

**Simulations complémentaires des  
écoulements des crues du Rhône de  
Beaucaire à la mer**

**TABLE DES MATIERES**

---

<b>1.</b>	<b>CADRE ET OBJET DE L'ÉTUDE</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>RAPPEL DES DONNÉES EXISTANTES</b>	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>CONDITIONS HYDROLOGIQUES</b>	<b>3</b>
<b>4.</b>	<b>AJUSTEMENT AUX LIMNIGRAMMES MESURÉS LORS DE LA CRUE DE 2003</b>	<b>5</b>
4.1.	Test 1 : simulation avec les brèches observées	5
4.2.	Test 2 : calage aux limnigrammes de Fourques et d'Arles	8
<b>5.</b>	<b>AJUSTEMENT DE LA LIGNE D'EAU RELEVÉE PENDANT LA CRUE</b>	<b>10</b>
<b>6.</b>	<b>DÉBITS DE DÉBUT DE DÉBORDEMENTS ENTRE BEAUCAIRE ET ARLES</b>	<b>12</b>
<b>7.</b>	<b>IMPACT DES BRÈCHES</b>	<b>14</b>
7.1.	Crue de décembre 2003	14
7.1.1.	Avec les brèches observées	14
7.1.2.	Avec modèle conforme aux observations à Fourques et Arles défini au §4.2	16
7.2.	Crue d'octobre 1993	18
7.3.	Crue de janvier 1994	20

## **1. CADRE ET OBJET DE L'ETUDE**

---

Cette étude complémentaire pour le compte de la CNR intervient dans le cadre de la validation du débit du Rhône à Beaucaire durant la crue de décembre 2003.

CNR réalise une démarche de validation basée sur une double approche :

- les enregistrements aux stations hydrométriques de débit et les mesures (jaugeages) sur le terrain puis la transposition par des courbes Hauteur/Débit,
- des simulations mathématiques des écoulements qui consistent à introduire des hydrogrammes estimés dans les modèles hydrauliques pour obtenir par itérations les résultats en niveaux de ces modèles les plus proches des cotes enregistrées aux différents limnigraphes qui jalonnent le Rhône.

Cette démarche permet de vérifier la cohérence des débits enregistrés sur le Rhône, de les critiquer par rapport à une approche hydraulique d'ensemble.

Cette démarche a été menée par CNR en aval de Valence jusqu'à la restitution de Beaucaire.

CNR souhaite compléter cette analyse par la simulation des écoulements observés en aval sur le delta du Rhône, en y intégrant les accidents hydrauliques provoqués par les ruptures de digues.

Dans ce cadre, BCEOM a été missionné en 2004 pour réaliser des simulations mathématiques des écoulements.

Suite à cette étude, de nouveaux tests ont été effectués.

## 2. RAPPEL DES DONNEES EXISTANTES

---

Dans le cadre de "l'Etude Globale pour une réduction des risques dus aux crues du Rhône" menée en 2003, un modèle mathématique de simulation des écoulements multidirectionnels fonctionnant en régime transitoire a été mis en œuvre.

Ce modèle a été élaboré à l'aide du logiciel STREAM.

STREAM, Simulation en TRansitoire des Ecoulements A surface libre Multidirectionnels a été développé par BCEOM et mis en œuvre sur de nombreux cours d'eau.

Ce modèle dit « modèle à casiers » décrit fidèlement le lit mineur et le champ d'inondation à l'aide d'un découpage fin de l'espace. Le principe de base de cette modélisation est, en effet, de ne pas imposer a priori une « grille » de représentation de l'espace, mais au contraire d'épouser la réalité des écoulements. Les casiers sont ainsi délimités en fonction des axes structurants les flux (lits et chenaux, endiguement, déversoirs ...) et des sections les plus représentatives des conditions d'écoulement (profils en travers, singularités ...).

La répartition des écoulements (qui fait partie de la simulation proprement dite) permet de reconstituer l'aspect multidirectionnel qui est variable avec l'importance de la crue.

Ce modèle est donc particulièrement bien adapté à la modélisation des phénomènes hydrauliques complexes rencontrés dans le champ d'inondation de la zone deltaïque du Rhône.

