



PRÉFECTURE DE LA RÉGION PROVENCE - ALPES - CÔTE D'AZUR

## Conférence de consensus sur le débit du Rhône à Beaucaire

# APPEL A CONTRIBUTION

Direction Régionale de l'Environnement  
Provence Alpes Côte d'Azur

**Jacques de Saint-Seine**

Aix-en-Provence le 17 juin 2005



Direction régionale de l'environnement – PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR  
Allée Louis Philibert– Le Tholonet – BP 120 – 13603 Aix en Provence Cedex 1  
tél : +33 04 42 66 66 00 – [www.paca.ecologie.gouv.fr](http://www.paca.ecologie.gouv.fr)

## SOMMAIRE

RESUME

LE CONTEXTE METEOROLOGIQUE

LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE DU RHONE ET SES AFFLUENTS

LA COURBE DE TARAGE DE LA STATION DE TARASCON – LES JAUGEAGES EFFECTUES AU COURS DE LA CRUE

L'ANALYSE HYDRAULIQUE DES ECOULEMENTS A L'AVAL DE BEUCAIRE - UNE ESTIMATION DU DEBIT DE POINTE DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003

## Resumé

Après avoir rappelé brièvement le contexte météorologique, le phénomène hydraulique issu de cet épisode pluvieux est abordé sous trois angles par des analyses successives sur :

- la propagation de l'onde de crue du Rhône qui se nourrit des apports des affluents principaux entre Viviers et Beaucaire et dont le mécanisme est sensiblement perturbée entre Beaucaire et Arles par l'apparition de brèches,
- les jaugeages qui ont été réalisés à Beaucaire au cours de la crue et les conséquences sur la courbe de tarage et l'hydrogrammes résultant
- les conditions d'écoulements dans la traversée d'Arles, analyse qui permet en définitive de donner une estimation du débit de pointe de cette crue à Beaucaire.

Dans la genèse de cette crue, les affluents aval ont tous eu un rôle important. Ceux du « Nord » - Ardèche, Céze, Ouvèze, Aygues et Lez – ont tous été en crue en même temps et ont remplis les zones d'expansion des crues. De ce fait, lorsque la crue amont du Rhône est arrivée peu de temps après, l'effet d'écrêtement de ces zones d'expansion a été considérablement réduit. Les deux affluents du « Sud » - Durance et Gardon – qui n'ont pas eu de crue importante - ont cependant directement participé à la pointe de la crue du Rhône du fait de leur concomitance presque parfaite avec la crue du Rhône. La reconstitution de l'hydrogramme à Beaucaire à l'aide des hydrogrammes propagés et des apports des affluents permet d'avancer le fait que cette crue a pu atteindre les 12 000 m<sup>3</sup>/s mais qu'un débit de 11 000 m<sup>3</sup>/s semble faible au regard des volumes observés.

Cette dernière analyse est corroborée par une analyse succincte des jaugeages effectués et des hydrogrammes évalués à l'aide de différentes courbes de tarage.

Enfin l'analyse des écoulements au droit d'Arles, dans un secteur peu perturbé par les conditions d'écoulement dans les différentes brèches, a permis d'estimer le débit de pointe de cette crue en se basant sur les résultats de la modélisation réalisée par le BCEOM dans le cadre de l'Etude Globale Rhône et de l'étude du Plan Rhône et sur les repères de crue observés. Une estimation comprise entre 11 500 et 11 700 m<sup>3</sup>/s est proposée pour le débit de pointe à Beaucaire avec un débit de pointe en Arles estimé à environ 9260 m<sup>3</sup>/s et un débit de pointe dans le Petit Rhône de l'ordre de 1650 m<sup>3</sup>/s.

## CRUE DU RHONE DE DECEMBRE 2003

### ELEMENTS DE COMPREHENSION HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE DE L'EVENTEMENT

#### SUR LE TIERS AVAL DU RHONE ENTRE VIVIERS ET LA MER

## I - LE CONTEXTE METEOROLOGIQUE

Une antériorité pluviométrique importante :

- plus de 1000 mm de pluie observée entre le 1/09 et le 30/11 sur les Cévennes
- le rapport à la normal des pluies cumulées sur cette période est de 1,25 sur le BV du Rhône et 1,75 sur les postes des Cévennes

Une étendue géographique importante :

- 25 000 km<sup>2</sup> ont reçu entre le 30/11 et le 3/12 plus de 150 mm de pluie
- 60 000 km<sup>2</sup> plus de 100 mm
- concentration sur : l'Ardèche avec 400 mm, le Gard avec 300 mm, le Vaucluse avec 200 mm.
- Un noyau pluvieux important centré sur les Cévennes en fin d'épisode le 3/12

Un fort vent entre les 3 et 4/12 a contrarié les déversements du Rhône à la mer.

## II - LE COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE DU RHONE ET SES AFFLUENTS

### II – 1 Le déroulement de la crue

#### Entre Viviers et Tarascon

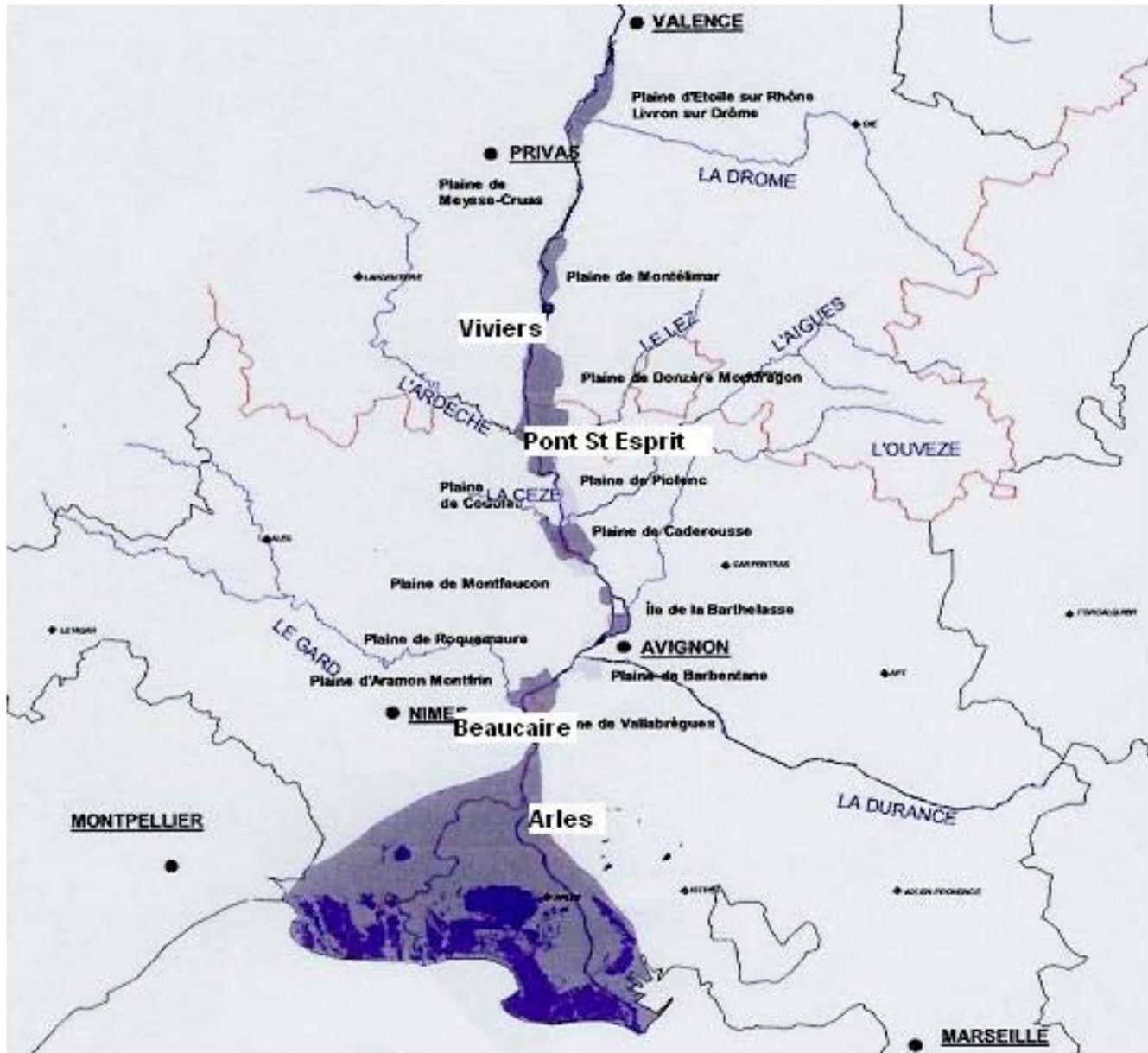
De façon à apprécier le comportement hydraulique du Rhône entre Viviers et Tarascon, les temps de propagation de l'algorithme de prévision du Service d'Annonce des Crues du Vaucluse ont été utilisés.

