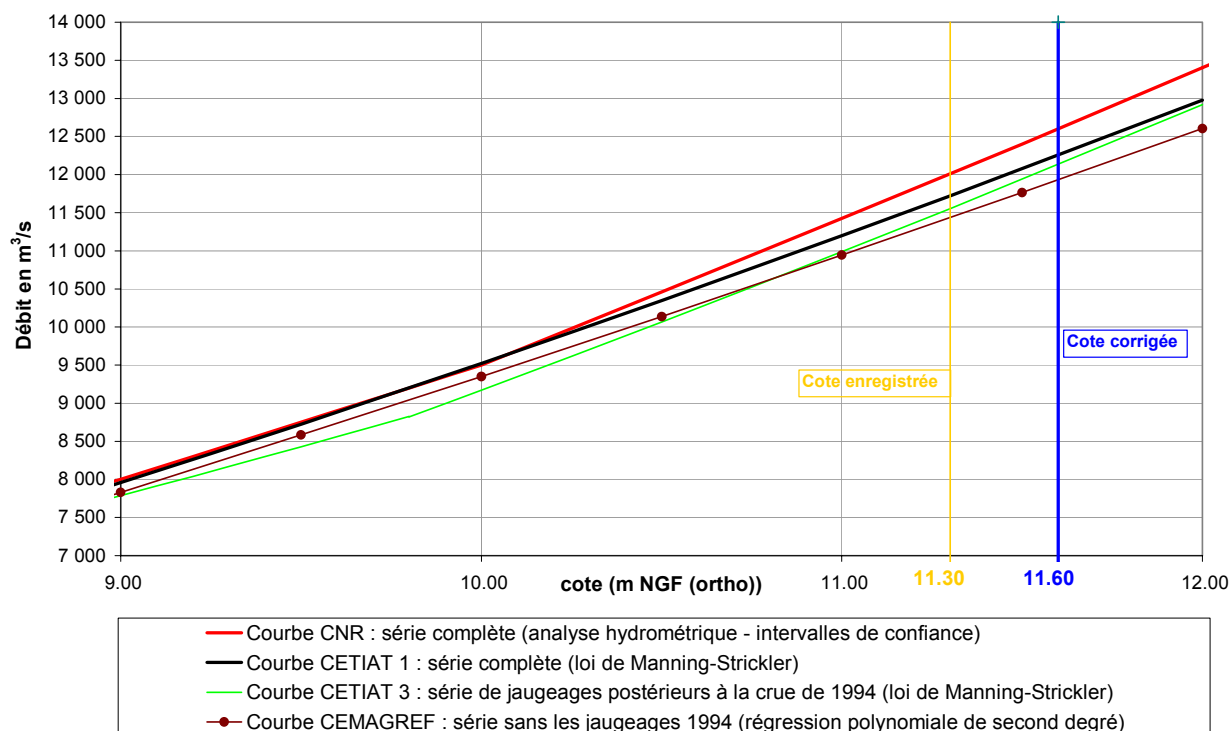
Estimation des débits

L'estimation du débit de pointe à Beaucaire est faite à partir de la courbe hauteur/débit pour une cote corrigée de l'abaissement concomitant à la rupture des brèches de 11,60 m NGF (ortho).

Dans ces conditions, les différentes courbes hauteur/débit proposées conduisent aux estimations suivantes du débit de pointe à Beaucaire :

- CNR: (série complète, analyse hydrométrique) $Q = 12\,600 \text{ m}^3/\text{s}$
- CETIAT 1: (série complète, loi Manning-Strickler) $Q = 12\,250 \text{ m}^3/\text{s}$
- CETIAT 3: (débits postérieurs à 1994, loi Manning-Strickler) $Q = 12\,150 \text{ m}^3/\text{s}$
- CEMAGREF: (série sans les jaugeages de 1994, loi polynomiale) $Q = 11\,900 \text{ m}^3/\text{s}$

Ces valeurs sont également à comparer à la fourchette de débit comprise entre 12000 m³/s et 12750 m³/s calculée sur modèles mathématiques en propageant les débits des affluents.



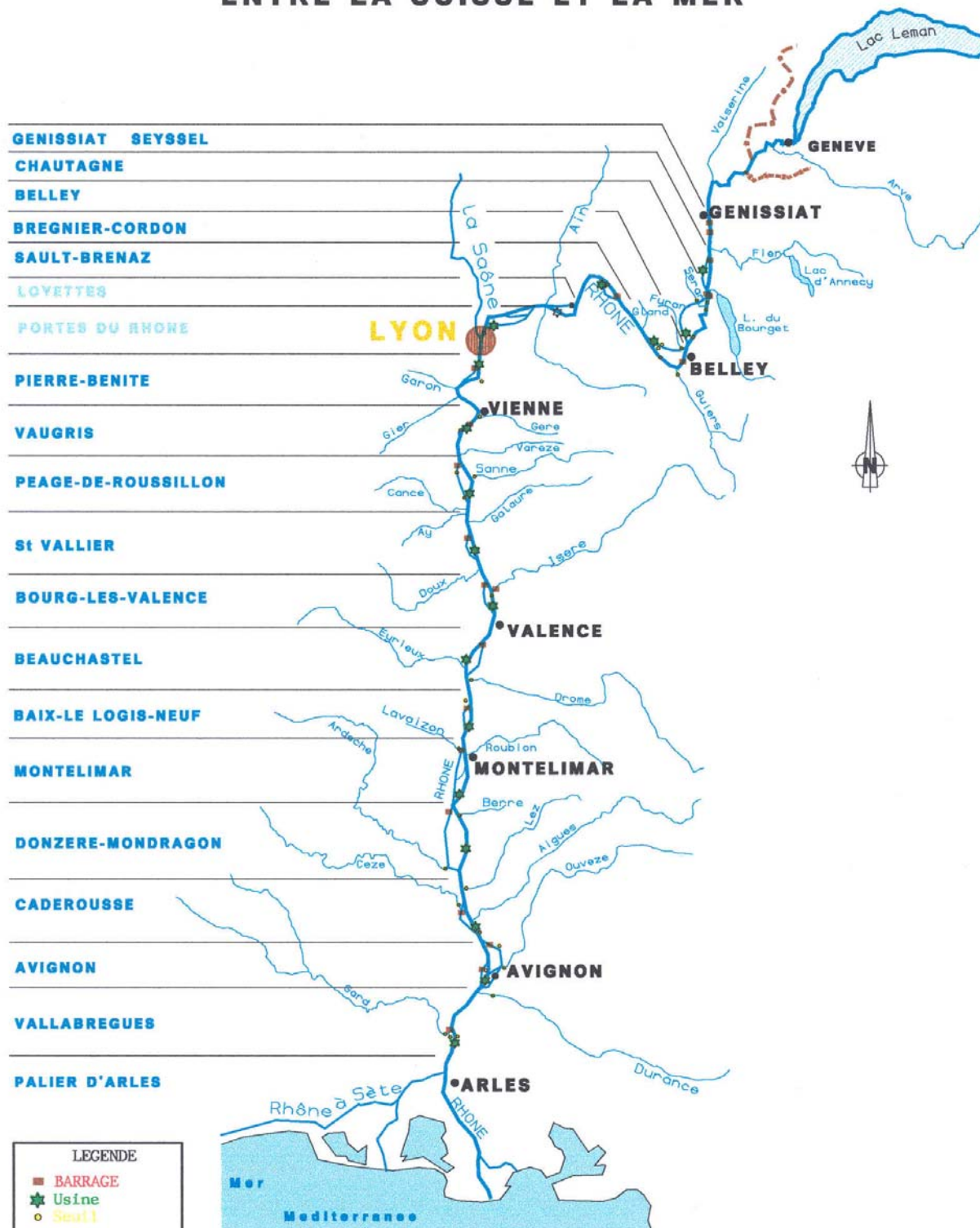
SOMMAIRE

1	PLANS DE SITUATION	8
1.1	PLAN DES AMENAGEMENTS DU RHONE ENTRE LA SUISSE ET LA MER	8
1.2	BASSINS VERSANTS DU RHONE ET AFLUENTS.....	9
1.3	PRINCIPALES STATIONS HYDROMETRIQUES EN AVAL DE LYON.....	10
1.4	POSITIONNEMENT DES RUPTURES DE DIGUES ET DES ECHELLES LIMNIMETRIQUES SUR LE RHONE AVAL	11
2	INTRODUCTION	12
3	GENESE ET CONTEXTE HYDROMETEOROLOGIQUE DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003.	14
3.1	GENESE DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003.....	14
4	PROPAGATION DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003 ET EVOLUTION DES DEBITS DU RHONE JUSQU'A BEAUCAIRE.....	15
4.1	OBSERVATIONS HYDROMETRIQUES ET EVOLUTION DES DEBITS DU RHONE ET SES AFLUENTS	15
4.2	PROPAGATION DE LA CRUE PAR MODELISATION MATHEMATIQUE ROLE DES CHAMPS D'EXPANSION	18
4.2.1	<i>Scénarios de propagation de la crue.....</i>	<i>18</i>
4.2.2	<i>Fonctionnement et influence des plaines inondables lors du déroulement de la crue.....</i>	<i>20</i>
4.2.2.1	<i>Plaines inondées naturellement.....</i>	<i>20</i>
4.2.2.2	<i>Plaines inondées par submersion contrôlée par digues déversantes</i>	<i>20</i>
5	METHODE DE JAUGEAGE ET PRECISION DE LA MESURE	21
5.1	LES METHODES DE JAUGEAGES A LA CNR.....	21
5.1.1	<i>Le moulinet.....</i>	<i>22</i>
5.1.2	<i>L'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)</i>	<i>23</i>
5.1.3	<i>Précisions des mesures de jaugeages</i>	<i>24</i>
6	ANALYSE DE LA COURBE DE TARAGE DE LA STATION DE BEAUCAIRE	25
6.1	PRESENTATION DE LA STATION DE BEAUCAIRE (PK269.600)	25
6.2	JAUGEAGES ET COURBE DE TARAGE DE LA STATION DE BEAUCAIRE	27
6.3	EXPERTISE DE LA COURBE DE TARAGE DE LA STATION DE BEAUCAIRE	28
6.3.1	<i>Expertise du CETIAT.....</i>	<i>28</i>
6.3.2	<i>Expertise du CEMAGREF.....</i>	<i>30</i>
6.4	CRITIQUE ET BILAN DES RESULTATS D'ANALYSE	33
6.4.1	<i>Rappel des principaux travaux d'aménagement en aval de BEAUCAIRE</i>	<i>33</i>
6.4.2	<i>Evolution du lit du Rhône en aval de Beaucaire</i>	<i>33</i>
6.4.3	<i>Influence du nouveau Pont de Beaucaire-Tarascon</i>	<i>34</i>
6.4.4	<i>Evolution de la section au droit de l'échelle limnimétriques</i>	<i>34</i>
6.4.5	<i>Bilan des courbes de tarage (lois hauteur/débi)</i>	<i>34</i>
7	ANALYSE DES ENREGISTREMENT DE COTES DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003	35
7.1	LES NIVEAUX DU RHONE A BEAUCAIRE	35
7.2	ANALYSE DE L'EVOLUTION DES LIMNIGRAMMES SUR LE DELTA	36
7.2.1	<i>Rappel des ruptures de digues sur le Rhône en aval de Beaucaire</i>	<i>36</i>
7.2.2	<i>Influence des ruptures de digues sur les niveaux du delta du Rhône</i>	<i>37</i>
7.3	ESTIMATION DE L'IMPACT DES RUPTURES DE DIGUES SUR LES NIVEAUX DU RHONE A BEAUCAIRE	38
8	CONCLUSION – DEBIT MAXIMUM DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003 A BEAUCAIRE	42

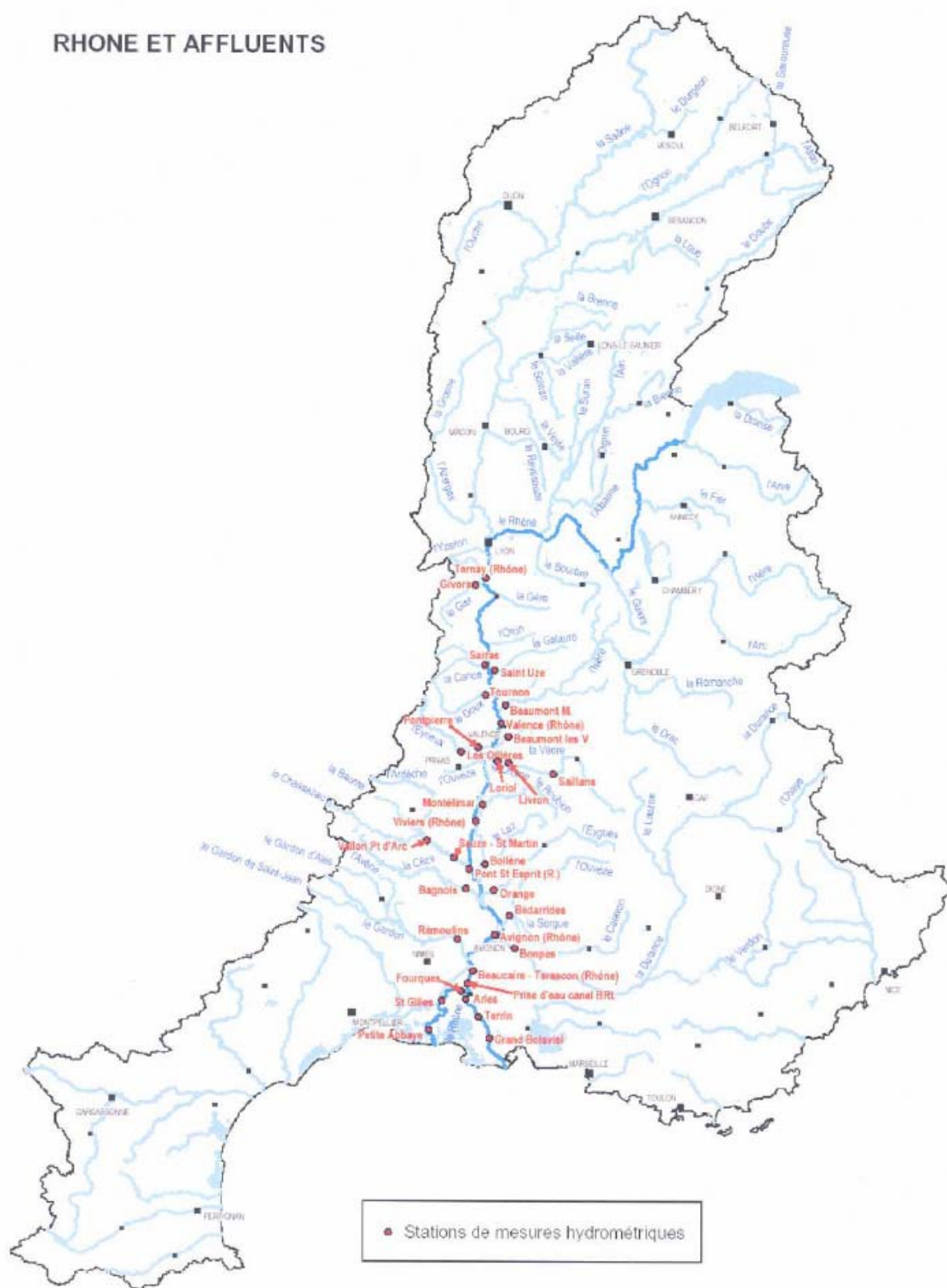
1 PLANS DE SITUATION

1.1 PLAN DES AMENAGEMENTS DU RHONE ENTRE LA SUISSE ET LA MER

PLAN D'AMENAGEMENT DU RHONE ENTRE LA SUISSE ET LA MER



1.2 BASSINS VERSANTS DU RHONE ET AFFLUENTS

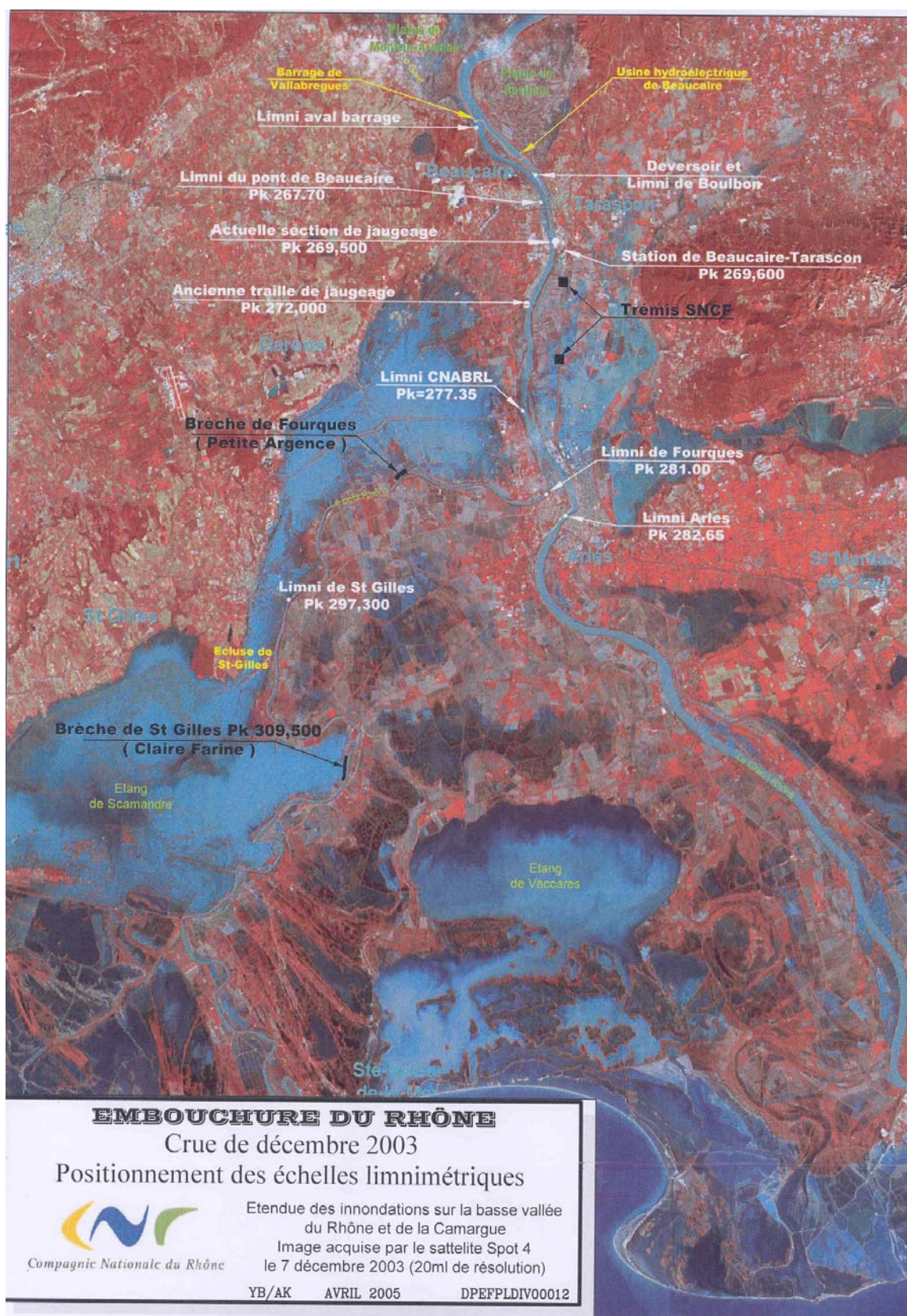


Délégation de Bassin RM - mars 2004

Echelle : 1/2 500 000 ème



1.4 POSITIONNEMENT DES RUPTURES DE DIGUES ET DES ECHELLES LIMNIMETRIQUES SUR LE RHONE AVAL



2 INTRODUCTION

Le Rhône, dans sa partie aval, a connu en début décembre 2003 une crue exceptionnelle qui se situe parmi les plus importantes des deux derniers siècles.