La zone correspondant à l'enveloppe de la crue du Rhône de 1856 a été modélisée par près de 1100 casiers, ce qui permet de représenter les différentes directions d'écoulement ainsi que tous les obstacles existants.

Les résultats fournis par le modèle, sont, à chaque instant de la crue :

- les cotes d'eau,
- les débits,
- les vitesses d'écoulement,
- les durées de submersion

### 3. CONDITIONS HYDROLOGIQUES

---

Les conditions aux limites du modèle correspondent aux hydrogrammes de crue à représenter et aux niveaux marins.

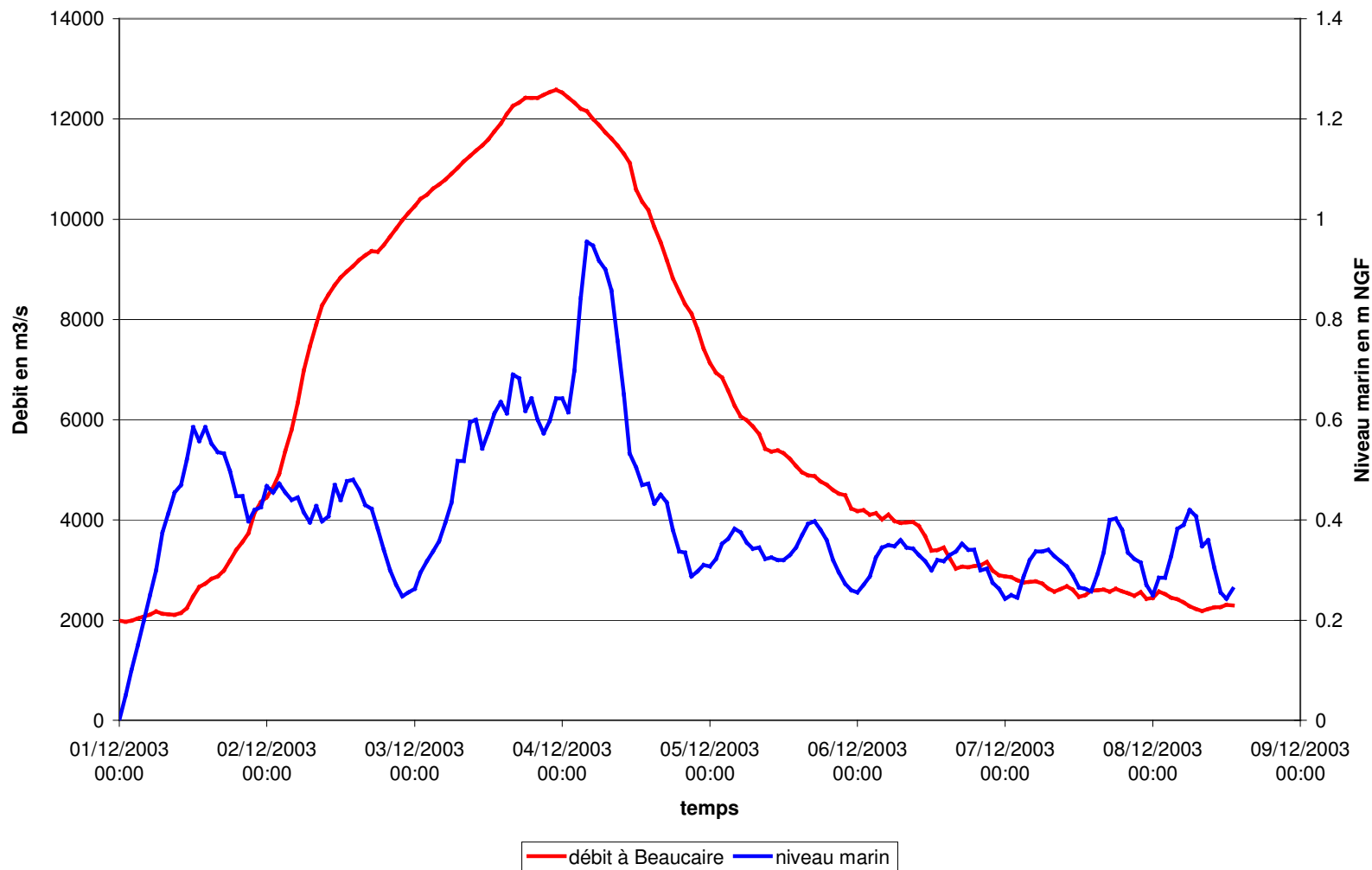
Le modèle a été utilisé par la suite pour effectuer différents tests afin de déterminer le débit du Rhône à Beaucaire permettant d'approcher au maximum les données mesurées lors de la crue de décembre 2003.