**A Viviers :** BV de 70 900 km<sup>2</sup> - forte crue du Rhône :

- o  $Q_{max} = 8180 \text{ m}^3/\text{s}$  le 3/12 à 2h / la crue centennale est estimée à  $8120 \text{ m}^3/\text{s}$
- o Le débit reste 8h au dessus de  $8000 \text{ m}^3/\text{s}$  entre le 2/12 : 22h et le 3/12 : 6h
- o le volume total :  $1946 \text{ Mm}^3$  / volume d'une crue centennale :  $7750 \text{ Mm}^3$  (étude EGR)

**De Viviers à Pont Saint Esprit :**

- o le temps de propagation varie entre 2h et 8h lorsque le débit croit,
- o le débit propagé est celui observé à Viviers moins le débit qui passe dans le canal usinier :  $1900 \text{ m}^3/\text{s}$  si le débit à Viviers est inférieur à  $7500 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$  dans les autres cas.
- o les débits prévus à partir de Viviers intègrent les apports de l'Ardèche



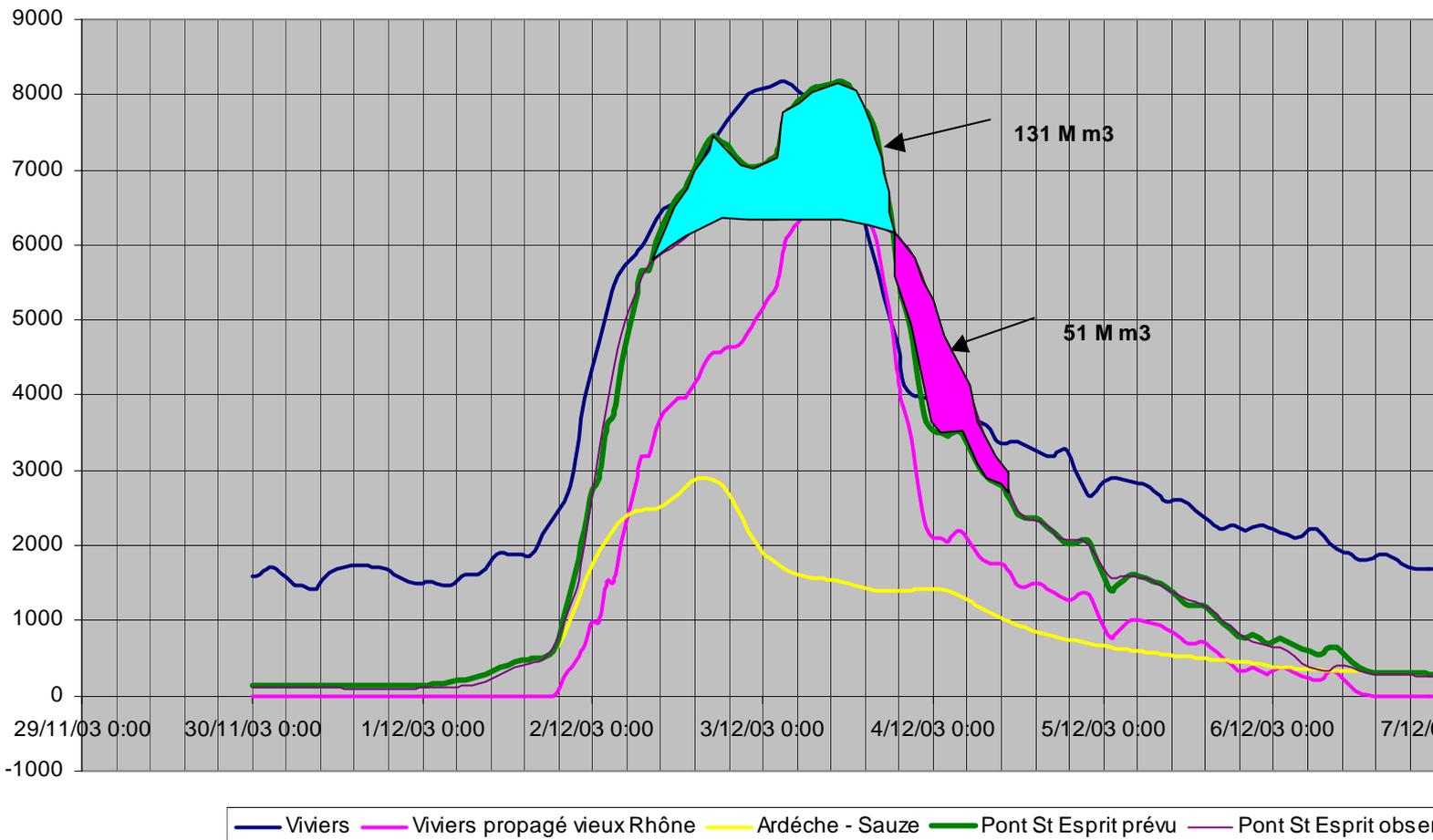
## Les apports de l'Ardèche

- le débit maxi est observé le 2/12 à 14 h à Sauze :  $2895 \text{ m}^3/\text{s}$
- le débit est supérieur à  $2700 \text{ m}^3/\text{s}$  de 10h à 17 h le 2/12
- le volume écoulé total entre le 1/12 et le 6/12 est de  $549 \text{ M m}^3$  et le volume ruisselé est de  $435 \text{ M m}^3$  ce qui représente 195 mm d'eau efficace sur les 400 mm de pluie tombée.
- La pointe de la crue de l'Ardèche passe bien avant celle de la crue du Rhône (21h avant). Le débit du Rhône est alors de  $4080 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cependant la crue de l'Ardèche épaissie de façon importante la crue du Rhône en apportant le quart du volume observé à Viviers et crée une première pointe qui culminerait à  $7500 \text{ m}^3/\text{s}$  le 2/12 à 17h si on ne tenait pas compte des dversements dans la plaine de Lapalud.
- L'Ardèche participe ensuite à la pointe de la crue du Rhône à hauteur de  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$  sans la retarder ni même l'avancer.

## A Pont Saint Esprit

- Les débits observés culminent pendant 15h à 6380 m<sup>3</sup>/s entre 19h le 2/12 et 10h le 3/12.
- les débits prévus à partir de Viviers coïncident avec les débits observés à Pont Saint Esprit jusqu'au débit de 5800 m<sup>3</sup>/s. Au-delà de ce débit, il y a un décrochage entre l'hydrogramme prévu qui culmine à 8170 m<sup>3</sup>/s le 3/12 à 12h et l'hydrogramme observé qui culmine 6380 m<sup>3</sup>/s. Ce décrochage est dû aux déversements du Rhône dans la plaine de Lapalud. L'étude EGR avance le débit de 4800 m<sup>3</sup>/s comme débit de début de débordement dans la plaine.
- Le volume écrêté – différence entre l'hydrogramme prévu et l'hydrogramme observé – est de 131 M m<sup>3</sup> au maximum de la crue, 51 M m<sup>3</sup> étant rendu à la décrue. Reste donc un volume de 80 M m<sup>3</sup> qui a du transité et être partiellement stocké dans la plaine avant d'être ressuyé.
- L'étude EGR avance une capacité d'écrêtement de 116 M m<sup>3</sup> pour une crue forte et de 170 M m<sup>3</sup> pour une crue très forte. Elle mentionne la possibilité d'écrêtement en débit de pointe qui est de l'ordre de 200 m<sup>3</sup>/s pour les crues moyennes à fortes, cet écrêtement pouvant atteindre 1000 m<sup>3</sup>/s pour les crues très fortes.
- La station de Pont St Esprit étant située au droit de la zone d'expansion des crues, elle n'est pas représentative du fonctionnement réel de la plaine. Il faudrait une station d'observation située à l'aval de la restitution, au droit de St Etienne des Sorts pour se rendre compte du véritable impact de cette plaine sur la propagation des crues du Rhône.
- On peut cependant observer une certaine cohérence dans ces données. A noter l'effet écrêteur de crue de la plaine de Lapalud qui réduit considérablement le débit de pointe dans le vieux Rhône de Pont Saint Esprit à la confluence de la restitution à hauteur de 1790 m<sup>3</sup>/s sans compter le débit de 1500 m<sup>3</sup>/s qui passe par le canal.