Cette crue de type méditerranéen extensive a été générée par un épisode pluvio-orageux intense et généralisé sur le quart Sud-Est de la France. Cet épisode se caractérise par son étendue géographique le long de la vallée du Rhône et par sa durée de plus de 48 heures alors que des phénomènes similaires ne dépassent pas habituellement 24 à 36 heures.

L'événement pluvieux à l'origine de la crue de décembre 2003 est intervenu suite à un mois de novembre bien arrosé qui a conduit à une saturation des sols largement au dessus des moyennes saisonnières. Les fortes précipitations du début de mois de décembre 2003 sont donc tombées sur des sols saturés et ont été concentrées sur la vallée du Rhône. Elles ont touché en même temps les bassins versants des deux rives du Rhône, ce qui a provoqué des crues, plus au moins importantes, de l'ensemble des affluents de rive gauche et de rive droite.

C'est la conjugaison de ces facteurs majorants qui a conduit à une quasi-concomitance des crues de ses affluents de rive gauche et rive droite et à la crue exceptionnelle du Rhône de décembre 2003.

Dès le début de la crue, les équipes de mesures CNR ont été rapidement mobilisées. Elles ont ainsi réalisé, en moins de 4 jours, une trentaine de jaugeages sur le Rhône et ses affluents dont le tiers a été consacré au Rhône au droit de la station de Beaucaire. En même temps, ils ont pu aussi vérifier le bon fonctionnement des appareils de mesures automatiques et la cohérence de leurs enregistrements avec les échelles limnimétriques.

Grâce à cette mobilisation, la crue de décembre 2003 est sans doute la crue la mieux renseignée de toute l'histoire du Rhône, en terme de jaugeages avec un appareillage moderne et précis ainsi qu'en terme d'enregistrements en continu des niveaux le long de son parcours jusqu'à la mer (observations et mesures, photos aériennes, ...).

Dans le cadre de la conférence de consensus, l'État souhaite disposer d'une estimation du débit maximal instantané au droit de la station de Beaucaire au cours de la crue du Rhône de décembre 2003. Pour répondre à cette question, la présente contribution présente la démarche scientifique et technique qui a conduit à l'évaluation de la valeur de débit maximum proposé par la CNR. Cette évaluation s'appuie sur

- les observations hydrométriques et l'expertise accumulée par la CNR depuis plusieurs années sur ce secteur du Rhône,
- l'analyse hydrométéorologique et hydraulique de l'événement dans son ensemble,
- le travail de collaboration avec des bureaux d'étude et organismes de recherche.

Cette contribution, composée du présent document de synthèse et de plusieurs rapports et annexes, présente dans le détail les méthodes de travail des équipes de mesures, les moyens utilisés, les observations et leurs traitements ainsi que l'ensemble des éléments susceptibles d'éclairer le comité d'experts dans sa démarche.

En préambule, rappelons quelques observations essentielles qui permettent de donner un ordre de grandeur de la valeur maximale du débit atteint à la station de Beaucaire. Ces premières évaluations factuelles sont corroborées par les études et analyses dans la suite de l'exposé.

Une dizaine de jaugeages ont été réalisés au droit de la station de Beaucaire au plus fort de la crue, en montée de crue le 3 décembre 2003 et en décrue le lendemain. Parmi ces valeurs de débits jaugés 7 sont supérieures à 10500 m³/s et dont une à 11051 m³/s.

Cette dernière valeur a été jaugée en montée de crue le 3 décembre vers 12h30, soit 15 heures environ avant le passage du maximum de la crue qui a été atteint dans la nuit du 3 au 4 décembre. Il n'a donc pas pu être jaugé.

Entre ce dernier jaugeage et le passage de la pointe de la crue, les deux affluents les plus importants et les plus proches en amont de Beaucaire, la Durance à Bonpas et le Gard à Remoulins ont atteint leurs débits maximum le 3 décembre respectivement vers 13h00 et 24h00. La Durance se jette dans la retenue de Vallabrègues et le Gard se jette dans le vieux Rhône en aval du barrage de Vallabrègues. L'analyse des hydrogrammes de ces deux affluents montre qu'ils ont enregistré une augmentation respective de débit de 750 m³/s entre 5h00 et 13h00 pour la Durance et de 800 m³/s pour le Gard entre 15h00 et 24h00. Les temps de transferts entre les stations hydrométriques de ces deux affluents et Beaucaire sont estimés entre 6 et 7 heures pour la Durance et entre 2 et 3 heures pour le Gard. Compte tenu de ces temps de transfert, on constate que ces apports supplémentaires de la Durance et du Gard sont passés à Beaucaire après le dernier jaugeage de débit réalisé à cette station le 3 décembre vers 12h30. Ce jaugeage de 11051 m³/s ne tient donc pas compte des apports de débits supplémentaires qui ont permis avec les apports du Rhône amont d'atteindre le maximum de la crue à Beaucaire.

Cette augmentation de débit a été confirmée par l'enregistrement des niveaux au limnigraphe aval barrage de Vallabrègues situé sur le Rhône à la confluence avec le Gard. Après un léger infléchissement dans la matinée du 3 décembre, les niveaux au droit de ce limnigraphe ont repris leur progression avec gradient constant jusqu'à l'atteinte du maxi vers 01h00 heure le 4 décembre. Par contre, l'examen de l'enregistrement à Beaucaire montre une stabilisation des niveaux à partir de 20h00 alors que les niveaux amont continuaient d'augmenter. Cette stabilisation peut s'expliquer par l'effet de :

- un écrêtement des débits dans les champs d'expansion en amont de Beaucaire,
- ou un remous hydraulique aval du à des conditions d'écoulement particulières.

Les observations (laisses de crue et enregistrement de niveaux du Rhône) ainsi que les résultats de simulations mathématiques montrent que les champs d'expansion, situés entre les deux affluents (Durance et Gard) et Beaucaire, et particulièrement la plaine de Boulbon-Vallabrègues, étaient saturés le 3 décembre dans l'après midi. Ils n'ont donc pas pu retenir les apports supplémentaires de la Durance et du Gard qui ont transité à Beaucaire après le dernier jaugeage de 12h30.

Par ailleurs, l'examen des niveaux enregistrés aux stations en aval de Beaucaire montre que les maxima en niveau de la crue ont été atteints en partant de l'aval vers l'amont contraire au sens de la propagation des débits de la crue. Les maxima ont été enregistrés le 3 décembre vers 11h à Saint Gilles, 18h à Fourques, 19h à Arles, 20h à la prise d'eau du canal BRL (CNABRL) et le 4 décembre vers 3h à Beaucaire.

Ces phénomènes hydrauliques sont concomitants aux ruptures de digues survenues le 3 décembre 2003 dans le Petit Rhône (à Claire-Farine commune de Saint Gilles vers 8h00 et à la Petite Argence - commune de Fourques à partir de 10h00). Le remous résultant s'est ainsi propagé en s'amortissant de l'aval vers l'amont. Il a été accentué, dans une moindre mesure, par l'impact des déversements en rive gauche du Rhône suite à la rupture des trémies SNCF qui s'est produite à moins de 4 kilomètres en aval de Beaucaire dans la nuit du 3 décembre vers 21h00, quelques heures seulement avant le passage du maximum de la crue.

Les études sur modèles mathématiques ont montré que ce remous aval est à l'origine de la stabilisation des niveaux à Beaucaire.

En conclusion, sans prétendre être une démonstration scientifique, ces observations et mesures montrent que le débit maximum de la crue de décembre 2003 a pu atteindre ou dépasser 12000 m³/s à la station Beaucaire.

Rappelons que dans le cadre de l'étude globale pour une stratégie de risque inondation, l'étude hydrologique réalisée par le bureau d'étude SAFEGE avait déjà annoncé que des crues relativement modestes (de l'ordre de Q10) de plusieurs affluents du Rhône avec un débit soutenu du Rhône amont ou de la Saône suffisent à créer une crue exceptionnelle à Beaucaire. Le cas de la crue de décembre 2003 est un bon exemple de cette situation annoncée.

3 GENESE ET CONTEXTE HYDROMETEOROLOGIQUE DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003

3.1 GENESE DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003

S'appuyant sur l'ensemble des mesures dont elle dispose, Météo France a analysé pour le compte de la CNR les conditions météorologiques ayant conduit aux crues remarquables du début de décembre 2003 sur le Rhône et ses affluents, en aval de Lyon. Ce chapitre présente les principaux résultats de cette analyse. Le rapport réalisé par Météo France est joint en annexe I.

L'événement de décembre 2003 a été précédé d'un mois de novembre globalement pluvieux sur les bassins du Rhône et de ses principaux affluents. Les précipitations ont été très fortes sur les hauts bassins cévenols et également élevées sur toute la partie sud du Rhône.

La carte de suivi de l'état des réserves en eau du sol du mois de novembre 2003 montre que les sols de la majorité des sous bassins du Rhône dépassaient largement la saturation normale. Les fortes précipitations du début de décembre 2003 sont donc tombées sur des sols fortement saturés particulièrement pour les affluents cévenols et des Alpes du sud.

L'épisode pluvieux de début décembre 2003 a été classé dans le type méditerranéen extensif. Il s'agit d'un phénomène méditerranéen classique lié à une perturbation provenant d'une collision entre des masses d'air froid et de l'air chaud provenant de la Méditerranée saturé en humidité. La rapidité de la crue de décembre 2003 est due à cet épisode pluvio-orageux intense et généralisé sur le quart sud-est de la France, 20 départements ont été concernés par la mise en vigilance orange de Météo France. Le caractère remarquable des pluies vient principalement de la très grande surface concernée par les précipitations les plus abondantes sur les bassins versants du Rhône en aval de Lyon. La quasi totalité des affluents du Rhône situés entre Lyon et la mer ont été affectés.

Cet épisode a été aussi caractérisé par sa durée de plus de 48 heures alors qu'habituellement des phénomènes similaires ne dépassent pas 24 ou 36 heures. La simultanéité de fortes pluies de part et d'autre des deux rives du Rhône et le contexte antérieur de forte saturation des sols sont les facteurs majorants qui ont conduit aux conséquences hydrologiques exceptionnelles observées en ce début de décembre 2003.

4 PROPAGATION DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003 ET EVOLUTION DES DEBITS DU RHONE JUSQU'A BEUCAIRE

4.1 OBSERVATIONS HYDROMETRIQUES ET EVOLUTION DES DEBITS DU RHONE ET SES AFFLUENTS

Pour suivre et surveiller l'évolution des débits de crues du Rhône en temps réel, la CNR dispose d'un réseau de stations hydrométriques, de plus en plus dense, réparti le long du Rhône et de ces affluents. Une description de ce réseau ainsi que les moyens et matériels de son exploitation est détaillée dans le rapport "évaluation de la pointe de la crue de décembre 2003 à Beaucaire - Analyse hydrométrique " Pièce 2 de la présente contribution.

Dès le début de la crue de décembre 2003, toutes les équipes de terrain ont été mobilisées et ont réalisé de nombreuses mesures et observations sur le secteur concerné par la crue et tout particulièrement le secteur de Beaucaire.

Toutes les données recueillies ont été validées par des vérifications et analyses critiques des enregistrements automatiques ainsi que des mesures et observations sur le terrain. Les paragraphes suivants présentent une description sommaire de l'évolution des débits du Rhône et de ses principaux affluents en réaction à l'épisode pluvio-orageux de décembre 2003. Cette description est basée sur les observations des stations hydrométriques traitées et archivées dans la base de données THALIE de la CNR. Les données du Gier à Givors et de la Cance à Sarras ont été extraites de la Banque Hydro, base de données hydrométriques de la DIREN.

De Lyon à Valence (voir plan §1.3)

A la station de Ternay en aval de Lyon le Rhône a enregistré un maximum de 2250 m³/s soit une crue d'une fréquence de retour inférieure à la décennale. Mais ce débit a été soutenu durant toute la période de crue grâce aux apports des affluents amont, avec notamment la Saône, dont un des affluents principaux, l'Azergues a connu une crue de période de retour 50 ans environ.

En aval, les affluents de rive droite ont enregistré de fortes réactions dès l'après midi du 1er décembre. Les débits atteindront le pic de crue le lendemain entre 14 heures et 15 heures, environ 330 m³/s sur le Gier à Givors, 420 m³/s sur la Cance à Sarras et environ 900 m³/s sur le Doux à Grand Pont.

En rive gauche, seule l'Isère a apporté une contribution significative. Son débit, déjà soutenu, augmente progressivement pour atteindre son pic de 1510 m³/s dans la nuit du 2 décembre en retard d'une douzaine d'heures par rapport aux affluents de rive droite. Soit une période de retour légèrement inférieure à la crue décennale.

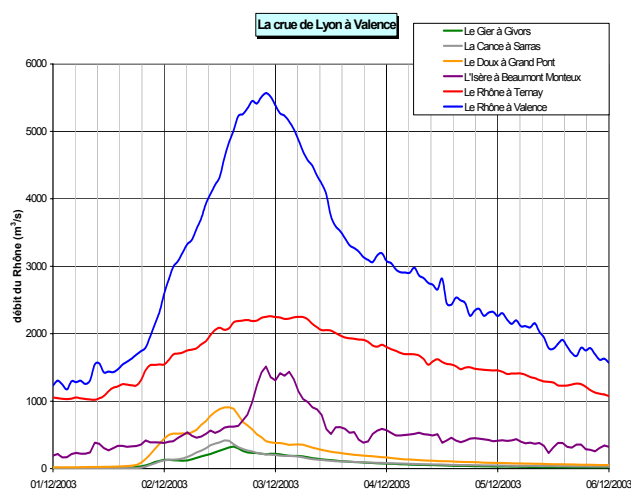


Figure 1 – La crue de décembre 2003 de Lyon à Valence

Le Rhône à Valence, déjà soutenu par les débits du Rhône amont et de l'Isère enregistre une forte progression dans la nuit du 1^{er} décembre. Dès le lendemain, le gradient de montée est renforcé par l'arrivée quasi-concomitante des apports de la rive droite et de l'Isère. Le débit maximum d'environ 5550 m³/s est atteint dans la nuit du 2 décembre vers 22h. Soit une crue décennale.

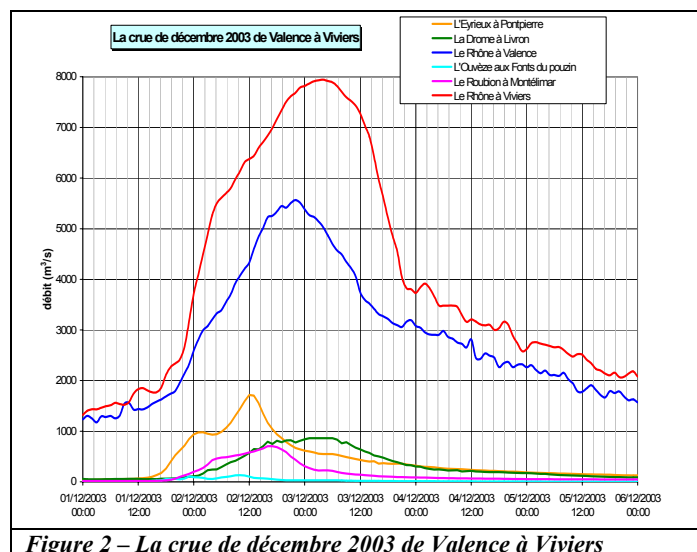


Figure 2 – La crue de décembre 2003 de Valence à Viviers

De Valence à Viviers (voir plan §1.3)

Dès le 1^{er} décembre matin, le débit du Rhône à Viviers a commencé à augmenter progressivement. Sous l'influence des apports des deux affluents de rive droite l'Eyrieux et l'Ouvèze, le gradient de montée de crue s'est accentué dans la soirée pour atteindre des valeurs d'environ 400 m³/s/heure. Le débit maximum enregistré par l'Eyrieux a atteint 1720 m³/s le 2 décembre vers midi à la station de Pontpierrre. C'est l'affluent qui a apporté la contribution la plus importante entre Valence et Viviers avec deux phases de fort gradient de montée séparées d'un pallier d'environ 6 heures

L'Ouvèze affluent proche de l'Eyrieux a réagi d'une façon similaire aux précipitations avec des débits plus faibles.