## La crue du Rhône de décembre 2003 Viviers - Pont St Esprit



### En Avignon

#### - Les affluents

- Le Lez – BV de 455 km<sup>2</sup>.** Pas de données disponibles. L'hydrogramme de la crue est issue de l'hydrogramme de l'Aygues avec un rapport de surface.
  - Débit maxi observé : 255 m<sup>3</sup>/s le 2/12 à 18h.
  - Il participe à hauteur de 120 m<sup>3</sup>/s à la pointe de la crue du Rhône lorsqu'elle passe le 3/12 vers 14h.
  - Le volume total est de 34 M m<sup>3</sup> et le volume ruisselé de 27 M m<sup>3</sup> ce qui représente 60 mm d'eau efficace sur les 200 mm de pluie tombée.
- La Cèze – BV de 1309 km<sup>2</sup>.**
  - Débit maxi de 720 m<sup>3</sup>/s le 2/12 à 20h – entre 16h et 23h le débit a toujours été supérieur à 690 m<sup>3</sup>/s.
  - Il participe encore à hauteur de 500 m<sup>3</sup>/s à la pointe de la crue du Rhône lorsqu'elle passe le 3/12 vers 14h.

- Le volume total écoulé : 169 M m<sup>3</sup> pour un volume ruisselé de 122 M m<sup>3</sup> ce qui représente une lame d'eau efficace de 93 mm sur les 400 mm tombés sur les Cévennes.
- **L'Aygues – BV de 1055 km<sup>2</sup>**
  - Débit maxi de 500 m<sup>3</sup>/s le 2/12 à 19h – entre 17h et 23h le débit a toujours été supérieur à 480 m<sup>3</sup>/s
  - Il participe à hauteur de 200 m<sup>3</sup>/s à la pointe de la crue du Rhône lorsqu'elle passe le 3/12 vers 14h.
  - Le volume total écoulé : 67 M m<sup>3</sup> pour un volume ruisselé de 54 M m<sup>3</sup> correspondant à une pluie efficace de 51 mm.
- **L'Ouvèze – BV de 1916 km<sup>2</sup>**
  - Débit maxi de 577 m<sup>3</sup>/s le 2/12 à 21h – entre 18h et 2h le 3/12, le débit a toujours été supérieur à 540 m<sup>3</sup>/s.
  - Il participe à hauteur de 480 m<sup>3</sup>/s à la pointe de la crue du Rhône lorsqu'elle passe le 3/12 vers 14h.
  - Le volume total écoulé : 146 M m<sup>3</sup> pour un volume ruisselé de 97 M m<sup>3</sup> correspondant à une pluie efficace de 51 mm.

L'ensemble de ces affluents, Ardèche compris, sont donc pratiquement tous en crue au même moment. Le maximum de leur débit arrive au Rhône entre 16h et 23h le 2/12. Ils consolident la pointe créée par la crue de l'Ardèche dans l'hydrogramme de la crue du Rhône.

Sans rentrer dans la vérification des courbes de tarage de ces différentes stations, les crues observées sur ces bassins sont relativement modestes et on peut espérer que les erreurs de débit dus à une extrapolation des courbes de tarage restent modestes.

On peut alors constater que ces apports, arrivant sur une crue du Rhône qui est loin d'être à son maximum – le Rhône roule environ 5000 m<sup>3</sup>/s – créent une pointe de crue du Rhône très importante puisqu'elle culmine à plus de 11 000 m<sup>3</sup>/s à Avignon. La concomitance de ces modestes crues peut donc créer une crue majeure du Rhône.

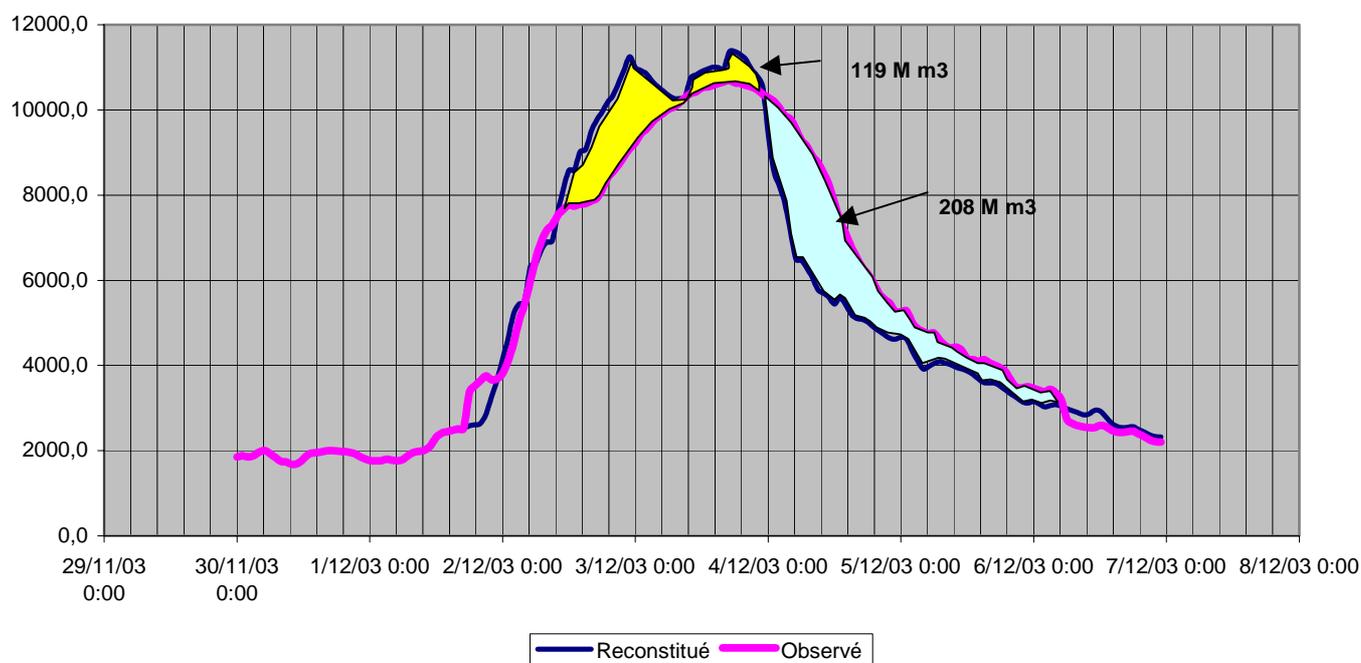
Enfin, les réponses des bassins rive gauche sont assez similaires avec une efficacité de l'ordre de 25% tout comme celle de La Cèze qui est aussi du même ordre de grandeur.

#### - **Observations à la station du pont Daladier**

- A cette station il n'y a pas, à proprement parler, une courbe de tarage. C'est plutôt une loi hauteur-débit qui intègre les débits des deux bras du Rhône existant dans ce secteur et qui prend en compte l'influence de la Durance. Cette loi, qui date de 1978, est toujours d'actualité. En exploitant les résultats des modélisations de l'étude EGR, il s'avère qu'elle est toujours valable.
- L'hydrogramme observé culmine à 10 695 m<sup>3</sup>/s le 3/12 à 17h. Le débit y est supérieur à 10 000 m<sup>3</sup>/s pendant 20h entre 6h le 3/12 et 2h le 4/12.
- Le volume total de cette crue à Avignon est de 2 955 M m<sup>3</sup>.

- Les débits prévus à partir de l'hydrogramme de Viviers en intégrant les différents apports des affluents, coïncident avec les observations faites au droit de la station jusqu'au débit de  $7\,700\text{ m}^3/\text{s}$  à partir duquel il y a un décrochement. Ce décrochement correspond à l'inondation de la plaine de Caderousse où les déversements se produisent à partir de  $7\,300\text{ m}^3/\text{s}$ . Ils ont été observés sur le terrain à partir de 21h30 le 2/12.
- Sans cet écrêtement, la première pointe de la crue issue du débit maximum des crues des affluents aurait pu culminer à  $11\,250\text{ m}^3/\text{s}$  le 2/12 à 23h, la seconde pointe issue de la crue du Rhône amont culminant à  $11\,360\text{ m}^3/\text{s}$  le 3/12 à 18h.
- Le volume écrêté est de  $119\text{ Mm}^3$  et le volume ressuyé est de  $208\text{ Mm}^3$
- D'après l'étude EGR, les capacités d'écrêtement en volume des plaines de Caderousse et Codolet sont de  $17\text{ M m}^3$  en crue forte et de  $40\text{ M m}^3$  en crue très forte. Plus en aval, la plaine de Roquemaure et l'île de la Barthelasse permettent un écrêtement de  $24\text{ Mm}^3$  pour une crue forte et de  $43\text{ Mm}^3$  pour une crue très forte.
- L'écrêtement constaté est lié aux capacités des plaines de Caderousse, de Codolet, de Roquemaure et de la Barthelasse mais aussi à celles de la plaine de Lapalud.