A partir du 2 décembre, ce sont les deux affluents de rive gauche, la Drôme et le Roubion, qui ont soutenu le débit du Rhône à Viviers jusqu'à l'atteinte de son maximum de 7950 m³/s le 3 décembre vers 04 heures du matin. La période de retour de ce débit est estimée à 70 ans, la crue centennale estimée à 8100 m³/s au droit de cette station.

La Drôme a aussi enregistré une valeur de débit de 860 m³/s proche de la crue centennale.

De Viviers à Beaucaire (voir plan §1.3)

Les trois affluents de rive droite en aval de Viviers, Ardèche, Cèze et Gard ont amorcé leur crue dès le 1^{er} décembre vers 17 heures. Des précipitations sont enregistrées sur les postes pluviométriques du Gard et de l'Ardèche depuis le 30 novembre 00h. Le cumul pluviométrique sur le secteur atteint en début de crue 50 mm sur le Gard et 100 mm sur l'Ardèche. Les pluies continuent à tomber sans discontinuer.

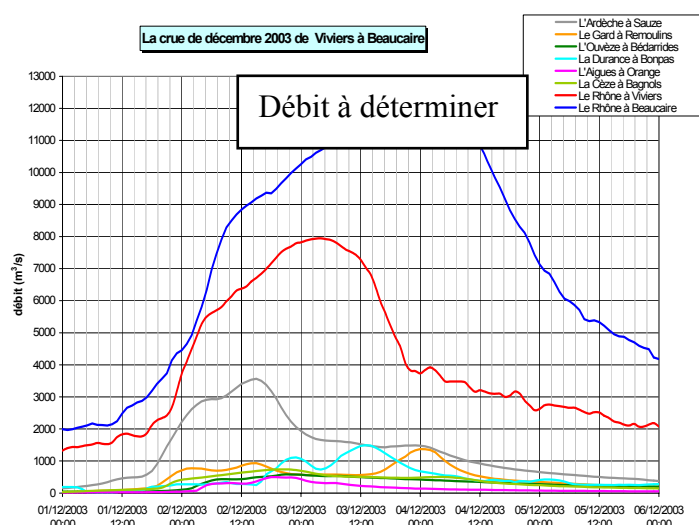


Figure 3 – La crue de décembre 2003 de Viviers à Beaucaire

Le 1^{er} décembre 2003, le Rhône à la station de Beaucaire enregistrait un débit de 2000 m³/s, supérieur au module annuel. A partir de midi, il amorce une progression soutenue grâce aux apports du Rhône amont et de l'Ardèche dans un premier temps. Puis les débits de l'Aigues, de la Cèze, de l'Ouvèze (affluent de rive gauche) et de la Durance renforcent le débit du fleuve.

Le débit du Rhône enregistre sa plus forte progression dans la matinée du 2 décembre avec un gradient moyen de l'ordre de 350 m³/s/heure. L'Ardèche a atteint son maximum de l'ordre de 3500 m³/s à la station de Sauze ce même jour vers 15h00. Au même moment le Gard enregistre une première pointe de l'ordre de 930 m³/s.

Le Rhône à Viviers entame la décrue le 3 décembre à partir de 4h00, en même temps la Durance amorce une deuxième montée de crue pour atteindre son maximum vers 14h00. C'est donc la Durance qui alimente le Rhône dans cette seconde partie de l'événement et qui maintient la progression de son débit. Cette progression est aussi soutenue, compte tenu des temps de transfert de débit, par le Rhône amont et les autres affluents qui avaient déjà entamé la décrue mais dont les débits restent encore assez importants. Pendant la dernière partie de l'événement, le Gard enregistre sa troisième pointe le 4 décembre vers 00h00.

Le Rhône à Beaucaire a enregistré son maximum dans la nuit du 3 au 4 décembre peu de temps après le passage du dernier pic de la crue du Gard.

Tableau de synthèse

Le tableau suivant résume les débits maximaux atteints pendant la crue aux stations hydrométriques du Rhône et des affluents :

RHONE (débits arrondis à +/- 50 m ³ /s près)				
	Stations	Débit (m³/s)	Heure	Période de retour
Rhône	Ternay	2250	02/12/2003 23:00	
Rhône	Valence	5550	02/12/2003 22:00	proche de 10 ans
Rhône	Viviers	7950	03/12/2003 04:00	70 ans
Rhône	Beaucaire	voir conclusion	04/12/2003 03:00	
AFFLUENTS (débits arrondis à +/- 10 m ³ /s près)				
Affluent	Stations	Débit (m³/s)	Heure	Période de retour
Saône	Couzon	1260	02/12/2003 03:00	Supérieure à 10 ans
Isère	Beaumont Montoux	1510	02/12/2003 22:00	Proche de 10 ans
Eyrieux	Pont Pierre	1720	02/12/2003 12:00	30 ans
Drome	Livron	860	03/12/2003 01:00	Proche de 100 ans
Roubion	Montélimar	700	02/12/2003 16:00	-
Ardèche	Sauze	3560	02/12/2003 15:00	10 ans
Doux	Grand Pont	900	02/12/2003 14:00	-
Cèze	Bagnols	740	02/12/2003 20:00	Inférieure à 10 ans
Aigues	Orange	500	02/12/2003 18:00	-
Ouvèze	Bédarrides	590	02/12/2003 21:00	-
Durance	Bonpas	1500	03/12/2003 13:00	Inférieure à 10 ans
Gard	Remoulins	1370	04/12/2003 00:00	Inférieure à 10 ans

NB : Les périodes de retour sont évaluées à partir des résultats du volet hydrologie de l'étude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône

Tableau 1 - Synthèse des débits maximaux atteints

4.2 PROPAGATION DE LA CRUE PAR MODELISATION MATHEMATIQUE ROLE DES CHAMPS D'EXPANSION

En complément aux observations et aux mesures hydrométriques, la propagation de la crue a été analysée par une approche hydraulique basée sur la simulation mathématique des écoulements. Cette démarche permet une critique supplémentaire des débits enregistrés sur le Rhône et ses affluents en comparant les résultats de calculs aux enregistrements des différents limnigraphes qui jalonnent les retenues du Rhône ainsi qu'avec les profils en long des lignes d'eau observées. Les résultats des simulations permettent de mieux comprendre la dynamique des écoulements, d'analyser le comportement des champs d'expansion et de déterminer leur impact sur la propagation de la crue.

La CNR dispose de modèles mathématiques représentant l'ensemble du Rhône de la frontière Suisse jusqu'à Beaucaire. Ils permettent la simulation en dynamique des écoulements du Rhône en tenant compte du fonctionnement spécifique des ouvrages hydroélectriques ainsi que du fonctionnement des différents champs d'expansion de la vallée du Rhône inondés naturellement ou par des déversements contrôlés.

L'architecture de ces modèles a été présentée et améliorée à partir des observations des élus et représentants d'associations de riverains lors de réunions publiques qui ont été organisées dans le cadre de l'étude globale pour une stratégie de réduction du risque inondation. L'étalonnage des modèles a fait aussi l'objet d'une validation par le bureau technique de l'étude globale.

La présentation des modèles ainsi que les résultats des simulations de la crue de décembre 2003 ont fait l'objet d'un rapport détaillé "Evaluation de la pointe de la crue de décembre 2003 à Beaucaire– Analyse hydraulique" pièce 3 de notre contribution. Les principales conclusions de ce rapport sont reprises ci-après.

4.2.1 Scénarios de propagation de la crue

La propagation de la crue de décembre 2003 a été simulée à l'aide de l'enchaînement des modèles des biefs du Rhône compris entre les stations hydrométriques de Viviers et Beaucaire. C'est donc l'hydrogramme enregistré à la station de Viviers qui a été injecté comme condition amont du premier modèle et le limnigramme enregistré à Beaucaire qui a été imposé comme condition aval du dernier modèle. Deux scénarios de propagation de la crue ont été simulés :

S1- Propagation de la crue du Rhône et des affluents principaux sans tenir compte des apports des bassins versants intermédiaires non jaugés. Les hydrogrammes des affluents injectés sont issus des enregistrements des stations hydrométriques. L'objectif de ce scénario est de simuler une propagation minimaliste des apports qui permettrait de déterminer la fourchette basse de l'hydrogramme de Beaucaire. Dans cet esprit le débit maximal de l'Ardèche a été pris égale à 3000 m³/s (valeur donnée par SEMA-DIREN) au lieu de 3500 m³/s enregistré par la CNR. De même la pointe de la Durance a été écrêtée à la confluence avec le Rhône à 1200 m³/s au lieu des 1500 m³/s enregistré à Bonpas.

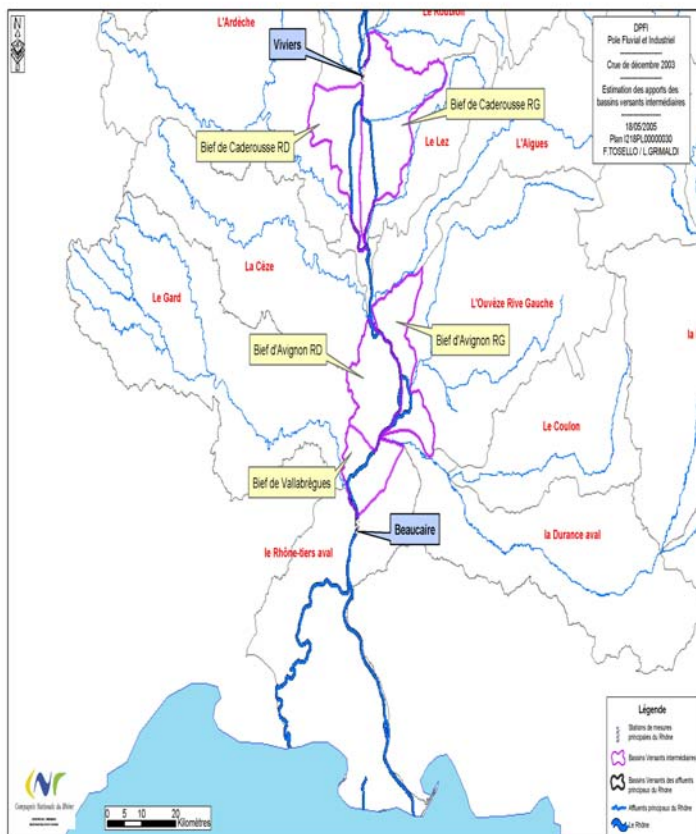


Figure 4 : Bassins versants intermédiaires

Le scénario 2 correspond à un schéma plus réaliste pour décrire la propagation de la crue et de l'événement pluvieux de décembre 2003.

S2- En plus des hydrogrammes des principaux affluents, des apports complémentaires des bassins versants intermédiaires ont été injectés sous forme de ruissellements répartis linéairement le long du Rhône au droit des secteurs concernés. Ces apports ont été calculés à partir des lames d'eau fournies par Météo-France. Il s'agit de lames d'eau précipitées cumulées sur 6h et calculées à partir des postes pluviométriques exploités par Météo-France sur l'ensemble du bassin du Rhône. Des bassins versants intermédiaires ont été identifiés le long du Rhône (voir figure 4) et les hydrogrammes des apports ont été déterminés en appliquant des coefficients de ruissellement les plus réalistes possible en comparaison avec les bassins versants jaugés les plus proches.

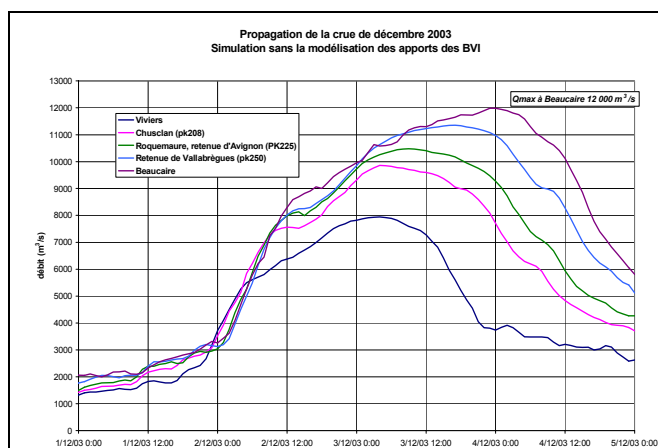


Figure 5 : Hydrogrammes résultat de la propagation de la crue de décembre sans apports des bassins versants intermédiaires

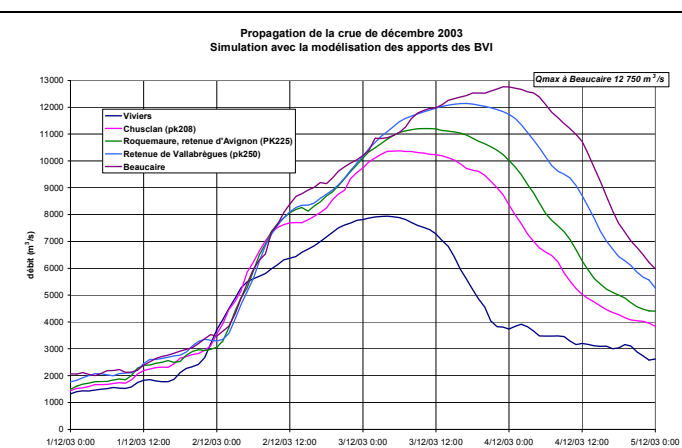


Figure 6 : Hydrogrammes résultat de la propagation de la crue de décembre avec apports des bassins versants intermédiaires

Le résultat de ces simulations conduit à un débit maximal à Beaucaire compris entre 12000 m³/s pour le scénario S1 (minimaliste) et 12 750 m³/s pour le scénario S2 (maximaliste) qui tient compte des apports des bassins intermédiaires (voir graphes 5 et 6).

4.2.2 Fonctionnement et influence des plaines inondables lors du déroulement de la crue

La modélisation a permis de calculer les volumes emmagasinés dans les plaines inondables et de mieux comprendre le comportement des champs d'expansion inondés par déversement contrôlé.

4.2.2.1 Plaines inondées naturellement

La plaine de Pierrelatte est l'un des champs d'expansion du Rhône le plus important. Il est inondé directement à partir du Vieux Rhône de Donzère-Mondragon. Son inondation a débuté dès le 2 décembre matin à partir d'un débit. Le volume retenu pour les plus hauts niveaux dans la plaine est de l'ordre **92 Millions de m³** avec une surface couverte d'environ 6000 ha.

Plus à l'aval **la plaine de Codolet et l'Ardoise** est inondée directement par la Cèze et par remous aval du vieux Rhône de Caderousse. Le volume retenu dans cette plaine au moment des plus hauts niveaux est estimé à de **10.7 Millions de m³**.

Le volume maximum atteint dans **la plaine d'Aramon-Monfrin** est de **22.7 Millions de m³**. Celle-ci est inondée par remous aval du Rhône et par le Gardon.

4.2.2.2 Plaines inondées par submersion contrôlée par digues déversantes

Deux plaines sont inondées par submersion contrôlée par des digues déversantes, il s'agit de la plaine de Caderousse et de la plaine de Boulbon-Vallabrègues.

Plaine de Caderousse :

L'inondation de la plaine de Caderousse est contrôlée par deux déversoirs passifs. Elle débute à partir d'un débit dans le Rhône de 7000 m³/s, dès que les niveaux de la retenue atteignent les cotes des crêtes des déversoirs. Cette plaine reçoit aussi les apports de la Meyne (affluent de rive gauche) et une partie des eaux de l'Aygues qui s'écoule dans son lit majeur.

Lors de la crue de décembre 2003, le remplissage de la plaine par les déversoirs a duré une trentaine d'heures. Le débit maximal déversé de l'ordre de 450 m³/s a été atteint le 3 décembre vers minuit. Au passage du pic de la crue ce débit n'était plus que de 20 m³/s. Par contre, le ressuyage de la plaine a participé à alimenter la crue en aval jusqu'au 4 décembre (voir figure 8). Le volume maximum de remplissage est de l'ordre de **27 Millions m³**.

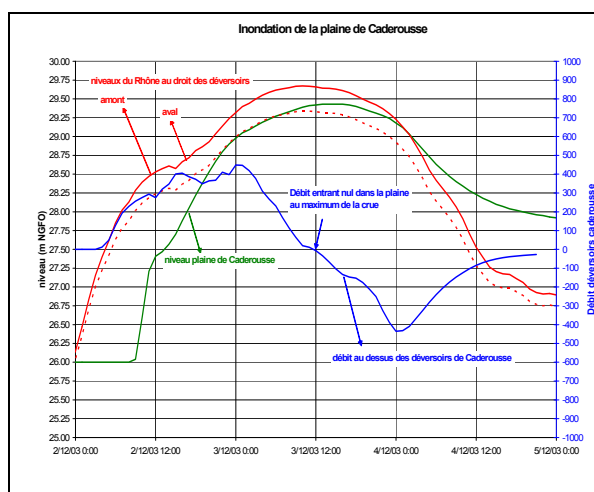


Figure 7 : Processus d'inondation de la plaine de Caderousse

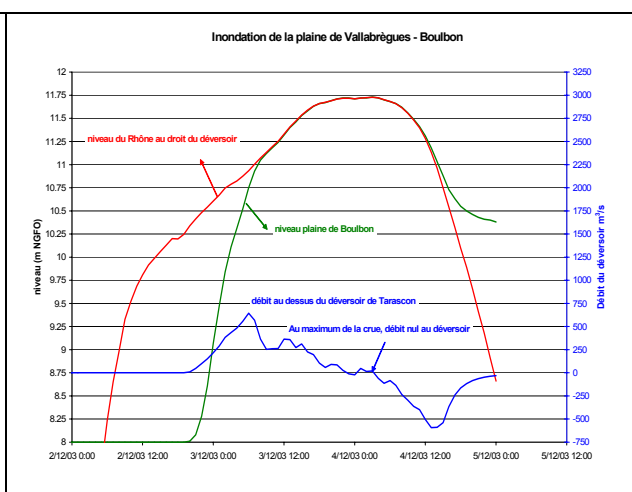


Figure 8 : Processus d'inondation de la plaine Boulbon-Vallabrègues

Plaine de Boulbon-Vallabrègues :

La plaine de Boulbon-Vallabrègues, située à moins de 5 km en amont de la station de Beaucaire, est inondée par un déversoir d'environ 500 m aménagé sur la digue rive gauche du canal de fuite de Vallabrègues. La plaine, qui reçoit aussi les apports de plusieurs roubines et ruisseaux, est inondée à partir d'un débit du Rhône de l'ordre de 9800 m³/s.

Le déversement a débuté dès le 2 décembre dans l'après-midi pour atteindre un débit maximal de 640 m³/s le 3 au matin. Au passage du pic de la crue dans le Rhône, le débit déversé était pratiquement nul. Le volume maximal retenu est de l'ordre de **24 Millions de m³**.

Les observations et enregistrements de mesures en particulier des hydrogrammes du Rhône à Viviers et des affluents caractérisent bien la crue. La propagation de ces débits par les modèles mathématiques permet de retrouver et de décrire le comportement du Rhône et de ses plaines inondables et d'encadrer par deux scénarios, l'un minimaliste et l'autre plus réaliste, le débit probable à Beaucaire.

5 METHODE DE JAUGEAGE ET PRECISION DE LA MESURE

Pour suivre et surveiller l'évolution des niveaux et des débits du Rhône et de ses affluents, la CNR a mis en place un réseau de plus en plus dense de stations hydrométriques. Elles relèvent en permanence de nombreuses données qui sont collectées et traitées en temps réel par un outil dédié THALIE (Traitements Hydrologiques Acquisitions Linnimétriques et Enregistrements) qui a été développé par la CNR. Les données brutes et le résultat des traitements sont archivés dans une base de données sécurisée.

En général, les débits sont issus principalement de la transformation des niveaux enregistrés à l'aide d'une loi hauteur/débit établie à partir de différents jaugeages réalisés au droit de chaque station hydrométrique.

Depuis une dizaine d'années, la CNR teste des stations de mesures directes de débit par Ultra-Son. Elle en possède actuellement 5 en service.

5.1 LES METHODES DE JAUGEAGES A LA CNR

Une équipe composée d'une dizaine de personnes intervient régulièrement sur le terrain pour réaliser des opérations de jaugeage. Elle se consacre entièrement à l'activité hydrométrique. En général, pour réaliser un jaugeage, l'équipe est constituée de cinq personnes dirigées par un responsable qui coordonne les opérations sur le terrain et qui reste en contact téléphonique régulier avec les équipes chargées de la surveillance du réseau de mesures et de l'évolution des débits en temps réel. Ce contact permet de juger de l'opportunité des opérations et de se renseigner sur les conditions de déroulement des mesures. L'équipe de jaugeage connaît parfaitement les sites tant en crue qu'en basses eaux. Ceci leur permet de s'adapter en temps réel pour effectuer des mesures de qualité et dans de bonnes conditions de sécurité.

L'équipe assure une veille technologique et suit continuellement l'évolution des méthodes et technologies de jaugeages. Ainsi la CNR a été un des premiers gestionnaires de réseau de mesures à s'équiper de l'ADCP (profileur de courant à effet Doppler) depuis 1994.

Les jaugeages sont réalisés dans l'objectif de couvrir toutes les gammes de débits des courbes hauteur/débit utilisées pour la transformation des niveaux en débits. Le choix d'une station est effectué selon son importance stratégique et les manques constatés lors des analyses périodiques des courbes de tarage. En période de crue, la priorité est donnée aux stations situées dans la zone la plus touchée par la crue et aux gammes de débits les plus rarement jaugés.

Un jaugeage consiste à mesurer le débit par l'exploration des champs de vitesses dans une section en travers du fleuve. Actuellement, la CNR utilise deux types d'appareils pour mesurer les champs vitesses : le moulinet et l'ADCP.

5.1.1 Le moulinet

Selon les conditions d'écoulement, trois types de moulinets sont utilisés actuellement à la CNR :

- C31 OTT monté sur un saumon dont le poids varie de 20kg à 130kg et déplacé avec un treuil depuis un téléphérique, une barque ou une cyclopotence ;
 - Micro-moulinet C2 OTT monté sur une perche tenue à la main ;
 - Courantomètre Nautilus C2000, moulinet électromagnétique monté sur une perche tenue à la main.
- Chaque moulinet à hélice ou électromagnétique possède une fiche de vie et un certificat d'étalonnage propre.

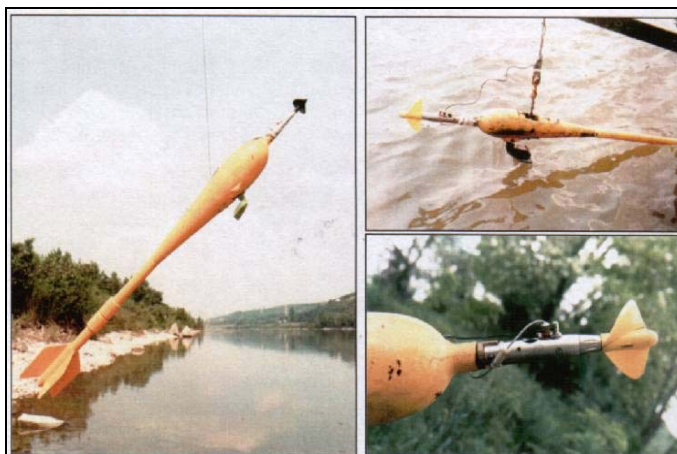


Figure 9 : Moulinet C31 monté sur saumon

Le choix d'une section de jaugeage se fait généralement en fonction de l'homogénéité du profil en travers et ses possibilités techniques de mesure. Selon les conditions hydrauliques de l'écoulement, les équipes de mesure réalisent un jaugeage complet ou un jaugeage de surface.

Le jaugeage complet

Un jaugeage complet (ou toute profondeur) est constitué de plusieurs verticales de mesure, choisies de façon à ce que le débit soit réparti le plus équitablement possible entre deux verticales. Conformément à la norme NF EN ISO 748, pour chaque verticale, la mesure de la vitesse est effectuée en six points.

Le jaugeage de surface

Le jaugeage de surface est en général, réalisé dans deux situations différentes. Le plus souvent il est effectué lorsque les conditions de jaugeage sont critiques : variation rapide du débit ou critères de sécurité empêchant de faire un jaugeage complet. Parfois, il peut être effectué immédiatement après un jaugeage complet, pour valider la valeur de débit mesurée.

Effectuer un jaugeage de surface consiste à mesurer la vitesse à une distance fixe (en général 20 cm) sous la surface de l'eau pour chaque verticale, puis à multiplier cette vitesse par la section de la verticale associée. En sommant ces valeurs, on obtient un débit Q_2 auquel on associe un coefficient de surface C_2 qui permet de calculer le débit total de la façon suivante :

$$Q_{total_calculé} = C_2 * Q_2$$

où C_2 est le coefficient de surface calculé à partir de jaugeages complets.

La CNR dispose actuellement d'une base de données contenant plus 600 valeurs de coefficients de surface. Elles lui permettent de cerner les incertitudes liées à ce paramètre lors du dépouillement des mesures.

La profondeur du fond est détectée par un signal lumineux ou sonore activé lorsque le saumon touche physiquement le fond de la rivière.

En période de crue, la détection du fond peut être délicate. Les fortes vitesses de l'écoulement peuvent introduire un biais par le déplacement vers l'aval du saumon par le câble qui n'est plus vertical. Dans ce cas, la mesure du fond peut être sur-estimée de quelques pourcents. Pour éviter la casse du matériel, à cause de la présence de rochers ou troncs d'arbres immergés se déplaçant sur le fond de la rivière, le jaugeur évite de descendre le moulinet jusqu'au fond. Dans ce cas, la profondeur risque d'être sous-estimée de quelques dizaines de centimètres. Ainsi, en forte crue, l'estimation du fond peut-être issue d'une mesure faite avec un sondeur ultrasonore soit pendant la crue, soit immédiatement après pour limiter les incertitudes sur la mesure faite avec le saumon.

5.1.2 L'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

L'ADCP permet d'obtenir directement une valeur de débit à partir de mesures basées sur l'effet Doppler. Des ondes acoustiques sont émises par l'intermédiaire de quatre transducteurs qui permettent de mesurer la vitesse des éléments en suspension (zooplankton, particules) qui se déplacent à la même vitesse que l'eau.

Le principe de la mesure du débit avec l'ADCP peut se comparer à celui de la mesure avec un moulinet : la section du cours d'eau est décomposée en profils verticaux de vitesses, pour lesquels un débit élémentaire est calculé. L'ADCP est fixé sur une embarcation qui effectue une traversée complète d'une berge à l'autre. Lors de cette traversée, de nombreuses verticales sont réalisées. Le débit total est alors la somme des débits élémentaires.

La détermination du débit dans une section est la moyenne d'au moins quatre mesures distinctes à l'ADCP. Chaque mesure fournit une valeur de débit. Si ces valeurs sont homogènes, elles sont validées et permettent de calculer le débit moyen pendant la durée du jaugeage. Les critères de validité portent sur le pourcentage de débit mesuré par rapport à l'ensemble de la section, le pourcentage de verticales validées ainsi que le déplacement du fond et l'écart entre les débits mesurés à chaque traversée. La durée moyenne d'une mesure de débit à l'ADCP est d'une heure.

La CNR possède 4 ADCP qui sont utilisés par les équipes de terrain selon les mesures à réaliser :

- Broadband 1200 kHz depuis 1994 ;
- Broadband 600 kHz depuis 1998 ;
- Workhorse 600 kHz depuis 2004 ;
- StreamPro 2 MHz depuis 2004.



Figure 10 : *ADCP Broadband 600 kHz monté sur barque*

En comparaison avec le moulinet, l'ADCP présente l'avantage de pouvoir réaliser des mesures dans de meilleures conditions de sécurité. L'appareil est monté sur une embarcation mobile indépendante non reliée à d'autres installations fixes par câble (ex : station téléphérique ou trille). L'ADCP permet aussi une mesure rapide très utile pour observer des régimes transitoires impossibles à analyser avec les méthodes classiques au moulinet.

L'ADCP est muni d'un compas magnétique interne qui lui permet de s'orienter dans l'espace, il mesure son déplacement par rapport au fond supposé fixe. Par conséquent, en cas de mouvement de fond lors de mesure en crue, la vitesse de l'eau mesurée par l'ADCP doit être corrigée. Le débit est, en général, sous-estimé lors d'un jaugeage avec l'ADCP en cas de déplacement des fonds vers l'aval.

Pour détecter et réduire l'impact des mouvements de fond sur la mesure de débit, en crue l'ADCP peut être couplé au système de positionnement par satellite DGPS qui permet de donner la position exacte de l'appareil. Une méthodologie de mesure et de correction des débits en cas de déplacement des fonds a été élaborée. Les mesures avec l'ADCP et les méthodes de correction sont présentées en annexes II et III.

N.B. : des essais de mesures réalisés à l'ADCP couplé avec le DGPS ont montré que l'ADCP utilisant la fréquence 600 KHz est moins sensible à l'influence des mouvements de fonds que l'ADCP 1200 KHz.

5.1.3 Précisions des mesures de jaugeages

La CNR réalise, actuellement 90% des mesures de débits à l'aide des ADCP et le reste avec les méthodes classiques au moulinet. Néanmoins, le moulinet reste la référence pour les mesures de débits qui sont cadrées par la norme NF EN ISO 748 et dont la précision est connue par rapport à un étalon de référence. En l'absence de norme équivalente pour l'ADCP, la CNR procède régulièrement à des mesures comparatives entre moulinet et ADCP. Depuis l'acquisition par la CNR du premier ADCP (Broadband 1200kHz) en 1994, dix-neuf campagnes de mesures comparatives entre le moulinet et cet appareil ont été réalisées.

Afin d'estimer l'incertitude sur les appareils de mesures de débits de la CNR, une étude a été menée en collaboration avec le CETIAT (Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques). Les principales conclusions de cette étude, jointe en annexe IV, sont les suivantes :

- Pour une mesure au moulinet, l'incertitude de la mesure dépend principalement de la précision intrinsèque du moulinet, le nombre de points par verticale et le nombre de verticales (bien que d'autres paramètres soient aussi à prendre en compte).
 - pour un jaugeage complet au moulinet réalisé dans d'excellentes conditions, l'incertitude minimale est de l'ordre de $\pm 5 \%$;
 - pour un jaugeage de surface, cette incertitude minimale varie de $\pm 8 \%$ à $\pm 14 \%$ selon la connaissance du coefficient de surface du site.
- Le constructeur de l'ADCP fournit les caractéristiques intrinsèques de l'appareil concernant les mesures effectuées, notamment l'incertitude sur la mesure de profondeur et sur la mesure de vitesse. Mais il ne fournit pas l'incertitude sur la mesure de débit. Néanmoins, l'analyse statistique des mesures comparatives réalisées sur le Rhône permet de déduire cette incertitude. Cette analyse montre que l'écart entre les débits mesurés au moulinet et à l'ADCP n'excède pas $\pm 7.5\%$.

La figure 11 représente la composante d'incertitude de la méthode ADCP en fonction de la composante d'incertitude de la méthode moulinet de manière à ce que la somme quadratique des incertitudes-types de ces deux composantes corresponde à une incertitude élargie constante à $\pm 7,9\%$ ($k = 2$ correspondant à un niveau de confiance de 95%). La courbe est donc tracée de façon à respecter l'équation ci-dessous :

$$U_{ADCP} = \sqrt{\left(\frac{7,9}{100}\right)^2 - U_{Moulinet}^2}$$

L'analyse de la figure 11 permet de conclure que l'incertitude sur la mesure ADCP (1200 kHz, appareil utilisé lors de cette étude) est nécessairement inférieure à $\pm 7,9\%$ (correspondant à une incertitude de $\pm 0\%$ pour un jaugeage au moulinet, incertitudes fournies avec un intervalle de confiance de 95%).

Les incertitudes moyennes des jaugeages au moulinet sont supérieures à $\pm 5\%$. Ceci permet de conclure que l'incertitude de mesure de la méthode ADCP est très certainement inférieure à $\pm 6\%$.

Une valeur plus réaliste de l'incertitude minimale des moulinets est $\pm 7\%$ conduit à une valeur de l'incertitude maximale de la méthode ADCP de $\pm 4\%$.

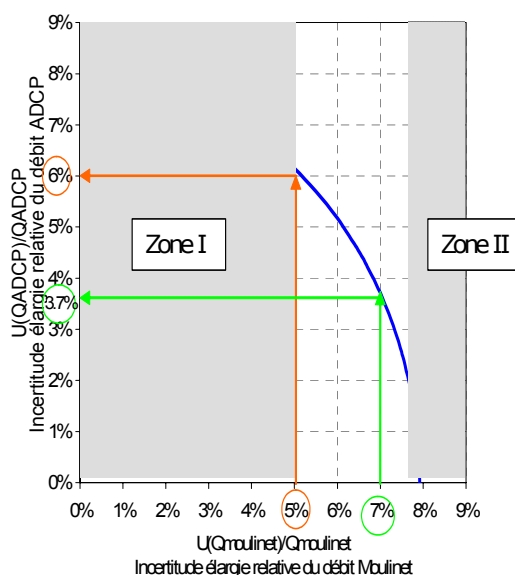


Figure 11 : Combinaison des composantes de l'ADCP BB 1200 kHz et du moulinet : en orange, $\pm 5\%$ d'incertitude minimale pour le moulinet ; en vert, $\pm 7\%$ d'incertitude réaliste pour le moulinet.

Compte tenu de l'incertitude sur l'incertitude minimale d'un jaugeage au moulinet, nous retiendrons que **l'incertitude d'un jaugeage à l'ADCP est de $\pm 5\%$** .

Les équipes de terrain de la CNR pratiquent les jaugeages à l'ADCP depuis une dizaine d'années et conservent leurs savoir faire de jaugeage aux moulinet. Des études conjointes avec le CETIAT permettent de déterminer la précision des mesures par ADCP alors même que les fabricants ne s'engagent pas.

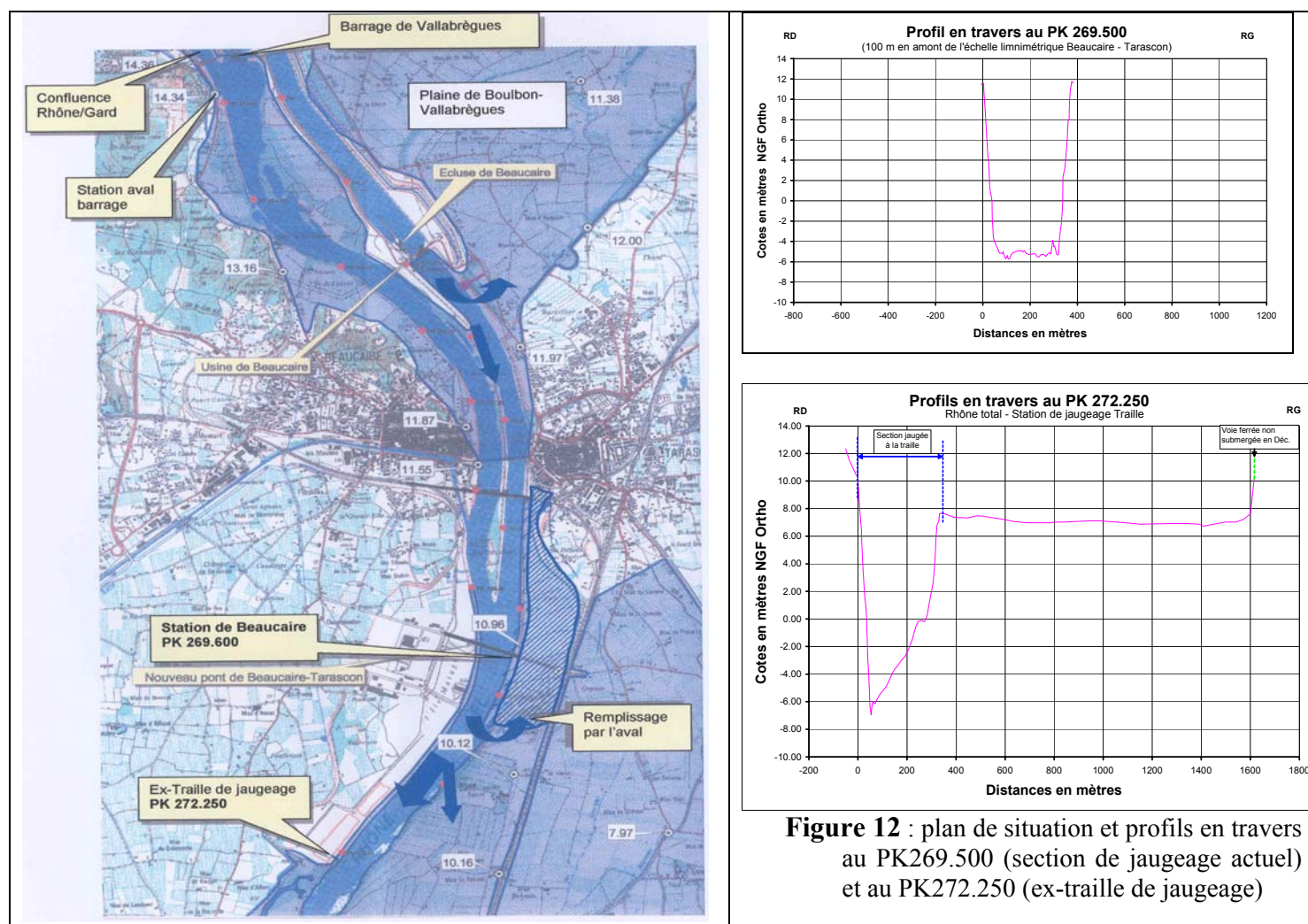
6 ANALYSE DE LA COURBE DE TARAGE DE LA STATION DE BEUCAIRE

6.1 PRESENTATION DE LA STATION DE BEUCAIRE (PK269.600)

L'échelle limnimétrique de Beaucaire existe depuis le XIX^{ème} siècle. Elle a été installée en 1840 au droit du Pont de Beaucaire (PK267.700) avec un relevé de 3 cotes par jour. C'est ainsi que des chroniques de débits historiques ont été constituées. Les enregistrements en continu ont débuté dans les années 1960.