Crue de décembre 2003- Avignon



- Pour le ressuyage, l'hydrogramme reconstitué manque de volume par rapport à celui observé – environ 90 Mm<sup>3</sup>. Ce volume devrait correspondre aux apports diffus du bassin versant intermédiaire.

## A Tarascon - Beaucaire

### La Durance – BV 14 400 km<sup>2</sup>

- Débit maxi de 1410 m<sup>3</sup>/s le 3/12 à 13h
- La crue de la Durance participe encore à hauteur de 1374 m<sup>3</sup>/s à la pointe de la crue du Rhône lorsqu'elle passe le 3/12 vers 17h.
- Le volume total écoulé : 189 M m<sup>3</sup> pour un volume ruisselé de 138 M m<sup>3</sup> ce qui représente une lame d'eau efficace de 10 mm – le BV de la Durance n'a pas été touché dans son ensemble.

### Le Gard – BV 1840 km<sup>2</sup>

- Débit maxi de 1165 m<sup>3</sup>/s le 3/12 à 22 h – le débit reste au dessus de 1000 m<sup>3</sup>/s entre le 3/12 19h et le 4/12 1h
- Il participe encore à hauteur de 1080 m<sup>3</sup>/s à la pointe de la crue du Rhône lorsqu'elle passe le 3/12 vers 20 h à la confluence.
- Le volume total écoulé : 173 M m<sup>3</sup> pour un volume ruisselé de 89 M m<sup>3</sup> ce qui représente une lame d'eau efficace de 49 mm seulement au regard des 300 mm tombés sur le bassin du Gard.

### A la station de Tarascon – BV 96 500 km<sup>2</sup>

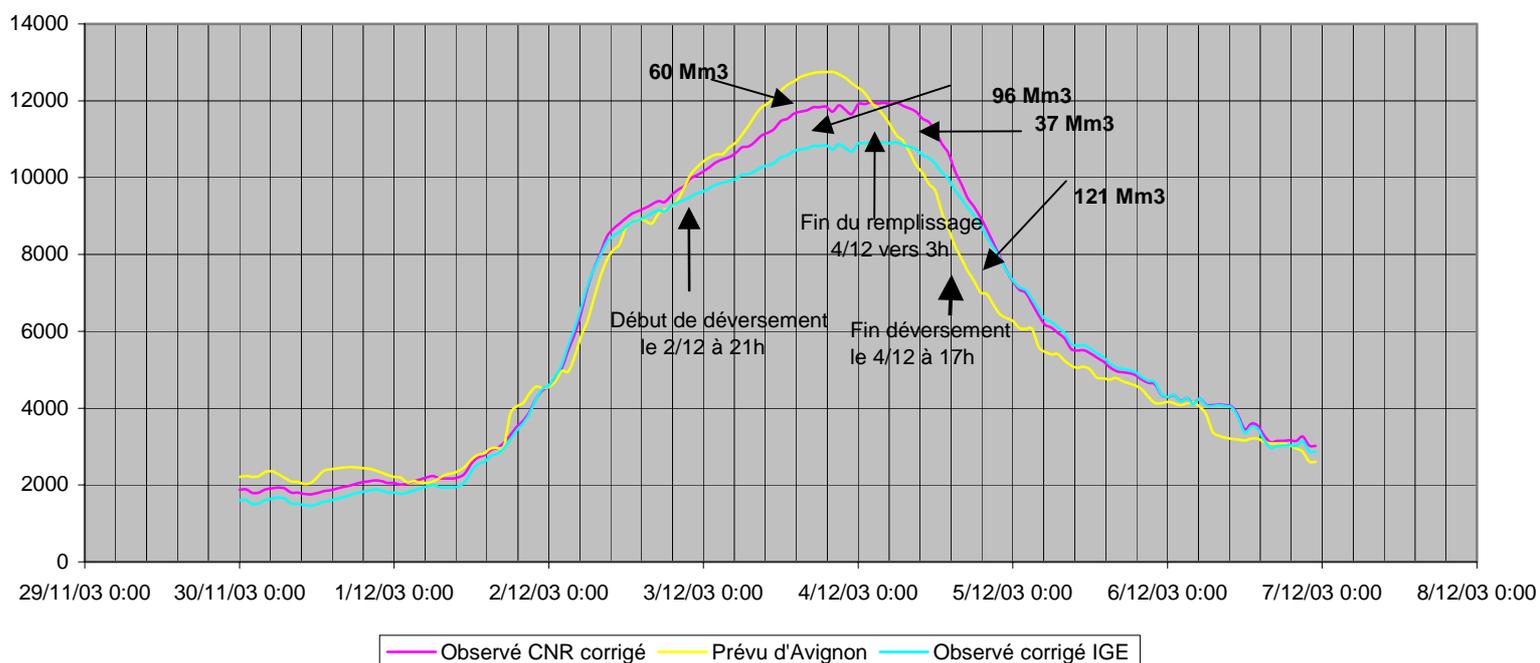
- Le débit maxi est observé à 2h le 4/12 : 11 961 m<sup>3</sup>/s avec la nouvelle courbe de tarage de la CNR – la crue centennale est de 11 300 m<sup>3</sup>/s et la crue millénale de 14 100 m<sup>3</sup>/s (étude EGR).
- Le volume total de la crue est de 3 578 Mm<sup>3</sup>, le volume de la crue centennale étant de 9 670 Mm<sup>3</sup> (étude EGR).
- Les débits prévus à partir de l'hydrogramme observé d'Avignon culminent à 12 750 m<sup>3</sup>/s le 3/12 à 21h.
- Ces débits suivent relativement bien la courbe observée à Tarascon jusqu'au débit de 9 700 m<sup>3</sup>/s à 21h le 2/12. Ensuite ils décrochent du fait du remplissage de la zone d'expansion de Boulbon qui se fait effectivement à partir d'un débit de 9700 m<sup>3</sup>/s
- Les déversements dans cette plaine ont débutés vers 21h le 2 décembre. La cote de déversement atteint son maximum (11,92 NGF orthométrique) au dessus du seuil le 4 décembre à 0h. Cette cote de déversement va perdurer jusqu'à 6h le 4 décembre. Au cours de ce laps de temps, la cote du plan d'eau de la plaine de Boulbon va atteindre son niveau maximum de 12 mNGF.
- Le volume d'écrêtement de cette plaine est de 35 Mm<sup>3</sup> pour une crue forte et de 77 Mm<sup>3</sup> pour une crue très forte.
- Le volume écrêté au cours de la crue est de 60 Mm<sup>3</sup> si l'on se réfère au graphe. Le volume ressuyé est de 158 (37 + 121) Mm<sup>3</sup>. Il manque donc dans

l'hydrogramme prévu un volume de 98 Mm<sup>3</sup> qui devrait provenir du bassin intermédiaire..

En définitive, la pointe de la crue à Tarascon est certes due à la crue du Rhône amont mais qui a été augmentée des apports maximaux de la Durance et du Gardon (concomitance presque parfaite de ces deux affluents).

La réponse efficace du Gardon est faible – 16% - si on la compare à celle de La Cèze et des autres affluents du Rhône. L'hydrogramme de la crue du Gardon semble donc manquer de volume.

Crue de décembre 2003 - Tarascon



Lorsque l'on prend en compte la courbe de tarage préconisée par le GAES, l'hydrogramme observé culmine à 10930 m<sup>3</sup>/s le 4/12 à 2h.

Si l'on se réfère au graphe ci après, en propageant l'hydrogramme observé en Avignon ainsi que ceux observés de la Durance et du Gardon, le volume écrêté serait de l'ordre de : 96 + 60 =156 Mm<sup>3</sup>. Or nous n'avons qu'un volume maximum potentiel d'écroulement dans les plaines de Boulbon-Vallabrègues et d' Aramon,-Montfrin de 77 Mm<sup>3</sup> pour une crue très forte.

En conclusion sur ce chapitre, l'hydrogramme observé et re-évalué par la CNR à Tarascon permet d'assurer une certaine cohérence dans le comportement hydrologique et hydraulique du Rhône et de ses affluents sur la base des hydrogrammes fournis et gérés par le S.A.C. 84.