Depuis la mise en service de l'aménagement de Vallabrègues, une nouvelle échelle a été installée en aval de la restitution au **PK 269.600** au droit de l'actuel pont de Beaucaire-Tarascon. C'est cette échelle qui constitue la **station de référence**. Elle a donc remplacé, depuis 1970 l'ancienne échelle qui se trouve dans le vieux Rhône et qui ne reçoit plus qu'une partie du débit du Rhône.

Les opérations de jaugeage étaient réalisées à une traille installée plus en aval au PK272.250. Cette traille est restée en service jusqu'en 1995, date à laquelle elle a été déposée. La section au droit de cette traille présente l'inconvénient de ne pas mesurer la totalité du débit transitant dans le Rhône lors de fortes crues. En effet, comme le montre la carte et les sections en travers ci-dessous, à partir d'une cote supérieure à 8.00 mNGF une partie du débit déborde dans le lit majeur du Rhône en amont de cette section de jaugeage.



Depuis 1994, les jaugeages sont réalisés au PK 269.500, 100m en amont de l'échelle limnimétrique dans une section non débordante. Néanmoins, les niveaux au droit de cette section restent influencés par les débordements aval tout proches. En effet, au-delà des cotes de débordements, la largeur au miroir des sections en travers passe de 300 m à une largeur comprise entre 700 et 1800 m. Ce qui conduit à une inflexion dans la variation des niveaux, pour un même gradient de débit la variation de niveau devient beaucoup plus faible. C'est un phénomène qui a son importance dans l'ajustement de la loi de tarage de la station de Beaucaire.

6.2 JAUGEAGES ET COURBE DE TARAGE DE LA STATION DE BEAUCAIRE

Sur la période 1992 à 2003, à la station de Beaucaire nous disposons d'une série de 108 jaugeages dont :

- 28 jaugeages au moulinet effectués à la traile de jaugeage entre (1992 et 1995) et au droit de l'échelle limnimétrique au PK 269.500 lors des crues d'octobre 1993, janvier 1994 et décembre 2003
- 80 jaugeages à l'ADCP effectués entre le 29/09/1994 et 04/12/2003 au droit de l'échelle limnimétrique au PK 269.500.

Le report de l'ensemble de ces mesures sur un graphique hauteur-débit 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).

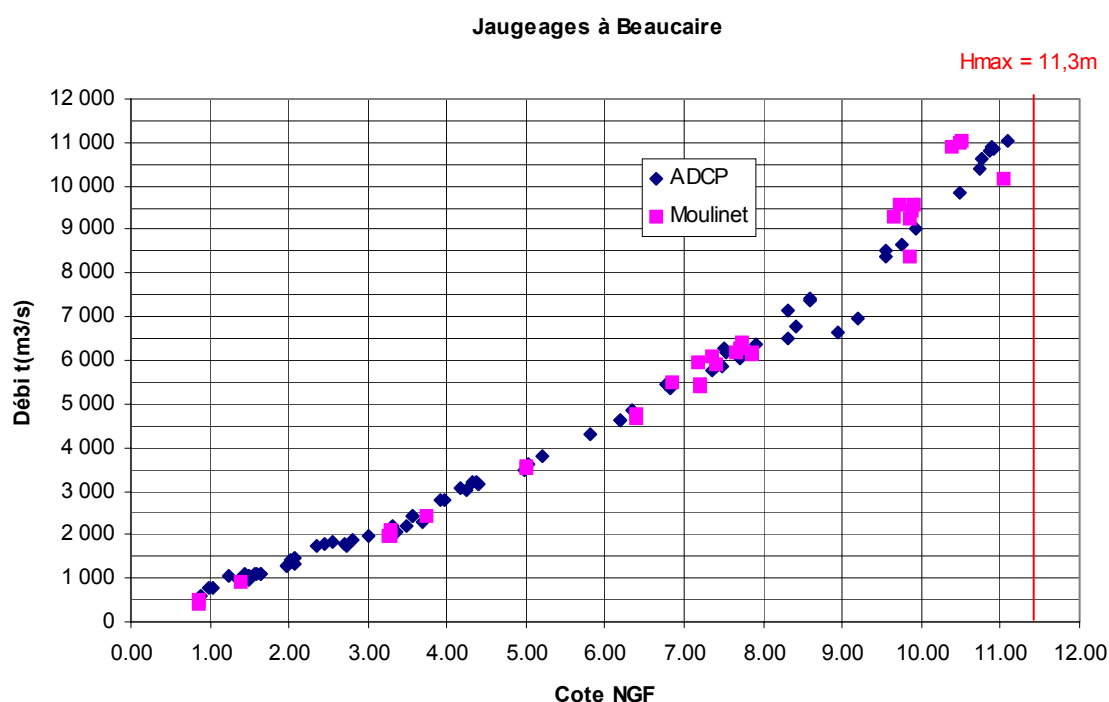


Figure 13 : Report des jaugeages du Rhône à Beaucaire (période 1992-2003)

Pour l'établissement des courbes de la loi hauteur/débit, la CNR a toujours privilégié l'utilisation de l'ensemble des informations disponibles, avec une analyse critique de la qualité et des conditions de réalisation de chaque jaugeage. Une "Charte qualité de l'hydrométrie, guide des bonnes pratiques" publiée en 1998 par le Ministère de l'environnement allait dans ce sens. Cette charte, conclusion d'un travail de groupe animé par M. N. Forray (à l'époque à la DIREN Bourgogne) recommandait pour le tracé de la courbe de tarage d'associer la personne qui connaît le mieux le site et son comportement hydraulique. Le tracé de la courbe doit être "*l'expression d'une interprétation de l'ensemble des mesures disponibles et du comportement hydraulique du site*" avec "*une analyse de chaque période chronologique progressivement déterminée*".

Dans un premier temps, c'est cette démarche qui a été privilégiée dans les analyses d'après crue. Tous les jaugeages ont été examinés ainsi que leurs conditions de réalisation. Une incertitude (ou un poids) a ainsi été affecté à chaque mesure selon l'appareil utilisé, le nombre de verticales, les conditions d'écoulement, ... Cette analyse a pris en compte les conclusions de l'étude du CETIAT sur les incertitudes des appareils de mesures CNR.

La loi hauteur/débit (figure ci-après) a été tracée en intégrant l'ensemble des jaugeages validés et en s'ajustant au mieux aux incertitudes affectées à chacun. Cette démarche a été rendue possible grâce à l'abondance du nombre de jaugeages qui couvre toute la gamme des débits sur une période relativement courte (1992 à 2003).

Dans un deuxième temps deux missions d'expertise de cette courbe ont été confiées au CETIAT et au CEMAGREF. C'est l'objet des paragraphes suivants.

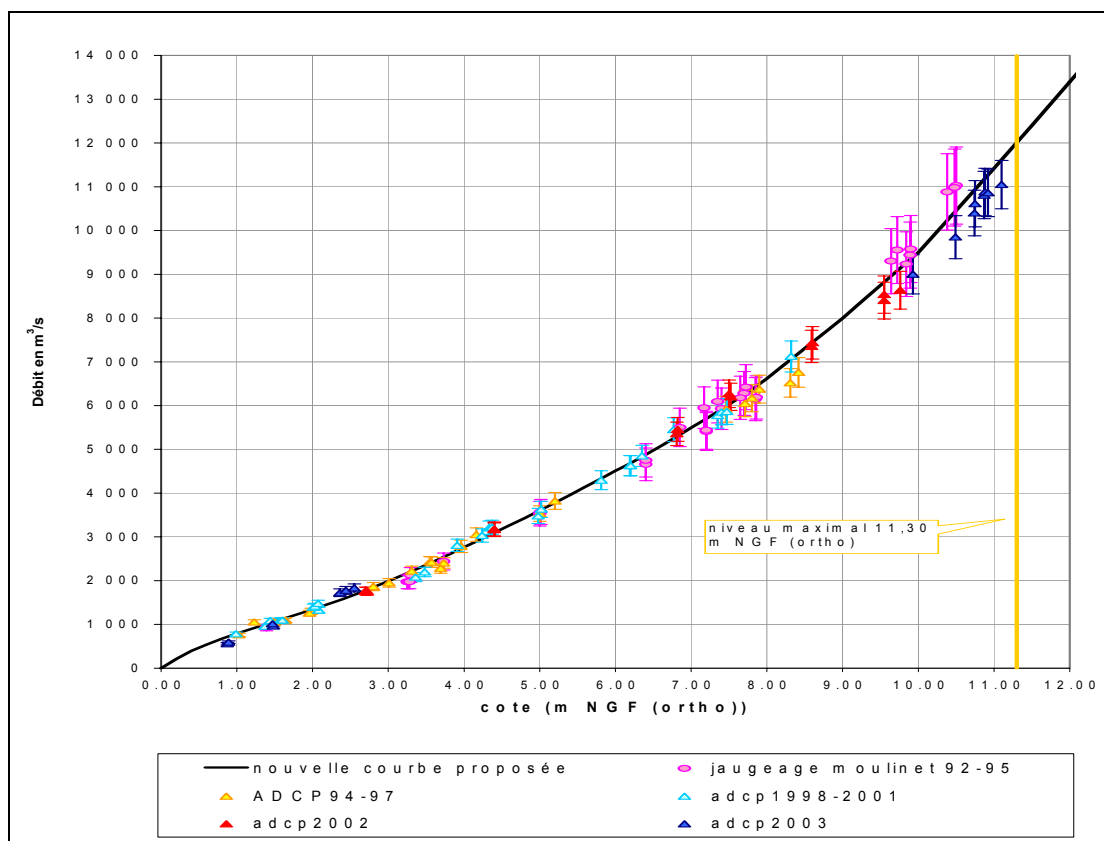


Figure 14 : Courbe de tarage à la station de Beaucaire proposée par la CNR après la crue de décembre 2003.

6.3 EXPERTISE DE LA COURBE DE TARAGE DE LA STATION DE BEAUCAIRE

Afin de critiquer et d'analyser la cohérence des jaugeages réalisés au droit de la station de Beaucaire entre 1992 et 2003, d'établir une loi de tarage et de déterminer les incertitudes liées à l'utilisation de cette courbe de tarage, la CNR a confié une mission d'expertise au CETIAT et au CEMAGREF de Lyon. La démarche et les résultats de chacun de ces experts sont présentés ci-après.

6.3.1 Expertise du CETIAT

L'étude réalisée par le CETIAT est jointe en annexe V. Après une première analyse des jaugeages CNR, le CETIAT a reconstitué une nouvelle série en enlevant tous les jaugeages de cote inférieure à 3 m, les jaugeages considérés comme aberrants (deux jaugeages ADCP du 10 septembre 2002) ainsi que les jaugeages de surface redondants avec un jaugeage complet ou un jaugeage à l'ADCP plus précis.

Parmi les jaugeages de cette nouvelle série, le CETIAT a défini 3 échantillons sur lesquels ont été appliquées plusieurs lois d'ajustement. Les échantillons choisis sont les suivants :

Echantillon n° 1 : composé de l'ensemble de la nouvelle série des jaugeages

Echantillon n° 2 : composé des jaugeages de l'échantillon 1 réalisés de 1992 jusqu'en 1994 (comprenant les jaugeages de la crue d'octobre 1993 et de janvier 1994)

Echantillon n° 3 : composé des jaugeages de l'échantillon 1 réalisés à partir de mars 1994 (jaugeages réalisés après la crue de janvier 1994)

Les échantillons 2 et 3 sont des sous échantillons du premier. Ce choix a été fait pour analyser un éventuel changement de la courbe de tarage suite aux deux fortes crues d'octobre 1993 et janvier 1994. Le Rhône n'a pas connu de crue importante depuis le début des années 1950 jusqu'au début des années 1990 où il y a eu une succession de crues moyennes à fortes.

Des ajustements de la courbe de tarage ont été effectués en appliquant 4 lois d'interpolation: régression linéaire, régression polynomiale du second degré, loi puissance et loi de Manning-Strickler de la forme $Q = b \cdot h^{5/3} + a$.

L'analyse, principalement, de la répartition des résidus a conduit le CETIAT à écarter la loi de régression linéaire et la loi en puissance qui ont été jugées moins satisfaisantes que les deux autres. Puis le choix a été porté sur la loi Manning-Strickler considérée comme la loi physique représentative des écoulements à surface libre en régime permanent contrairement à la loi polynomiale qui est purement mathématique.

L'étude statistique de la courbe a conduit le CETIAT à distinguer deux domaines différents justifiés par un comportement différents pour les niveaux en dessus et au dessous de la cote 8.50 m NGF. Le choix de ces deux domaines est confirmé par l'observation sur le terrain. C'est à partir de cette cote que l'influence des débordements dans le lit majeur en aval commence à se faire sentir sur les niveaux au droit de la station de Beaucaire.

Ainsi, la loi de Manning-Strickler appliquée pour l'échantillon n° 1 avec et sans distinction de domaine conduit au résultat figurant sur le graphique ci-dessous :

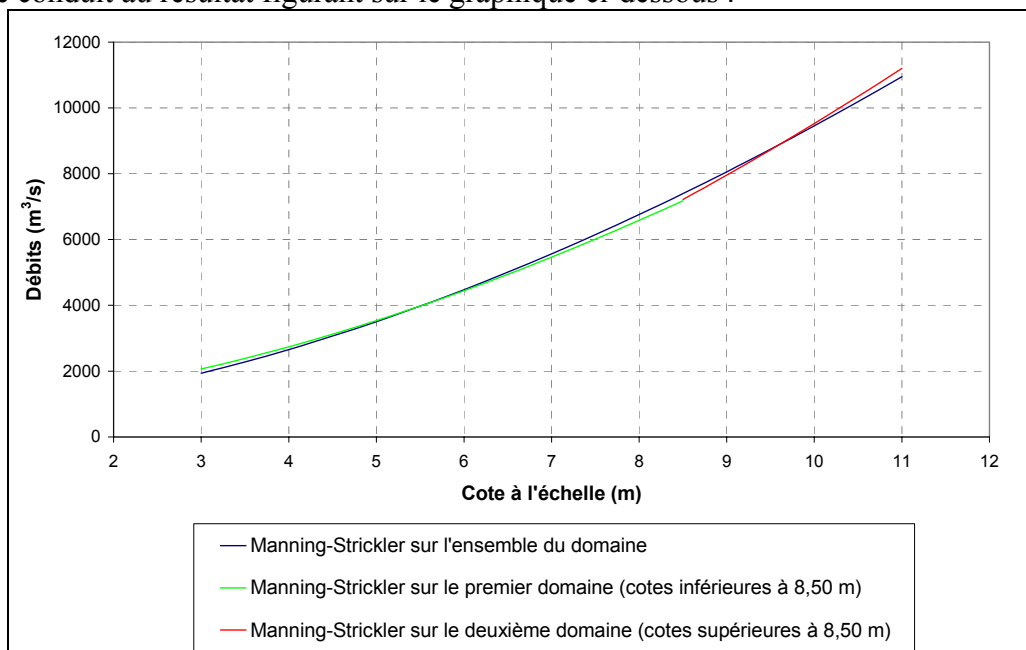


Figure 15 : Application de la loi de Manning-Strickler à l'échantillon n° 1 sur l'ensemble du domaine et sur chacun des sous-domaines

La même loi appliquée dans les mêmes conditions aux deux échantillons 2 et 3 conduit au résultat suivant reporté sur le graphe ci-dessous :

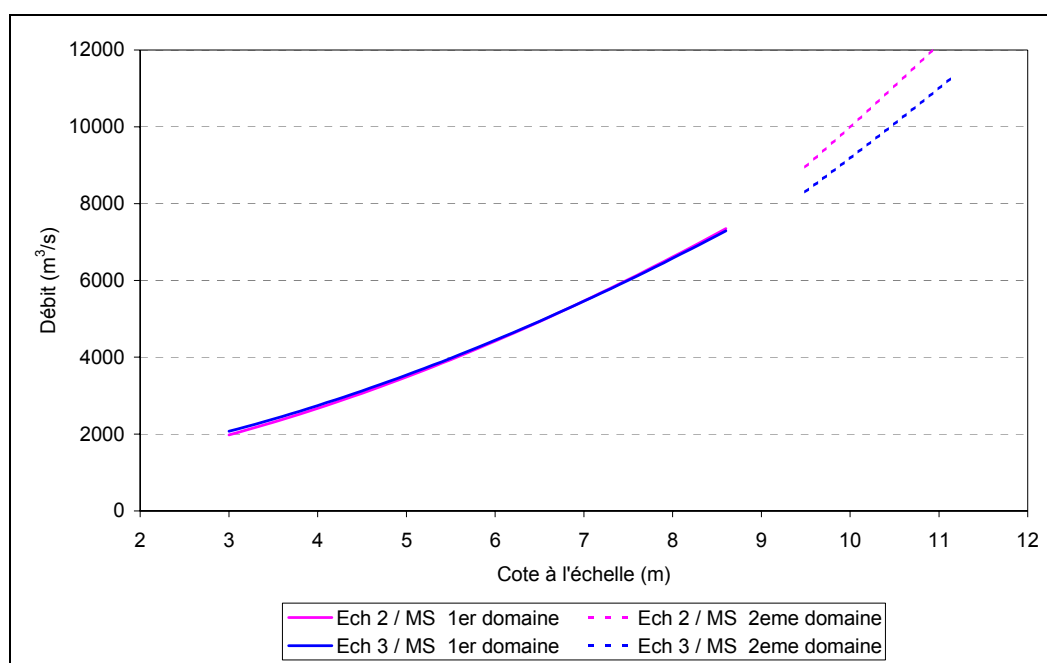


Figure 16 : Application de la loi de Manning-Strickler sur les échantillons n° 2 et n° 3 en distinguant deux domaines

On constate une bonne stabilité de la courbe pour le domaine des cotes inférieures à 8.5 m NGF pour tous les jaugeages réalisés de 1992 à 2003. En revanche, l'écart est sensible entre les courbes des deux échantillons pour les cotes supérieures à 8.5 mNGF.