Dans la mesure où l'hydrogramme observé à Tarascon est celui issu de l'analyse du GAES, la recherche d'une cohérence hydrologique et hydraulique conduit à minimiser l'hydrogramme observé

en Avignon et à revoir aussi à la baisse les hydrogrammes des affluents du Rhône en amont d'Avignon car les zones d'expansion ne suffisent plus pour stoker les volumes en jeu.

## Entre Tarascon et la mer

Entre Tarascon et Arles le temps de propagation est de l'ordre de 3h à 4h pour une crue d'environ 9 000 m<sup>3</sup>/s déjà largement débordante dans les ségonaux.

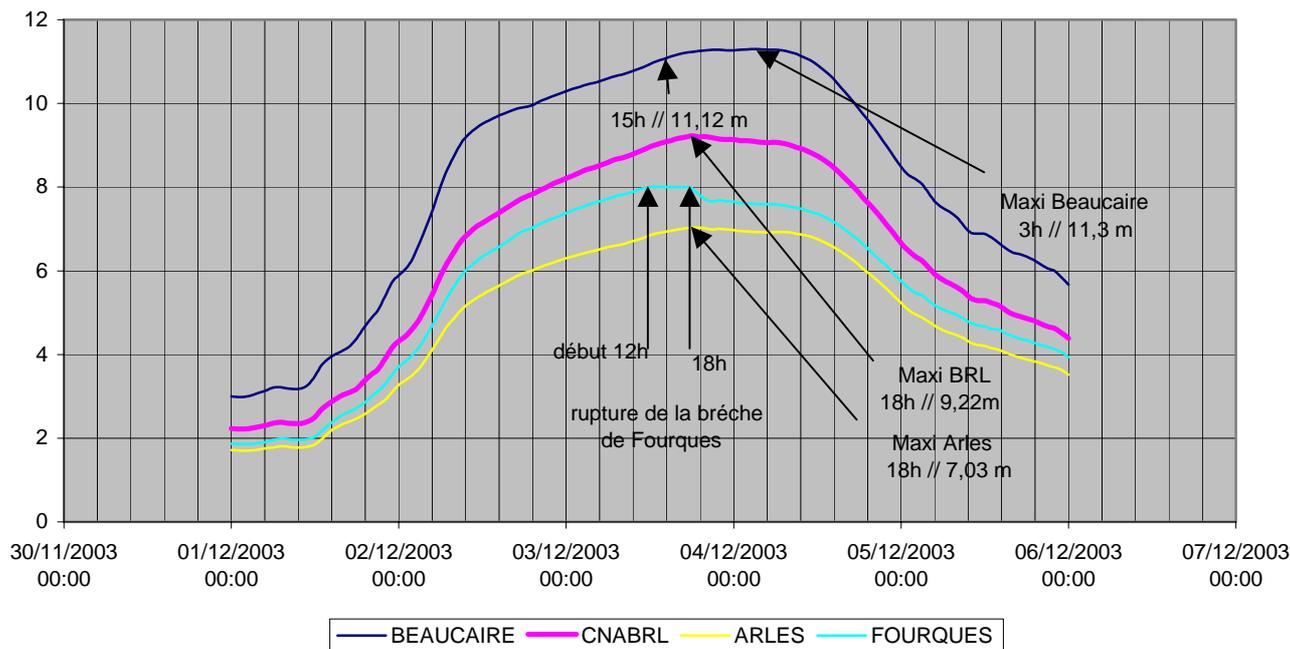
A partir de 10h le 3/12, le Rhône débite environ 11 000 m<sup>3</sup>/s à Beaucaire si l'on se réfère aux jaugeages effectués au cours de la crue par la CNR. Il débitait déjà près de 10 000 m<sup>3</sup>/s 6h auparavant c'est à dire vers 4h le 3 décembre.

Le Rhône, à l'aval de Beaucaire, est totalement endigué et ce réseau hydraulique est alors à sa limite de capacité en plusieurs endroits :

- le remblai de la voie SNCF dans sa partie amont entre les PK 270 et 276.
- la digue rive droite du Grand Rhône entre Beaucaire et Arles plutôt dans sa partie aval – en aval du PK 274
- la digue de protection du quartier de Barriol
- les digues du Petit Rhône contient tout juste les débits dans le secteur situé en amont de Saint Gilles, des débordements importants étant déjà en cours en rive droite en aval du Sylvéreal.

Ce réseau n'a plus, à partir de cette instant, la capacité d'encaisser un apport supplémentaire de débit, l'endiguement du Petit Rhône étant le plus vulnérable. Or la crue continue toujours à s'amplifier à Beaucaire.

Crue de décembre 2003 - limnigrammes

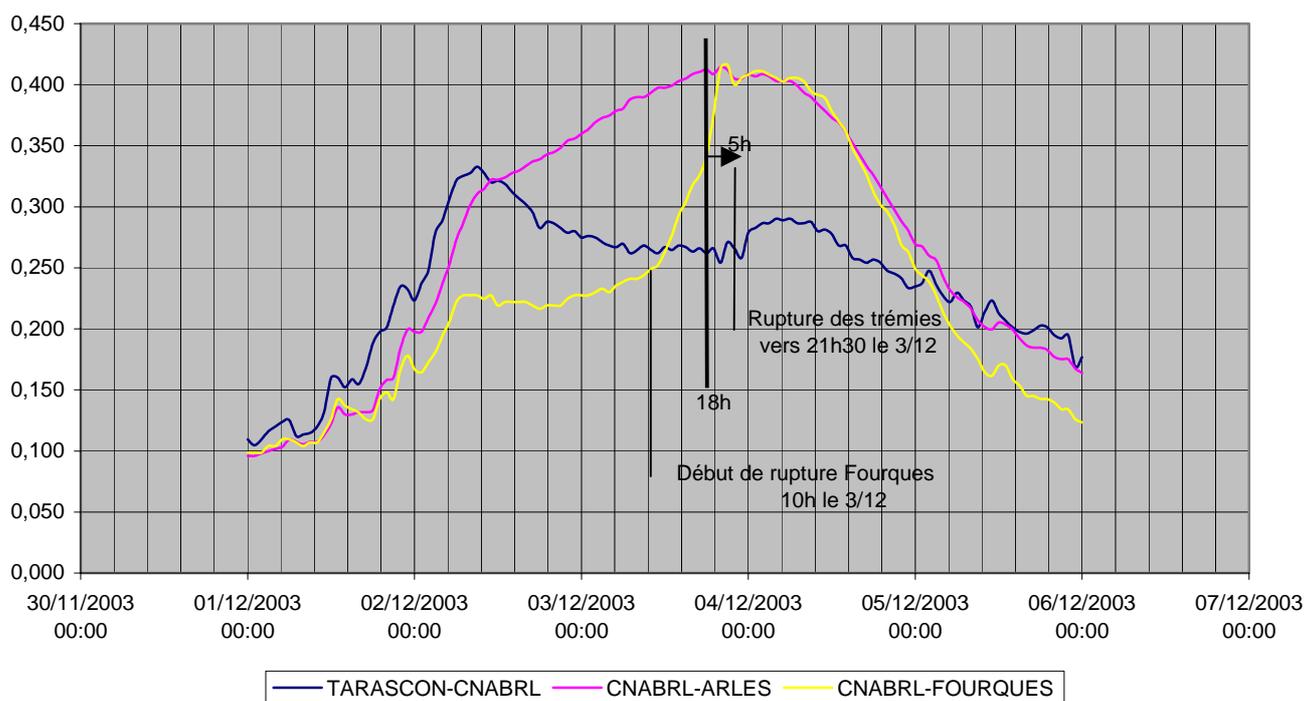


Vers 10h30, la digue du petit Rhône rive droite se romps en aval de Fourques. La décrue constatée sur les évolutions des hauteurs d'eau commence le 3/12 à 12h à la défluence à Fourques et elle débute à 18h en Arles ainsi qu'à la prise d'eau de la CNABRL alors que la crue est toujours dans sa phase ascendante à Beaucaire.

La rupture de la digue au droit de Fourques réduit considérablement le débit transitant en aval, permet donc d'abaisser la ligne d'eau sur le Petit Rhône et écarte les risques de déversements en rive gauche.

Au droit de la brèche de Fourques, le niveau de l'eau s'est alors considérablement abaissé. Ce phénomène a pour conséquence une augmentation de la pente motrice de l'écoulement en amont de la brèche induisant une augmentation de la capacité du réseau hydraulique du Pallier d'Arles qui peut alors encaisser l'apport supplémentaire amont, la crue étant toujours dans sa phase ascendante à Beaucaire jusqu'à 3h le 4 décembre.