Cet écart pourrait être interprété comme une évolution de la courbe de tarage de Beaucaire depuis les crues de 1993 et 1994. L'étude des évolutions topographiques et bathymétriques des lits du Rhône disponibles ne permet pas de conclure avec certitude. Nous y reviendrons plus loin, lors des choix possibles de la courbe.

Le CETIAT conclut que l'application de Manning-Strickler conduit à une valeur d'incertitude maximale sur le débit de $\pm 14\%$. Cette incertitude est exprimée à un niveau de confiance de 95 % et intègre une évolution possible des sections mouillées du lit (mineur et majeur) du Rhône en aval de Beaucaire.

6.3.2 Expertise du CEMAGREF

Le CEMAGREF a réalisé une analyse critique de la série de jaugeages fournie par la CNR. Son expertise fait l'objet d'une contribution propre à la conférence de consensus, elle n'est donc pas jointe en annexe.

L'expertise du CEMAGREF comporte **trois parties** :

La première commente l'estimation des incertitudes sur les jaugeages réalisée par le CETIAT. Il estime que les valeurs de 5 à 14% pour les mesures au moulinet et 6 à 7 % pour les jaugeages à l'ADCP 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 jaugeages d'octobre 1993 et janvier 1994 ont fait l'objet d'étude de cohérence plus approfondie.

L'étude faite par P. Bois⁽¹⁾ (oct. 2004) a mis en évidence que ces 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 RH . Dans l'hypothèse de Manning-Strickler, ces deux variables sont reliées par la relation :

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

Le report des points sur un graphique $\ln(V_{moy}) = f(\ln RH)$ donne une indication sur l'homogénéité des différents jaugeages.

Or cette relation n'est valable que pour les écoulements en régime uniforme et permanent. On n'est loin de remplir ces conditions dans le cas des crues du Rhône à Beaucaire.

Lors des crues la pente de la ligne d'énergie n'est pas non plus constante comme le montre le graphe ci-après pour les plus fortes crues du Rhône.

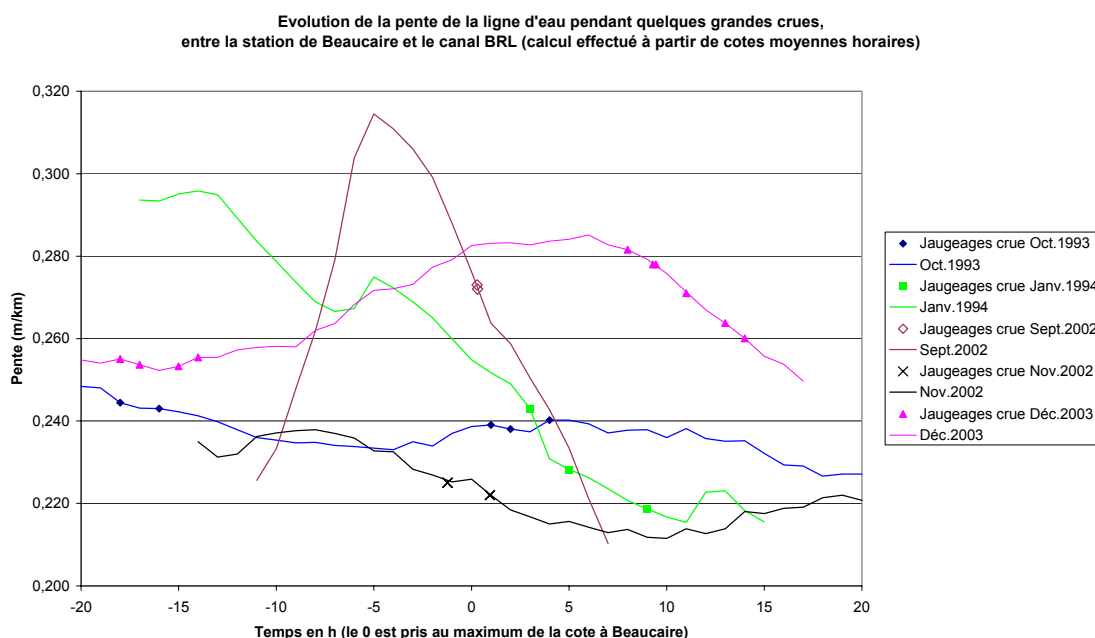


Figure 17 : Analyse de la dynamique des crues à Beaucaire

La reprise du graphique de cohérence hydraulique pour critiquer les jaugeages de la crue de janvier 1994, en incluant l'information sur la pente de la ligne d'eau, montre que la qualité de la régression ($r^2 = 0.84$) est analogue à celle obtenue en excluant les jaugeages de 1994 ($r^2 = 0.80$) (voir figure ci-après).

Le CEMAGREF conclut que la tendance à la dispersion constatée sur la courbe de tarage pour les plus forts jaugeages n'est pas à expliquer par des erreurs de mesure ou par un détamage de la station dû à un changement de géométrie du lit mineur ou du lit majeur. 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

¹ cf. annexe 2 du rapport de l'IGE sur « la sécurité des digues du delta du Rhône : politique de constructibilité derrière les digues »

de courbes de tarage. Ainsi, le tracé retenu depuis 2004 par la CNR, qui passe par la majorité des intervalles d'incertitude sur la mesure des débits, lui 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.

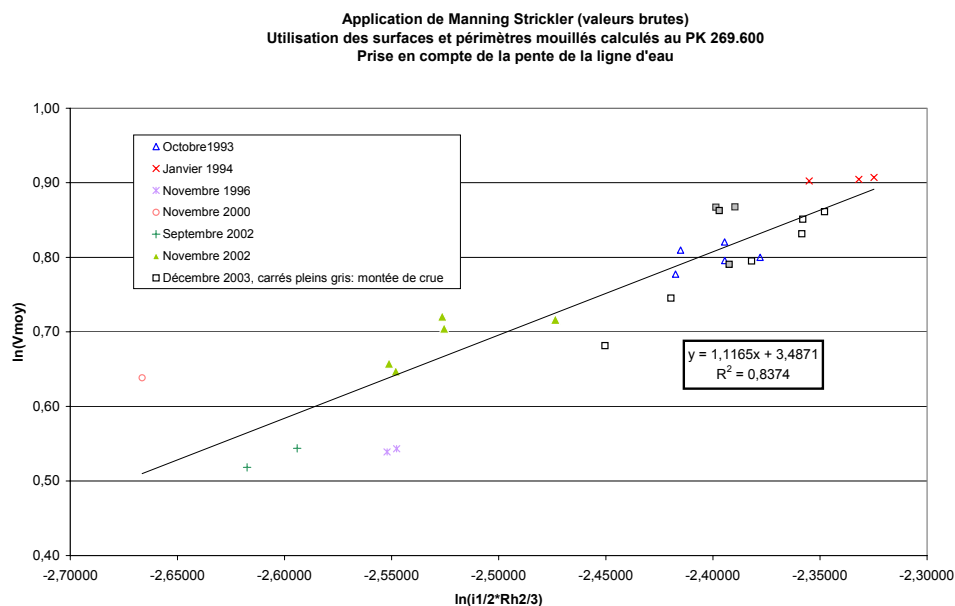


Figure 18 : *Contrôle de cohérence hydraulique des plus forts jaugeages, en rajoutant l'information sur la pente de la ligne d'eau*

La dernière partie traite de l'extrapolation de la courbe de tarage pour le calcul du débit de la crue de décembre 2003. Le CEMAGREF propose la courbe de tarage ci-après obtenue à partir d'une régression polynomiale de second degré en distinguant deux domaines avant et après débordement aval.

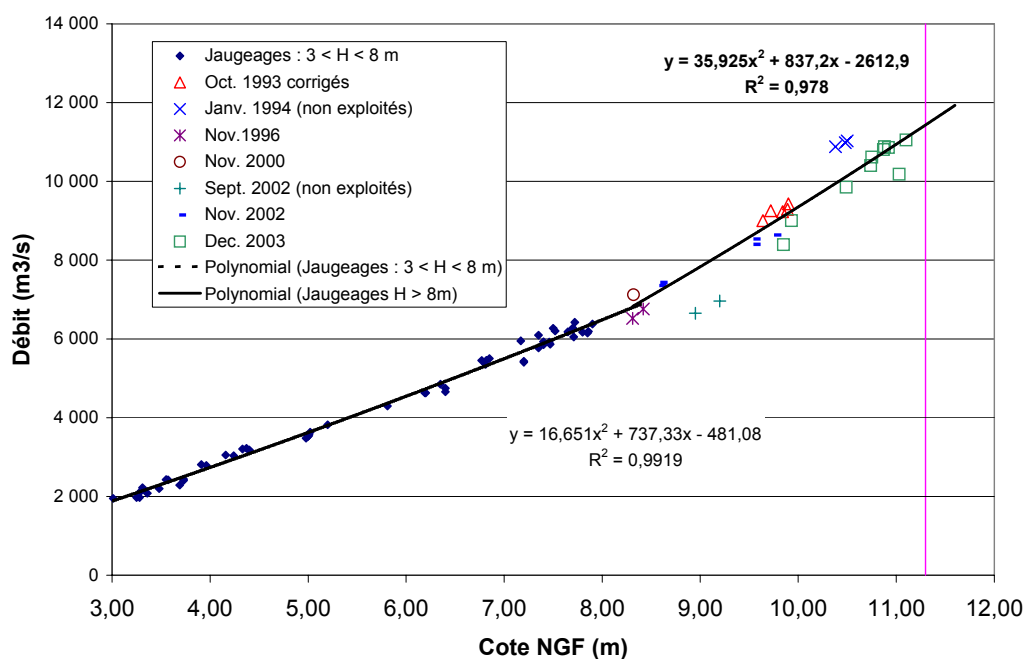


Figure 19 : *Tracé de la courbe de tarage à Beaucaire après critique des jaugeages*

L'analyse, par le CEMAGREF, de la dynamique des crues du Rhône à Beaucaire montre que le maximum de vitesse est situé avant celui de la cote pour l'ensemble des crues étudiées sauf pour celle de décembre 2003. Le cas particulier de la crue de décembre 2003 pourrait être dû à l'abaissement de la ligne d'eau consécutif aux brèches des digues du Petit Rhône.

6.4 CRITIQUE ET BILAN DES RESULTATS D'ANALYSE

A l'examen de la série de jaugeages par rapport à la courbe de tarage présentée figure 13 retenue pour la première analyse, les jaugeages de 1993 et 1994 ont tendance à être au-dessus de la courbe et ceux de 2002 et 2003 ont une tendance à être en dessous. A partir de ce constat il est légitime de se poser la question sur une éventuelle évolution de la courbe entre 1994 et 2002. C'est ce que nous examinerons dans ce chapitre.

6.4.1 Rappel des principaux travaux d'aménagement en aval de BEAUCAIRE

Depuis le début du XIX siècle, le Rhône en aval de Beaucaire a subi plusieurs aménagements successifs. Après la crue exceptionnelle de 1840, plusieurs digues de protection contre les inondations ont été réalisées. Des digues basses, des épis et des casiers dits "Casiers Girardon" ont été aménagés par la suite pour fixer le lit mineur du fleuve afin d'améliorer les conditions de la navigation.

Les travaux réalisés par la CNR dans les années 1970 (voir annexe VIII) ont consisté à aménager un chenal navigable par draguage du lit mineur du Rhône et du Petit Rhône. Des dragages ont ainsi été réalisés entre le PK 268.6 et PK 280.8 du le Rhône et du PK 279.2 au PK 300 du petit Rhône.

Avec les matériaux issus des dragages la CNR a réalisé deux plateformes portuaires à Arles et à Beaucaire. Elle a procédé aussi à un déroctage du seuil de Terrin sur le Grand Rhône pour assurer un mouillage suffisant pour les fluviaux maritimes qui montent jusqu'à Arles; Ces travaux d'aménagement du Pallier d'Arles ont été achevés en 1973.

6.4.2 Evolution du lit du Rhône en aval de Beaucaire

Une étude de l'évolution des fonds du Rhône en aval de Beaucaire a été réalisée par comparaison de différentes campagnes de levés bathymétriques (voir Annexe VII). Depuis 1974, plusieurs campagnes de levés ont été réalisées dans le secteur par la CNR. Malheureusement, la majorité d'entre elles ne concerne que le lit mineur (débit < au module) et certaines restent localisées à un secteur précis.

Pour cette étude nous avons retenu 4 campagnes de levés réalisées à l'aide d'une vedette en 1974, 1988, 1994 et 1999 et deux campagnes réalisées à l'aide du bateau hydrographique FM (Frédéric Mistral) en 1998 et 2002. Les seules campagnes comprenant le lit mineur et les berges (levés terrestres de la partie proche du fleuve) sont celles réalisées en 1974 et 1999.

L'analyse de l'évolution des sections en travers entre 1974 et 1999 fait apparaître un bilan sédimentaire global déficitaire entre Beaucaire et Arles d'environ 400 000 m³. Un examen plus approfondi montre que le fond du Rhône a perdu environ 800 000 m³ de matériaux alors qu'en même temps les berges se sont engraisées d'environ 400 000 m³. Ce phénomène s'explique par la présence des épis et casiers Girardon qui ont conduit à une rétraction de la largeur et un approfondissement du chenal, ce qui était l'objectif de ces aménagements. Sur les 6 kilomètres en aval de Beaucaire ce déficit représente un enfoncement moyen des fonds d'environ 56 cm.

L'analyse des autres campagnes de levés qui ne concernent que le lit mineur (partie submergée) font apparaître une forte incision des fonds d'environ 987 000 m³ entre 1974 et 1988, une relative stabilité pour les périodes de 1988 à 1994 et de 1994 à 1999 et une incision supplémentaire de 380 000 m³ entre 1998 et 2002.

6.4.3 Influence du nouveau Pont de Beaucaire-Tarascon

Un nouveau pont routier reliant Beaucaire à Tarascon a été mis en service en 1999 juste au dessus de l'échelle limnimétrique de Beaucaire (PK 269.600). C'est un pont à hauban qui repose sur deux piles implantées dans le lit du Rhône.

L'étude hydraulique réalisée avant travaux a estimé l'impact des deux piles sur les niveaux à moins de 5 cm pour la crue centennale. Afin d'annuler cet impact, des travaux de dragages compensatoires ont été effectués entre 1997 et 1998 sur une longueur de 350 m à 50 m en aval du pont.

Le suivi de l'évolution du secteur dragué montre un enfoncement moyen de 30 cm supplémentaire entre 1998 et 2004.

6.4.4 Evolution de la section au droit de l'échelle limnimétriques

L'examen des caractéristiques géométriques de la section d'écoulement au droit de l'échelle limnimétrique de Beaucaire montre qu'elle est relativement stable et ne semblent pas être à l'origine d'une éventuelle évolution de la courbe de tarage. Cette section fait, en effet, partie des points durs de l'affleurement rocheux de Beaucaire-Tarascon.

6.4.5 Bilan des courbes de tarage (lois hauteur/débi)

L'analyse de l'évolution morphologique du lit du Rhône ne permet pas d'affirmer ou d'infirmer la tendance à l'exhaussement constatée entre les jaugeages de 1993-1994 et ceux de 2002-2003.

"Les ouvrages de protection, les casiers, perrés et épis induisent une rétraction de la largeur et un approfondissement du chenal actif. Le stockage sédimentaire se traduit par un exhaussement des marges fluviales et par leur extension latérale aux dépens du chenal. Il est issu du piégeage des dépôts de crue, qui n'atteignent plus le lit majeur naturel" ⁽²⁾.

Ces deux effets contradictoires ont tendance à se compenser hydrauliquement (le déficit en matériaux dans le lit mineur est deux fois supérieur aux dépôts sur les berges). L'absence de topographie des berges et du lit majeur entre 1994 et 2002, n'a pas permis de déterminer l'impact de ce phénomène à l'aide de modèles mathématiques. Rien ne permet actuellement de conclure à une éventuelle évolution définitive de la courbe de tarage de Beaucaire. Autrement dit, nous n'avons pas trouvé d'arguments convaincants qui permettent d'écarter les jaugeages réalisés lors des deux crues de 1993 et 1994 et de ne conserver que les derniers jaugeages pour l'établissement de la loi hauteur/débit de Beaucaire.