Variation des pentes (m/m) de lignes d'eau



C'est ainsi que la pente motrice entre la station de la BRL et celle de Fourques est passée de 0,25/1000 à 0,41/10000 entre 10h et 21h le 3 décembre. Cette pente motrice importante entre ces deux points a perduré jusqu'à 8h le 4 décembre. Cette augmentation de pente motrice permet une augmentation du débit de 30% sous une même hauteur d'eau (entre 10h et 18h cette augmentation de débit est de l'ordre de 18%, la pente motrice passant de 0,25/1000 à 0,35/1000 sous une même hauteur d'eau). De ce fait, la décrue constatée aux stations de mesures de niveaux à Fourques et à la prise d'eau BRL n'est pas synonyme d'une décrue en terme de débit. Elle est due au fait que l'accroissement de la capacité hydraulique du fleuve due à l'augmentation de la pente motrice est supérieur à l'augmentation du débit venant de l'amont.

Cette augmentation de la pente motrice entre la prise d'eau BRL et Fourques est encore perceptible entre Beaucaire et la prise d'eau BRL à partir de 21h le 3 décembre – elle passe de 0,266/1000 à 0,290/1000 ce qui correspond à une augmentation du débit de 4,5% sous une même hauteur. Ce résultat est sans doute à tempérer du fait de l'apparition des brèches dans les digues des trémies SNCF qui ont lieu à 21h30. Ces brèches ont pour conséquence de réduire le débit à l'aval et donc contribue à baisser la ligne d'eau au droit des stations d'observations limnigraphiques aval sans pour autant diminuer la ligne d'eau en amont.

L'observation de la variation des pentes des lignes d'eau observées entre Tarascon et la station de la BRL fait ressortir une forte diminution de ces pentes à partir du 2 décembre à 9h (0,33/1000) jusqu'au 3 décembre 10h (0,265/1000). A cette heure le 2 décembre, le Rhône débitait à Tarascon un débit de 8300 m<sup>3</sup>/s qui correspond au débit de début de débordement dans les ségonaux. Les écoulements dans ce lit majeur ralentissent la propagation de l'onde de crue et provoquent un rehaussement de la ligne d'eau en aval. Le régime semble ensuite se stabiliser avec une pente moyenne de 0,265/1000 entre 10h le 3 décembre et 21h ce même jour, heure à laquelle une augmentation de la pente des lignes d'eau est de nouveau constatée.

Par contre l'observation de la variation des pentes des lignes d'eau observées entre le limnigraphe de la BRL et Arles tend à montrer que les écoulements ne sont plus aussi perturbés, la pente des lignes d'eau continuant à augmenter pour atteindre une pente motrice de 0,416/1000 le 3 décembre à 21h.

La forte augmentation de la pente motrice dans le Petit Rhône a sans doute aussi pour conséquence de modifier la répartition des débits entre le Petit Rhône et le Grand Rhône au profit du Petit Rhône qui voit son débit augmenter, réduisant ainsi le débit transitant par le Grand Rhône et les risques de submersions de la digue de Bariol. C'est ce phénomène qui explique sans doute le début de la décrue en Arles à 18h qui correspond à une véritable décrue en débit alors qu'à Beaucaire la crue est toujours dans sa phase ascendante.

La rupture des trémies SNCF vers 21h le 3 décembre permet aussi de soulager le système hydraulique de quelques centimètres évitant la submersion totale du remblai SNCF et sa probable destruction. Par contre, les débits qui transitent par ces ouvrages inondent l'ensemble de la plaine du Grand Trébon, les marais d'Arles et les marais de la vallée des Baux.

## II – 2 Les enseignements

En amont de Beaucaire :

- **Une hydrologie de crue imprévisible.** L'étude Globale a bien fait ressortir la diversité des typologies des crues du Rhône en aval de Viviers. La crue de 2003 a confirmé cette diversité et le caractère quelque peu imprévisible de la genèse de ces crues du fait des multiples facteurs qui interviennent dans leur formation. Bien que faisant partie de la typologie des crues Méditerranéennes extensives, elle s'est singularisée par un enchaînement tout à fait particulier qui a débuté par la concomitance presque parfaite des apports modestes des affluents situés entre Viviers et Avignon et qui s'est traduite par une crue forte du Rhône heureusement écrêtée par les zones d'expansion de La Palud, Roquemaure et Caderousse. La forte crue du Rhône provenant de l'amont a ensuite trouvé ces zones d'expansion pratiquement pleines sans possibilité d'écrêtement en dépit de son

faible volume. Par la suite, en aval d'Avignon, cette crue s'est amplifiée des apports maximaux de la Durance et du Gardon qui, même modestes, en ont fait une crue des plus importantes à Beaucaire.

- **Des champs d'expansion qui ont montré toute leur capacité d'écrêtement** pour des crues pointues à faible volume. Ils ont cependant montré leurs limites lors du passage de la pointe de la crue amont. Leurs volumes sont relativement restreints et il ne faut donc pas en attendre beaucoup pour l'écrêtement de crues plus épaisses comme l'a bien fait ressortir l'étude Globale.
- **Une contribution forte des crues de la Durance et dans une moindre mesure du Gardon** sur la crue la crue du Rhône en aval de Tarascon. Cette contribution est d'autant plus importante à considérer que la seule zone d'expansion des crues permettant de la minimiser est celle relativement modeste de Boulbon – Aramon et qu'à l'aval le Rhône est totalement endigué avec un fonctionnement en tout ou rien.

En aval de Beaucaire :

- **Un réseau hydraulique très contraint**
  - En premier lieu sur le Petit Rhône : bien avant que le débit à Beaucaire atteigne les 11 000 m<sup>3</sup>/s, les capacités hydrauliques du lit du Petit Rhône sont atteintes en plusieurs secteurs, les déversements en rive droite en aval du Sylvéreal participant déjà à la diminution du niveau des lignes d'eau en amont sans pour autant être suffisants. La capacité hydrauliques du Petit Rhône est donc le premier facteur limitant de l'ensemble du système hydraulique du Grand Delta du Rhône
  - ...

### **III - LA COURBE DE TARAGE DE LA STATION DE TARASCON – LES JAUGEAGES EFFECTUES AU COURS DE LA CRUE**

#### **Les jaugeages effectués au cours de la crue**

Plusieurs jaugeages ont été effectués au cours de la crue en utilisant deux types de matériels : le moulinet et l'ADCP 600.

Les résultats sont mentionnés dans le tableau suivant et sont pointés sur les différents hydrogrammes obtenus à partir de différentes courbes de tarage :

- courbe initiale de la CNR réalisée à la suite des jaugeages effectués lors de la crue de 1994,
- courbe corrigée par la CNR suite aux jaugeages effectués lors de la crue de décembre 2003,
- courbe 1 proposée par le GAES
- courbe 2 proposée aussi par le GAES en alternative à la première

Ces jaugeages ont été effectués au PK269,500, 100 m en amont de la station de mesure qui se trouve au droit du nouveau pont de Tarascon-Beaucaire au PK269,600.

Au droit de cette station de mesure de débit, tout le débit du Rhône passe dans cette section ; il n'y a pas de débordement, même pour les très forts débits.

Date	Heure	Débit en m <sup>3</sup> /s	Hauteur en mNGF	Matériel
3/12/2003	9h10 à 9h40	10 881	10.88	ADCP 600
	9h50 à 10h40	10 863	10.92	ADCP 600
	12h15 à 12h35	11 051	11.10	ADCP 600
	10h45 à 12h10	10 184	11.03	Moulinet
4/12/2003	11h00 à 11h40	10 810	10.87	ADCP 600
	11h50 à 13h00	10 614	10.75	ADCP 600
	12h05 à 13h00	10 401	10.74	ADCP 1200 + GPS
	13h20 à 14h15	9 851	10.49	ADCP 600 + GPS
	16h10 à 17h05	9 001	9.93	ADCP 600 + GPS
	16h15 à 17h20	8394	9.85	Moulinet

Les jaugeages au moulinet n'ont pas été réalisés avec toute la rigueur requise pour avoir une précision optimale. Ils ont été réalisés sur une dizaine de verticales (un bon jaugeage au moulinet dans cette section nécessite habituellement 40 verticales), à l'aide d'une mesure de surface et d'un coefficient de répartition obtenu à l'aide de six mesures sur une verticale. Ces jaugeages avaient plutôt comme objectif de venir en secours aux jaugeages réalisés avec l'ADCP si les données de ces mesures venaient à disparaître. De ce fait, la précision de ces jaugeages est donnée à plus ou moins 10% par la CNR.