L'étude statistique menée par le CETIAT a mis en évidence que la loi d'ajustement la mieux adaptée et celle Manning-Strickler avec une distinction de deux domaines avant et après débordement aval autour de la cote 8.5 m NGF.

² "Du chenal à la cote : flux sédimentaires et gestion des digues dans le bas Rhône" M.Provansal et al; ZABR 10 juin 2005

Le CETIAT a montré aussi que l'utilisation de la courbe établie à partir de l'ensemble des jaugeages (Echantillon 1) conduit à une incertitude inférieure à 14% alors que la courbe éliminant les jaugeages de 1993 et 1994 (Echantillon 3) conduit à une incertitude comprise entre 10 et 12%.

L'écart entre ces deux courbes n'est pas assez important pour justifier le rejet des informations acquises lors des crues de 1993 et 1994. De plus, ces deux courbes se rapprochent l'une de l'autre dans la partie supérieure pour les très forts débits ($> 11000 \text{ m}^3/\text{s}$ - graphe ci-après).

L'établissement d'une courbe de tarage à Beaucaire par différentes approches est proposé par la CNR, le CETIAT et le CEMAGREF. Elles utilisent toutes les méthodes reconnues, statistiques ou hydrométriques se situant toutes dans un faisceau relativement étroit. Pour les niveaux observés en décembre 2003 à Beaucaire, l'écart ne dépasse pas $550 \text{ m}^3/\text{s}$.

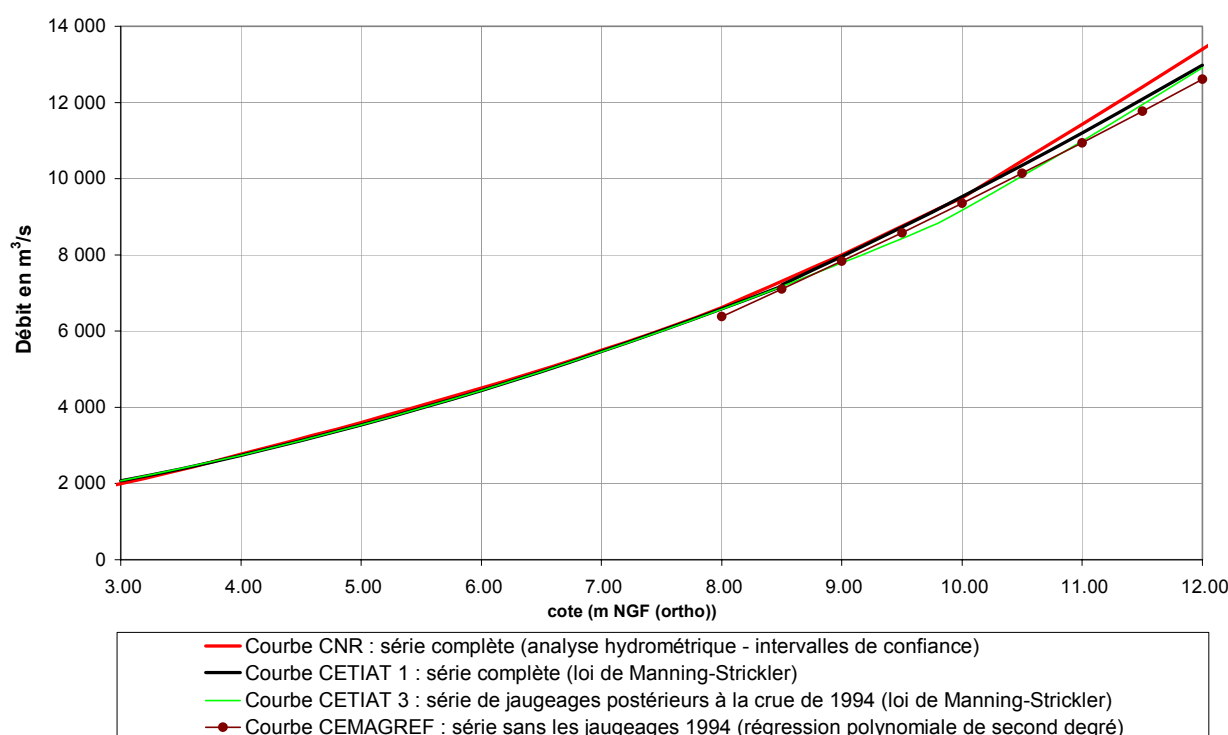


Figure 20 : Courbe de tarage à Beaucaire élaborée à partir de différentes approches

7 ANALYSE DES ENREGISTREMENT DE COTES DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003

7.1 LES NIVEAUX DU RHONE A BEAUCAIRE

L'échelle limnimétrique de Beaucaire est équipée de deux capteurs de niveaux avec deux sondes immergées différentes.

Le premier appartient au réseau de surveillance de la CNR. Il a été programmé pour réduire le filtrage des mesures et avoir une réactivité maximale. L'analyse du limnigramme (voir graphe ci-après) montre des fluctuations rapides qui illustrent sans doute un début d'envasement (tracé rose).

Le deuxième capteur est dédié à la conduite des ouvrages hydroélectriques de la CNR situés en amont. Il est fortement filtré ce qui explique l'absence de fluctuations.

La comparaison des enregistrements des deux capteurs, implantés dans la même section mais à des profondeurs différentes, montre que l'enregistrement associé au premier capteur, hors fluctuations erratiques est tout à fait correct. En outre les nombreuses lectures d'échelle réalisées pendant les opérations de jaugeages permettent d'affirmer que l'appareil était bien calé, et que ce dernier est représentatif du phénomène à moins de 10 centimètres près.

Le limnigramme de référence (courbe bleu sur le graphe ci-dessous) a ainsi été élaboré à partir de l'analyse des lectures d'échelles pendant la crue et des enregistrements des deux sondes nettoyés des mesures erratiques.

Le niveau d'eau maximal enregistré à la station de Beaucaire est de 11.30 m NGF.

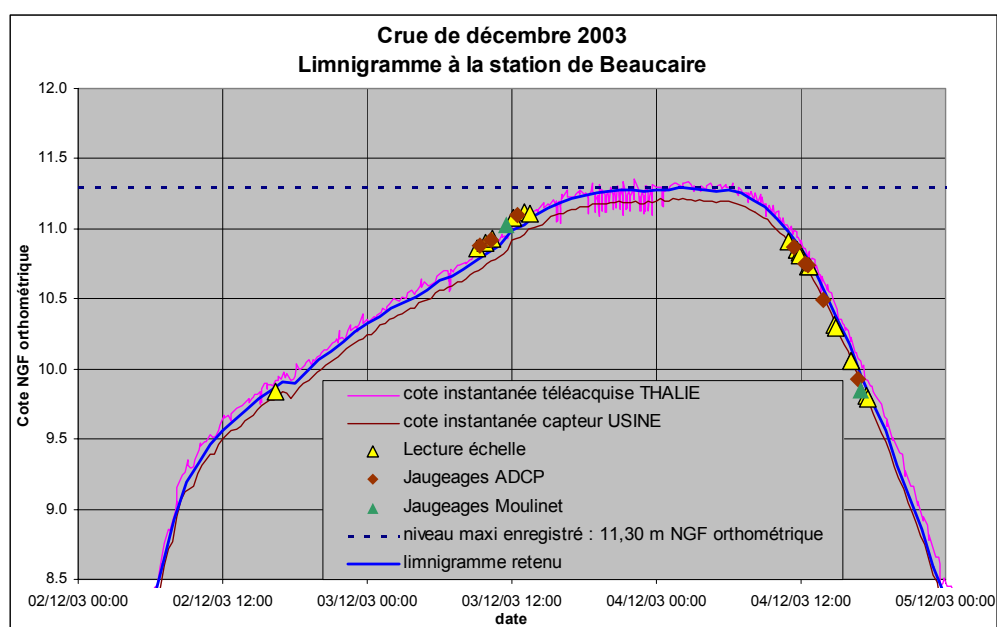


Figure 21 : Limnigramme de la crue de décembre 2003 à la station de Beaucaire

7.2 ANALYSE DE L'EVOLUTION DES LIMNIGRAMMES SUR LE DELTA

7.2.1 Rappel des ruptures de digues sur le Rhône en aval de Beaucaire

La description des ruptures de digues a fait l'objet d'un rapport du CETE-CEMAGREF en mai 2004. Les informations sur les ruptures de digues en aval de Beaucaire décrites ci-dessous sont extraites de ce rapport.

On dénombre quatre brèches, deux sur le petit Rhône en rive droite et deux sur le Rhône en rive gauche.

Les deux brèches du petit Rhône se sont produites dans la matinée du 3 décembre 2003 suite à la surverse par-dessus les digues. La première rupture de digue, d'une longueur de 120 m, s'est produite au lieu-dit Clairefarine sur la commune de Saint Gilles vers 8h00 du matin. La deuxième, d'une longueur de 230 m a été amorcée vers 10h00 au droit du Mas de la Petite Argence de la commune de Fourques en amont de l'autoroute A54. Celle-ci a "creusé dans la

plaine une fosse d'une profondeur de 10 m qui s'explique par la très faible cohésion du limon sableux constituant le sol support" (rapport Cete-Cemagref)

Les deux brèches de rive gauche sont situées à 2.5 et 3.5 km environ en aval de la station de Beaucaire. Il s'agit de la rupture des talus qui protègent contre les crues les passages routiers (trémies) sous la voie SNCF Tarascon Arles. Celle-ci est quasiment parallèle au Rhône à une distance de 1.5 km au maximum et joue le rôle de digue principale. Les talus de deux des quatre trémies ont cédé sous la pression des eaux le 3 décembre 2003 vers 21h00, quelques heures seulement avant le passage du maximum de la crue à Beaucaire.

7.2.2 Influence des ruptures de digues sur les niveaux du delta du Rhône

Entre le 1er et le 2 décembre 2003, le niveau du Rhône à Beaucaire a enregistré une montée très rapide d'environ 25 cm par heure. Après une deuxième phase de montée un peu moins rapide, les niveaux se sont stabilisés, pendant une douzaine d'heure avec une variation inférieure à 10 cm à partir du 3 décembre 16h.

Une analyse comparative des limnigrammes de

- l'aval barrage de Vallabrègues (PK262.80),
- la prise d'eau du canal BRL (CNABRL) (PK277.35) en amont de la défluence,
- Fourques (PK281.000) sur le petit Rhône,
- Saint Gilles (PK297.300) sur le petit Rhône,
- Arles (PK282.65) sur le grand Rhône,

Cette analyse met en évidence un phénomène hydraulique différent de la propagation attendue des maxima de hauteur d'eau accompagnant l'onde de crue.

En effet, le tracé des niveaux d'eau à la station située en aval du barrage de Vallabrègues ne présente pas de palier. Il n'y a donc vraisemblablement pas eu de palier de débit.

L'impact de la rupture de la digue de Clairefarine ne se fait sentir qu'à partir de 11h00 au droit de la station de Saint Gilles qui se trouve à une douzaine de kilomètres en amont. Au droit de cette station les niveaux se sont abaissés de 1.60 m en deux étapes, un premier abaissement de l'ordre de 0.8 m du au remous de la rupture de la digue aval et le deuxième du même ordre probablement du à la diminution des débits amont provoquée par le soutirage de la brèche amont de la Petite Argence (Fourques).

A la station de Fourques située 6 km en amont de la brèche de la Petite Argence et 28 km en amont de celle de Clairefarine, on constate que l'évolution des niveaux s'est aussi effectuée en deux étapes. Entre midi et 18h00 le niveau du petit Rhône a stoppé sa progression et est resté constant probablement sous l'influence du remous de la brèche de Clairefarine conjugué à la surverse et un début de rupture de la digue de la Petite Argence. Un abaissement brutal des niveaux d'environ 0.35 m a été constaté à partir de 18h00.

Sur les enregistrements des stations d'Arles et de BRL on constate une inflexion des niveaux peu de temps après le dernier abaissement à Fourques. **Les niveaux maxi ont été enregistrés à ces deux stations quasi-simultanément vers 19h00, en avance de 8 heures sur Beaucaire.**

Peu de temps après on constate une stabilisation des niveaux de Beaucaire avec une variation très lente jusqu'à l'atteinte du maximum vers 3h00 le 4 décembre 2003. Par contre, les niveaux enregistrés à la station aval barrage de Vallabrègues, situé en aval du Gard, ont continué de progresser avec le même gradient jusqu'à atteindre le maxi vers 01h00. Ce qui permet de

d'indiquer que la stabilisation des niveaux au droit de la station de Beaucaire est la conséquence du remous consécutif aux phénomènes hydrauliques concomitants aux ruptures des digues aval. En effet, la plaine de Boulbon-Vallabregues située en amont étant déjà saturée et les débits d'échange avec le Rhône quasi- nuls, ne permet pas d'expliquer l'écêtement de la crue entre l'aval barrage et la station de Beaucaire.

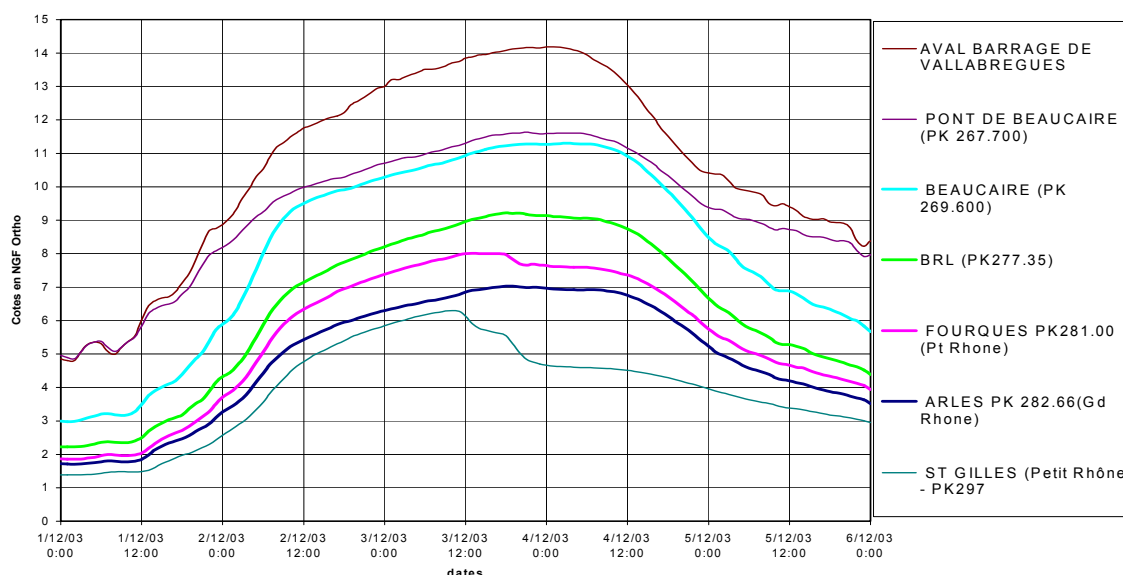


Figure 22 : Crue de décembre 2003 – évolution des niveaux du Rhône aval

7.3 ESTIMATION DE L'IMPACT DES RUPTURES DE DIGUES SUR LES NIVEAUX DU RHONE A BEUCAIRE

Afin de confirmer le comportement hydraulique en aval de Beaucaire et de quantifier l'impact des brèches sur les niveaux à Beaucaire, il a été demandé au bureau d'étude BCEOM de simuler la crue de 2003.

Le BCEOM a en effet construit le modèle mathématique du Delta du Rhône (en aval de Beaucaire) à l'occasion de l'étude globale pour une stratégie de réduction du risque inondation. C'est un modèle à casier qui permet de simuler les écoulements du Rhône de Beaucaire à la mer. Il a été étalonné à l'aide des fortes crues de 1993 et 1994.

Les simulations réalisées par le BCEOM, tenant compte des ruptures de digues, montrent que le modèle se comporte différemment dans les phases avant et après les ruptures de digues. Dans la première phase, les limnigrammes calculés sont pratiquement identiques à ceux enregistrés au droit des échelles limnimétriques. A partir de la rupture de la digue de Claire-Farine, on constate un décrochage entre les niveaux calculés et les niveaux observés principalement aux échelles de Fourques et Arles (voir figure ci-après).

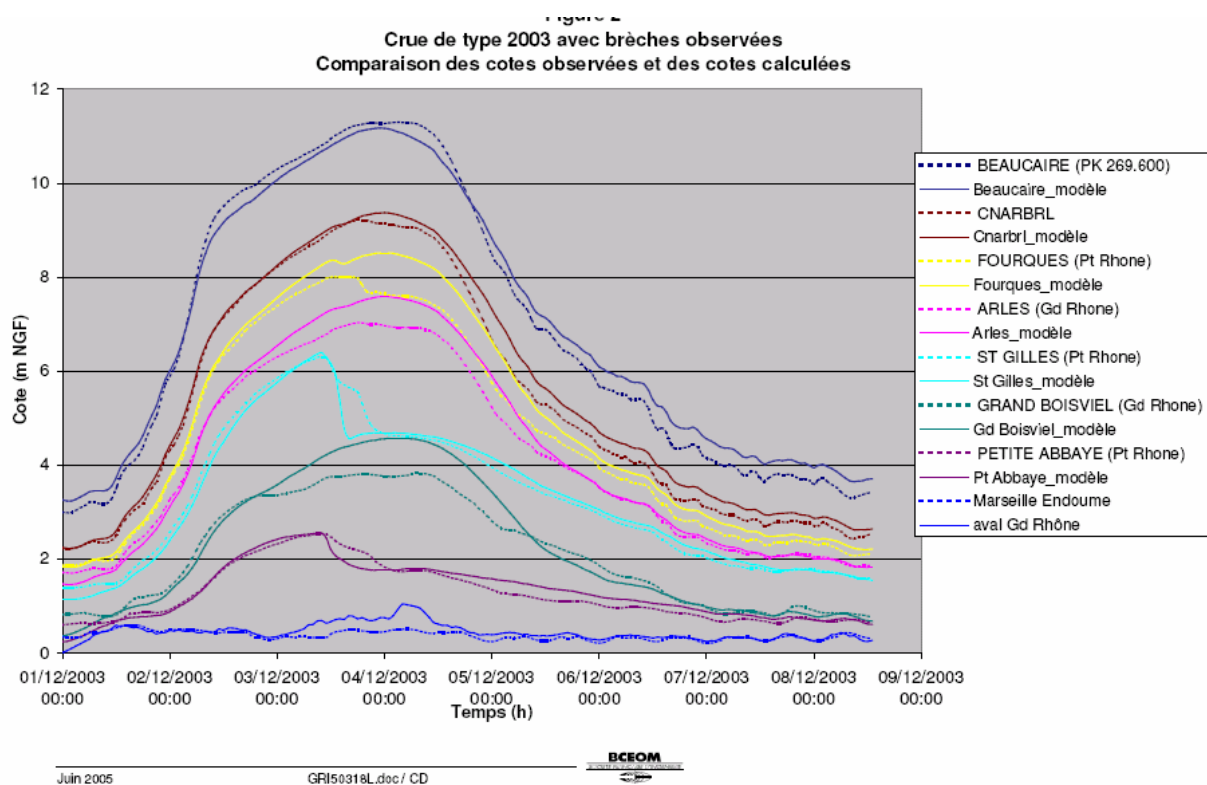


Figure 23 : Crue de décembre 2003 – comparaison des cotes observées et calculées par le modèle mathématique du BCEOM

Les différents essais de simulation (variation des paramètres de calcul, contrôle de la modélisation, modifications des caractéristiques des brèches...) n'ont pas permis de reproduire le comportement des limnigraphes situés en aval de la défluence, notamment ceux de Fourques et d'Arles.

Pour comprendre ce qui c'est passé, il convient d'observer les évolutions des vitesses à la station ultrasons que CNR possède à Fourques (voir figure 25 ci-après) :

La brèche de Fourques a provoqué une baisse de l'ordre de 0.7 m au limnigraphe de Fourques. Pendant cette période, on note que la vitesse a continué de croître, passant de 1.3 m/s à 2.2 m/s avant que la station ne tombe en panne le 3 décembre vers 23h.

Compte tenu de la section du lit, le débit correspondant à Fourques, avant l'arrêt de la station peut être évalué à 2 400 m³/s.

Or le débit dans le petit Rhône résultant du calage du modèle mathématique sur la base des crues antérieures, est de l'ordre de 1 500 m³/s. Ce serait donc un débit pratiquement double par rapport à la « normale » qui aurait transité par le petit Rhône en décembre 2003.

Un tel phénomène ne peut être provoqué que par une modification importante de la géométrie du lit. La présence des brèches dans le petit Rhône, et la nature très différente entre les sédiments du petit Rhône (limon - sable fin) et ceux du grand Rhône (graviers) suggère une évolution des fonds principalement dans le petit Rhône.

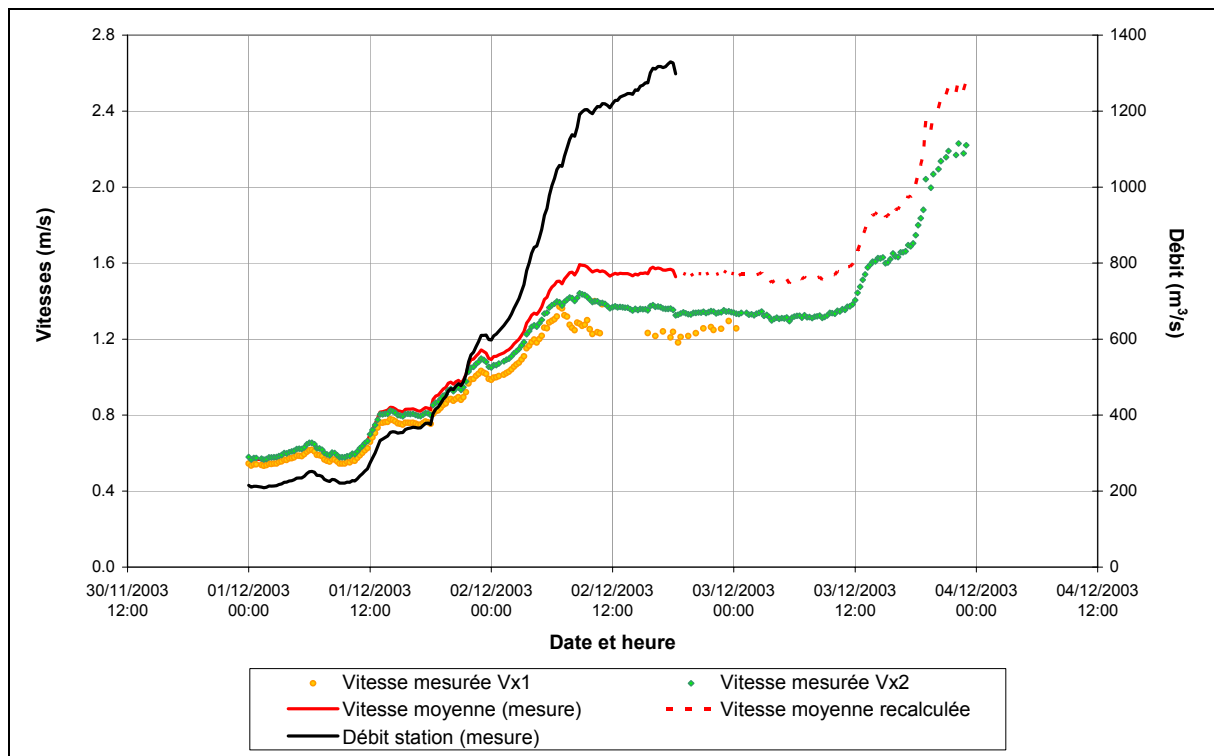


Figure 24 : Evolution du débit et des vitesses à la station ultrasons de Fourques pendant la crue de décembre 2003

Pour confirmer cette hypothèse nous avons sollicité l'avis de M. RAMETTE (expert dans le domaine fluviomorphologique). Sur la base des données que nous lui avons fournies, il indique :

« L'abaissement sensible des niveaux à l'aval des 2 brèches de St Gilles et de Fourques a induit bien évidemment une érosion régressive qui s'est propagée vers l'amont.

Au limni de Fourques l'augmentation sensible du débit, le 3 décembre à partir de 12h, depuis 1400 m³/s (valeur proche des 1 300 m³/s estimés en répartition « normale ») jusqu'à 2400 m³/s vers 23h (alors même que le niveau baissait), suggère que l'érosion régressive s'est propagée depuis la brèche de Fourques jusqu'à la défluence augmentant alors sensiblement la débitance du Petit Rhône.

De plus, ce phénomène a pu induire un blocage des apports solides du Grand Rhône, près de la défluence, accentuant alors la dérivation du débit vers le Petit Rhône. »

Une analyse plus complète de ce phénomène doit être entreprise. Vu les données nécessaires (bathymétrie), elle n'a pas pu être poursuivie dans des délais compatibles avec la remise du présent document.

Compte tenu de cette analyse, et afin de retrouver par modèles mathématiques les niveaux d'eau à Fourques et Arles, le BCEOM a eu recours à des artifices de calcul qui conduisent à modifier en crue la répartition des débits à l'aval de défluence. **Le modèle reproduit alors de manière satisfaisante les niveaux aux différents limnigraphes (voir figure ci-après).**

**Crue de type 2003 avec calage à Fourques et Arles
Comparaison des cotes observées et des cotes calculées**

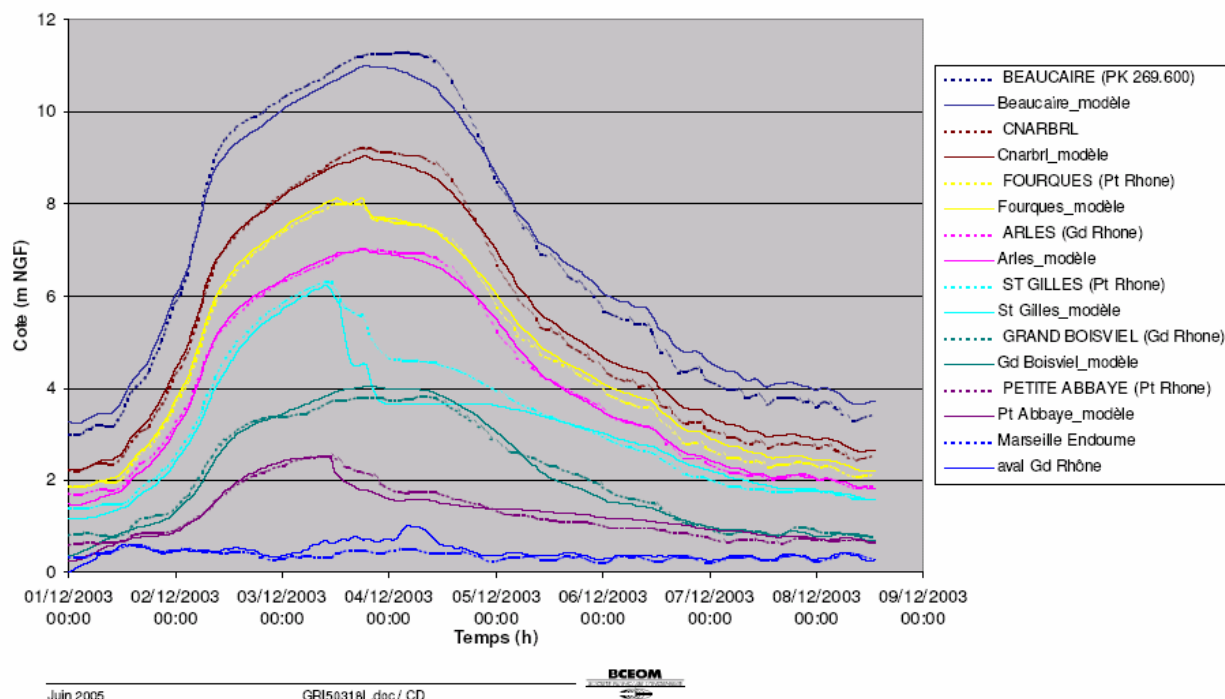


Figure 25 : *Crue de décembre 2003 – comparaison des cotes observées et calculées par le modèle mathématique du BCEOM après modification de la répartition des débits entre petit et grand Rhône.*

Ainsi, même si le mécanisme d'évolution des fonds en aval des stations de Fourques et Arles n'est pas encore connu correctement, le modèle mathématique permet de reproduire, par le biais d'un artifice de calcul, le comportement en amont des stations de Fourques et d'Arles pendant la crue de 2003.

Afin de déterminer l'impact des brèches sur les niveaux à Beaucaire, la situation sans brèche a été simulée. Pour ce dernier calcul, la répartition « normale » des débits à la déflue a été conservée. En effet, l'augmentation de la débitance du Petit Rhône n'avait pas été observée dans le passé, notamment pendant les crues de 1993 et 1994. C'est la conjonction d'un débit important dans le Rhône et de la rupture des brèches qui a provoqué ce phénomène. En l'absence de brèche, la déflue aurait conservée un fonctionnement normal.

La comparaison des résultats à Beaucaire des calculs avec brèches et sans brèches montre que l'impact des brèches au maximum de la crue a conduit à un abaissement du niveau de 30 cm pour la scénario reproduisant le mieux les observations de niveaux à Fourques, à Arles et à la prise d'eau du canal de BRL (configuration 3 – configuration1 du rapport BCEOM).

La propagation de l'onde de crue sur le delta a été accompagnée d'un phénomène hydraulique particulier. Les maxima des niveaux de crue à Fourques, à Arles et à la prise d'eau CNABRL ont précédé de 8 heures environ le maximum de la crue à Beaucaire. Les niveaux d'eau se sont affaîssés sur les trois premiers sites simultanément à l'apparition des brèches sur les digues du Petit Rhône. La reproduction sur le modèle numérique du BCEOM de ce phénomène ainsi que de la rupture des trémies sous la voie SNCF, montre son influence à Beaucaire où il a conduit à un abaissement de 30 cm.

8 CONCLUSION – DEBIT MAXIMUM DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003 A BEUCAIRE

Dans le cadre de son rôle de concessionnaire du Rhône, la CNR gère un important réseau de stations hydrométriques. En plus des mesures instantanées des niveaux, des jaugeages sont régulièrement réalisés pour établir et vérifier les courbes de tarage (lois hauteur/débit).

Au droit de la station hydrométrique de Beaucaire, 108 jaugeages ont été réalisés entre 1992 et 2003 dont une dizaine lors de la crue de décembre 2003. Cette série de jaugeage couvre une très large gamme de débits, des faibles débits à 11 051 m³/s.

A partir de ces données, des courbes de tarage (lois hauteur/débit) ont été établies par différentes approches par la CNR, le CETIAT et le CEMAGREF. Pour toutes ces courbes, les valeurs des forts débits se situent toutes dans un faisceau relativement étroit (voir figure ci-après).

Pour la crue de décembre 2003, la valeur de débit maximal de la crue ne peut être extrapolée directement à partir de ces courbes sans tenir compte de l'impact du remous du aux phénomènes hydrauliques concomitants aux ruptures des digues aval du Petit Rhône et des trémies SNCF. Cet impact a été calculé à partir des modèles mathématiques du BCEOM. Il est estimé à 30 cm d'abaissement du niveau de Beaucaire au maximum de la crue.

L'estimation du débit de pointe à Beaucaire est donc faite à partir de la courbe de tarage pour une cote corrigée de l'abaissement concomitant à la rupture des brèches de 11,60 m NGF (ortho).

Dans ces conditions, les différentes courbes de tarage proposées conduisent aux estimations suivantes du débit de pointe à Beaucaire :

Approches proposées (lois hauteur/débit)	Valeur du débit maximal de la crue de décembre 2003 à Beaucaire
CNR (série complète des jaugeages – approche hydrométrique)	12 600 m ³ /s
CETIAT 1 (série complète - loi de Manning-Stirckler)	12 250 m ³ /s
CETIAT 3 (série ne conservant que les jaugeages postérieurs à la crue de janvier 1994 - loi Manning-Strickler)	12 150 m ³ /s
CEMAGREF (série sans les jaugeages de 1994 - loi polynomiale)	11 900 m ³ /s

Ces valeurs déterminées à partir d'approches différentes sont tout à fait cohérentes avec les résultats de la propagation par modélisation mathématique de la crue de Viviers à Beaucaire. Deux scénarios de propagation de la crue ont été envisagés. Un premier scénario minimaliste où seuls les hydrogrammes des principaux affluents jaugés ont été injectés dans le modèle et un deuxième scénarios qui tient compte en plus des apports des bassins intermédiaires qui ont été injectés dans le modèle sous forme d'hydrogrammes de ruissellements.

Le résultat de la propagation de la crue dans le cas de ces deux scénarios conclut à un débit maximum à Beaucaire compris en 12 000 et 12 750 m³/s

Les différentes approches hydrométriques, statistiques et hydrauliques convergent vers une valeur de débit maximal de la crue de décembre 2003 à Beaucaire compris dans une fourchette de 11 900 à 12 600 m³/s

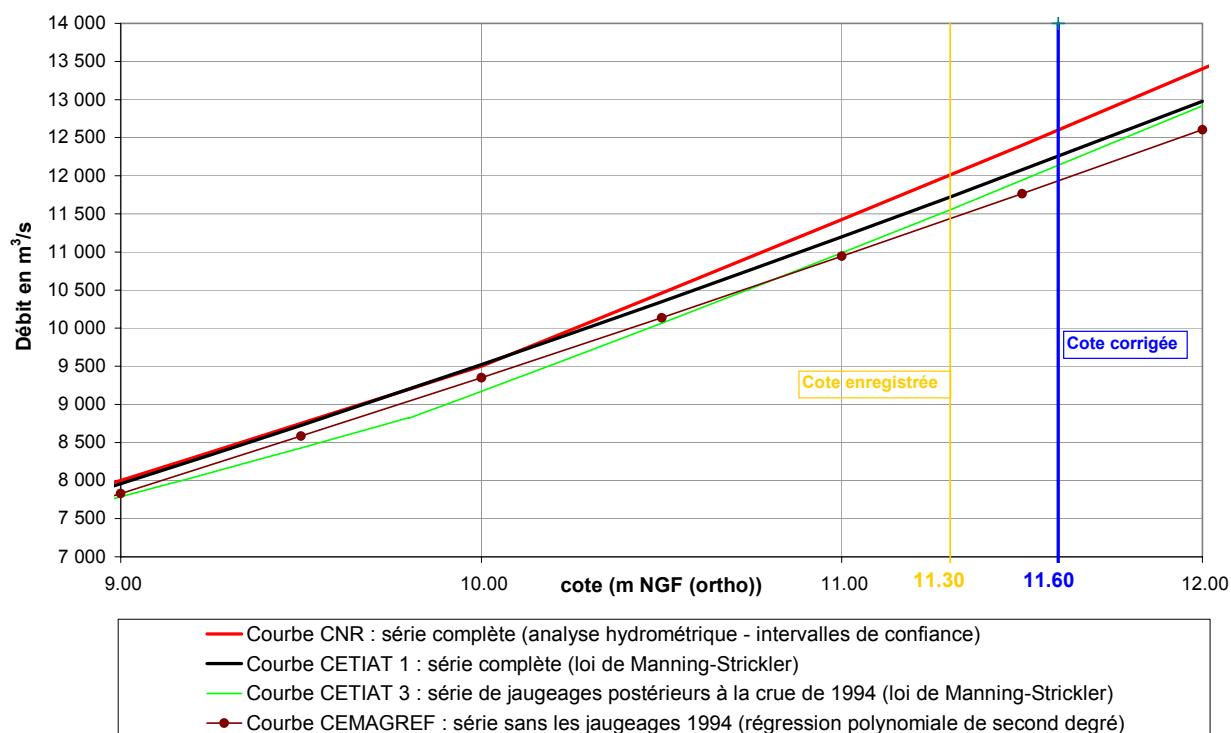


Figure 26 : Courbe de tarage élaborée à Beaucaire à partir de différentes approches – Zoom sur les forts débits