Les jaugeages du 3 décembre ont été réalisés lors de la phase ascendante de la crue et à un moment où les hauteurs observées à la station n'ont pas été affectées par l'impact éventuel des différentes brèches sur les lignes d'eau.

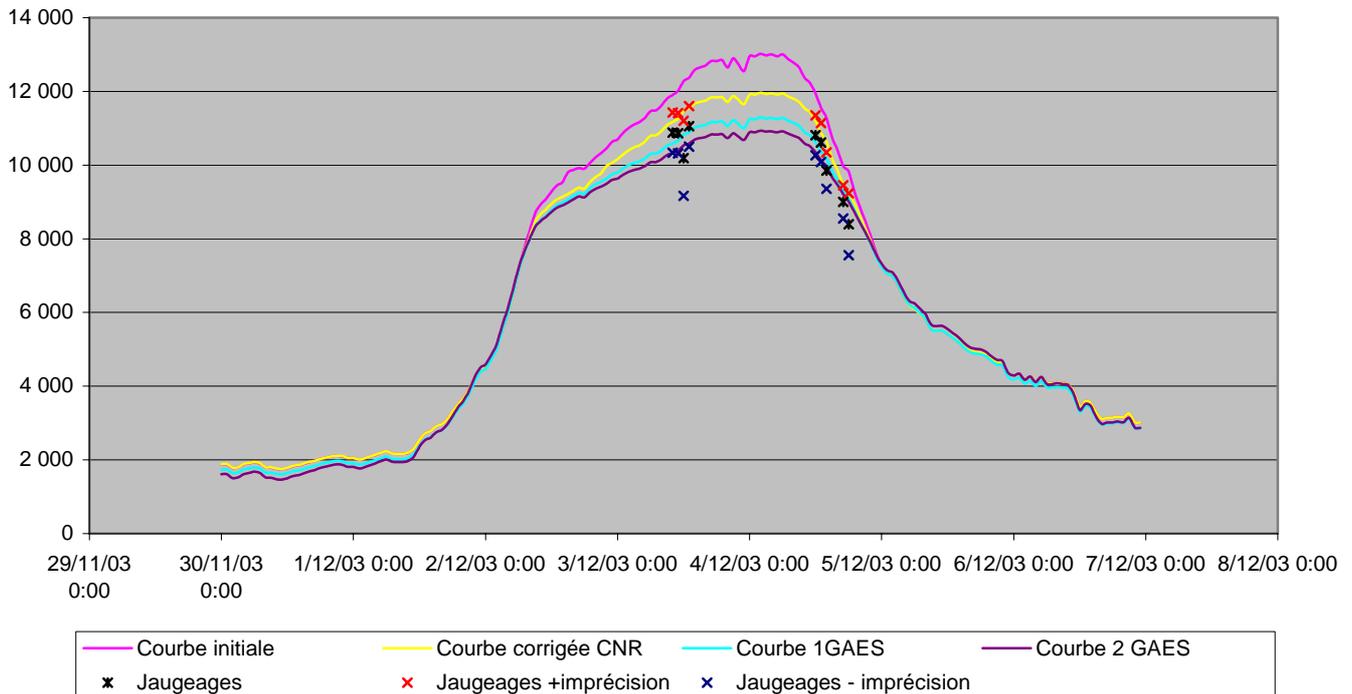
Par contre les jaugeages du 4 décembre ont été réalisés en phase descendante de la crue, les hauteurs observées pouvant être influencées par les conditions particulières des écoulements aval dues aux brèches existantes.

Les jaugeages ADCP sont donnés avec une précision de  $\pm 5\%$  et les jaugeages au moulinet à  $\pm 10\%$ .

Le graphe ci-après matérialise les valeurs de ces différents jaugeages avec leur marge d'incertitude au regard des différents hydrogrammes obtenus à l'aide de la courbe limnigraphique observée à la station de Tarascon et des différentes courbes de tarage en concurrence :

- la courbe de tarage CNR en vigueur au cours de la crue et qui a été obtenue suite aux jaugeages réalisés en 1994.
- La courbe de tarage CNR corrigée suite aux jaugeages effectués au cours de la crue de 2003
- Les deux courbes réalisées par le GAES dans le cadre de la mission d'inspection des IGE, le GAES préconisant d'utiliser la courbe 2.

#### Crue de décembre 2003 à Tarascon - hydrogrammes issues des différentes courbes de tarage



De ce graphique il ressort que toutes les valeurs hautes des marges d'incertitudes des jaugeages se situent sur l'hydrogramme corrigé CNR, les valeurs médianes se situant entre la courbe CNR et la courbe 1 du GAES.

#### **IV L'ANALYSE HYDRAULIQUE DES ECOULEMENTS A L'AVAL DE BEUCAIRE - UNE ESTIMATION DU DEBIT DE POINTE DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003**

L'analyse du mécanisme de la formation de la crue de 2003 fait ressortir, au niveau de Beaucaire, une certaine cohérence entre l'hydrogramme reconstitué avec la courbe de tarage corrigée de la CNR et l'hydrogramme résultant de cette approche. Le débit maxi de cette crue avoisinerait les 12 000 m<sup>3</sup>/s avec cependant beaucoup d'imprécisions inhérentes à l'approche.

L'analyse des résultats des jaugeages tend à montrer que l'hydrogramme reconstitué CNR sur évalue encore légèrement la pointe de la crue.

L'analyse hydraulique des écoulements en aval de Beaucaire devrait nous apporter quelques renseignements supplémentaires.

Entre Beaucaire et Arles, sur le pallier d'Arles, l'analyse de ces écoulements est fortement perturbée par l'impact des ruptures des brèches – brèches aval puis brèches amont - qu'il est difficile d'évaluer.

Par contre le secteur d'Arles est peu impacté par ces phénomènes bien que sous contrôle du niveau marin.

Sur ce secteur nous avons par ailleurs quelques repères de crue.

La modélisation hydraulique réalisée par le BCEOM dans le cadre de l'Etude Globale Rhône fournit des lignes d'eau pour différents débits.

Rappelons que ce modèle a été calé sur deux crues :

- crue de janvier 1995 de 4700 m<sup>3</sup>/s à Beaucaire : crue non débordante du lit mineur
- et crue de novembre 1994 de 9700 m<sup>3</sup>/s à Beaucaire : crue débordante dans le ségonnal

Ce calage a ensuite été validé sur deux crues :

- crue d'octobre 1993 de 9800 m<sup>3</sup>/s à Beaucaire (avec ses différentes brèches)
- crue de janvier 1994 de 11 000 m<sup>3</sup>/s à Beaucaire

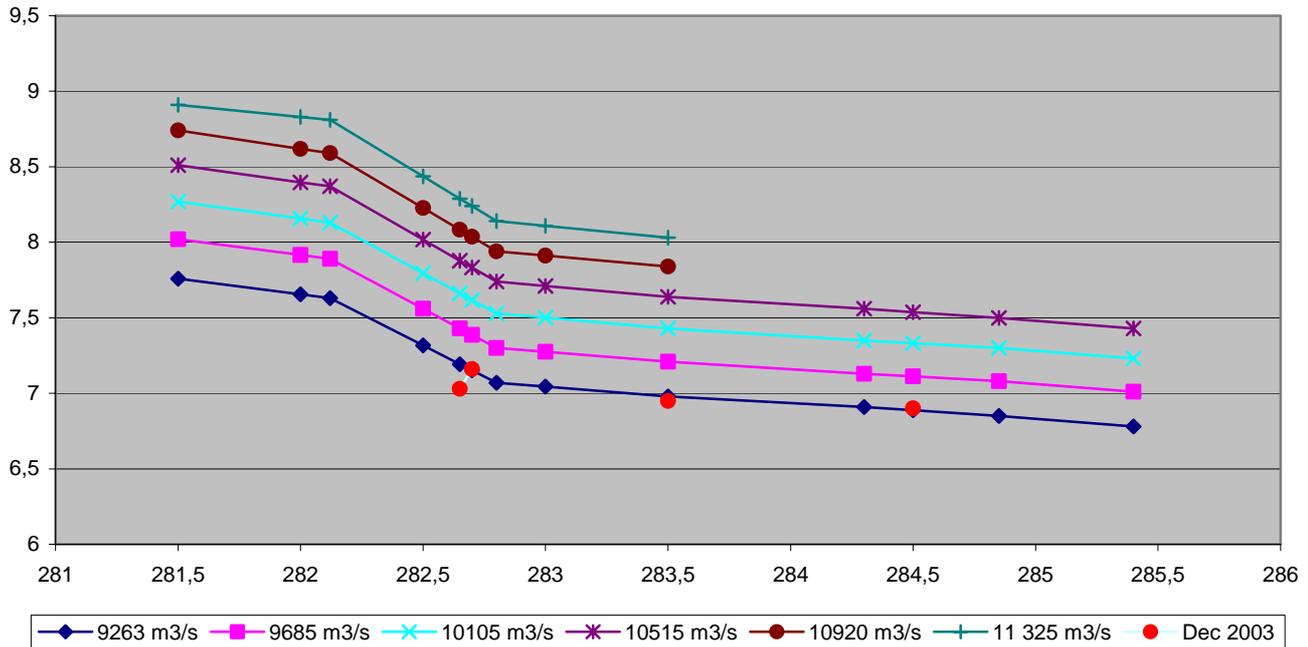
Sur le calage, les écarts entre hauteurs d'eau calculées et hauteurs d'eau observées ne dépassent jamais 15 cm sur l'ensemble de la zone d'étude et de quelques centimètres dans la traversée d'Arles. En validation, la ligne d'eau calculée dans la traversée d'Arles pour la crue de janvier 1994 est entre 7 et 16 cm au dessus des repères observés. Le calage du modèle donne donc des valeurs plutôt pessimiste par rapport aux observations.

Notons que ce résultat est corroboré par les résultats d'une étude plus ponctuelle réalisée en septembre 2003 par le bureau ISL pour le compte du Symadrem sur la stabilité des quais d'Arles. Une modélisation hydraulique a été effectuée entre les PK 281,5 et 283,5 dans la traversée d'Arles à l'aide de profils en travers batymétriques distants de 100 m. Calée sur les observations des deux crues de novembre 2002, les lignes d'eau calculées par ce modèle filaire sont, à débit égal, de l'ordre de 10 à 15 cm en dessous des lignes d'eau calculées par le modèle BCEOM qui est plus rustique puisque les profils en travers sont distants de 500 m.

Par contre les résultats du modèle ISL au droit d'Arles sont très sensibles aux conditions aval car le modèle est trop limité dans l'espace. De ce fait, nous avons opté en premier lieu de retenir les résultats du modèle BCEOM du fait aussi que les débits des crues de 1994 pourraient être revus à la baisse et particulièrement celle de janvier – très faible modification pour la crue de novembre 1994.

Ci dessous les lignes d'eau calculées dans la traversée d'Arles pour différents débits et les repères de crues observés lors de la crue de décembre 2003.

### Lignes d'eau dans la traversée d'Arles calculées BCEOM

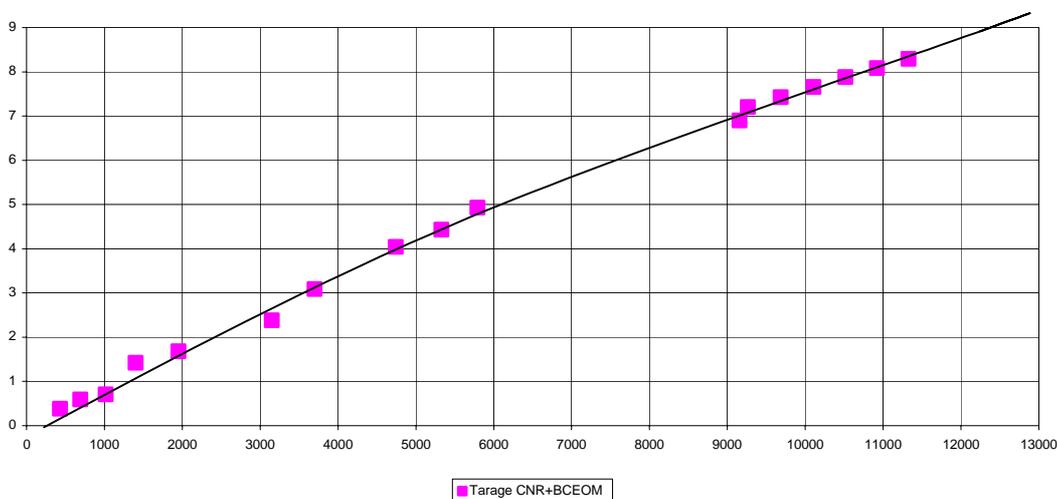


Trois des quatre points d'observations de la crue de 2003 sont bien alignés avec la ligne d'eau du débit de 9260 m<sup>3</sup>/s, le quatrième étant situé 16 cm en dessous de la ligne d'eau de ce débit.

Ce dernier point est celui du maxi du limnigramme observé à la station d'Arles. La courbe de tarage de cette station, reconstituée à l'aide des données observées par la CNR en partie basse et calculées à l'aide du modèle BCEOM en partie haute, permet d'associer un débit de 9000 m<sup>3</sup>/s à la cote de 7,03 m observée au maximum de la crue de décembre 2003.

Du fait de l'alignement de trois des quatre repères de crues sur la ligne d'eau calculée pour 9260 m<sup>3</sup>/s, nous retiendrons par la suite cette valeur du débit maximum observé à Arles.

**Courbe de Tarage Arles**  
points observés CNR partie basse - calculés BCEOM partie haute



Toutes les simulations hydrauliques réalisées à l'aide du modèle du BCEOM dans le cadre de l'Etude Globale Rhône et dans l'élaboration de la stratégie de réduction du risque inondation dans le cadre du plan Rhône ont montré que la répartition Petit Rhône – Grand Rhône était relativement stable avec la clé de répartition suivante : 12 à 13% Petit Rhône – 88 à 87% Grand Rhône.

De ce fait, si le débit maxi de la crue de décembre 2003 est de l'ordre de 9260 m<sup>3</sup>/s en Arles, il est compris entre 10 520 m<sup>3</sup>/s et 10 645 m<sup>3</sup>/s en amont de la défluence, en ne tenant pas compte de l'influence de la brèche sur le débit du petit Rhône. La différence entre ces deux débits n'étant pas énorme, nous prendrons donc pour la suite un débit de 10 600 m<sup>3</sup>/s à ce stade.

Comme nous l'avons vu précédemment, la brèche de Fourques a sans doute eu une incidence sur le débit du Petit Rhône en l'augmentant au minimum de 18%, cette augmentation pouvant atteindre les 30%. De ce fait, le débit maxi à la défluence qui prend en compte l'effet de la brèche de Fourques avec ces fluctuations possibles varie entre 10835 m<sup>3</sup>/s et 11 000 m<sup>3</sup>/s avec un débit dans le Petit Rhône qui varie entre 1575 m<sup>3</sup>/s et 1740 m<sup>3</sup>/s.

Entre Beaucaire et Arles, les ségonnaux ont un pouvoir d'écrêtement que l'étude Globale Rhône estimait entre 8 et 10% pour les crues largement débordantes. Les récents calculs du BCEOM réalisés dans le cadre du Plan Rhône montrent qu'il est plutôt de l'ordre de 4%. Le débit maxi à l'aval de Beaucaire oscillerait de ce fait entre 11 290 m<sup>3</sup>/s et 11 450 m<sup>3</sup>/s.

A ces débits s'ajoutent ensuite les débits des brèches amont évalués entre 200 et 240 m<sup>3</sup>/s. Le débit maxi de cette crue à Beaucaire pourrait donc être évalué entre 11 500 m<sup>3</sup>/s et 11 700 m<sup>3</sup>/s.

Il est un fait que cette estimation repose essentiellement sur l'estimation initiale du débit transitant en Arles. Notons cependant qu'elle permet de mettre en cohérence les observations faites au cours de cette crue avec les résultats de l'étude Globale Rhône entre Beaucaire et Arles. Pour ce débit l'étude faisait ressortir le fait que, comme il l'a été observé, le remblai SNCF rive gauche était à la limite du débordement.

Reste le cas de Port Saint Louis où l'Etude Globale décelait un risque de faible submersion dès 9000 m<sup>3</sup>/s avec une sur-côte de 0,6m. Le débit estimé en Arles est légèrement supérieur à cette valeur (9260 m<sup>3</sup>/s), la sur-côte observée légèrement supérieure et aucun débordement n'a été constaté. Il est probable qu'un effet d'écrêtement dans les ségonnaux ait eu lieu – les repères de crues relevés par la CNR en témoignent – ce qui aurait permis d'éviter ces débordements.