Les conditions aux limites utilisées par la suite sont les suivantes :

- Hydrogramme en amont de débit de pointe 12 500 m<sup>3</sup>/s à Beaucaire (fourni par la CNR)
- Niveau marin imposé en aval à partir du marégramme mesuré au grau de la Fourcade pendant l'épisode de crue

Ces conditions aux limites sont données en **figure 1**.

Figure 1 : Hydrogramme et marégramme de la crue de 2003



## 4. AJUSTEMENT AUX LIMNIGRAMMES MESURES LORS DE LA CRUE DE 2003

Au cours de la crue de décembre 2003, quatre brèches importantes se sont produites sur le Rhône en aval de Beaucaire.

Pour tenir compte de l'effet de ces déversements sur les niveaux de crue du Rhône, ces brèches ont été simulées par le modèle mathématique.

Les éléments nécessaires pour les simulations hydrauliques sont les suivantes :

- localisation précise des brèches,
- longueur et hauteur des brèches,
- moment où la rupture de digue s'est produite,
- durée de la rupture digue.

Divers tests ont été effectués pour retrouver les limnigrammes relevés pendant la crue aux différentes stations de mesure.

Le ballast de la voie ferrée entre Tarascon et Arles n'ayant pas cédé lors de la crue de décembre 2003, il a été pris en compte dans le modèle. Aucun débordement n'est autorisé en rive gauche entre Beaucaire et Arles, conformément à ce qui a été observé lors de la crue de 2003.

### 4.1. TEST 1 : SIMULATION AVEC LES BRECHES OBSERVEES

Diverses informations recueillies auprès du SYMADREM et de Réseau Ferré de France ont permis de décrire les caractéristiques et les mécanismes de rupture des digues.

Les caractéristiques des brèches observées lors de l'épisode de crue sont les suivantes :

Nom de la brèche	Cours d'eau concerné	Digue	Longueur de la brèche	Mécanismes de rupture
Trémie SNCF Mas de Tessier	Rhône	Voie SNCF Arles-Tarascon	8m (largeur de la trémie)	Surverse par dessus les cavaliers côté lit majeur
Trémie SNCF Les ségonaux	Rhône	Voie SNCF Arles-Tarascon	8m (largeur de la trémie)	Surverse par dessus les cavaliers côté lit majeur
Mas d'Argence (Fourques)	Petit Rhône	Digue rive droite	230 m	Surverse probable + autres facteurs
Claire-Farine (Saint Gilles)	Petit Rhône	Digue rive droite	120 m	Surverse

Ces brèches se sont ouvertes rapidement. Les brèches sur le Petit Rhône se sont produites le 3 décembre entre 8h et 10h environ et les ruptures des trémies le même jour vers 21h.

La brèche aval de Claire- Farine a rompu avant celle du Mas d'Argence. La crue n'était pas encore à son paroxysme.

Les résultats obtenus sont donnés en **figure 2**.

**Tableau : Estimation des écarts entre les cotes maximales mesurées et les cotes maximales du modèle pour un débit de 12500 m<sup>3</sup>/s**

Limnigraphes	Ecart en cm (cotes calculées - cotes mesurées)
Beaucaire	- 10 cm
Canal BRL	+ 5 cm
Arles	+ 60 cm
Grand Boisviel	+ 70 cm
Fourques	+ 50 cm
Saint Gilles	0
Petite Abbaye	0

Les écarts figurant dans ce tableau sont des valeurs moyennes extraites des graphiques au niveau du pic de crue

On constate des écarts de cotes importants sur le Petit Rhône et à Arles.

La diminution du niveau d'eau à Fourques due aux brèches se fait ressentir très rapidement dans la modélisation par rapport à ce qui a pu être mesuré au cours de la crue :

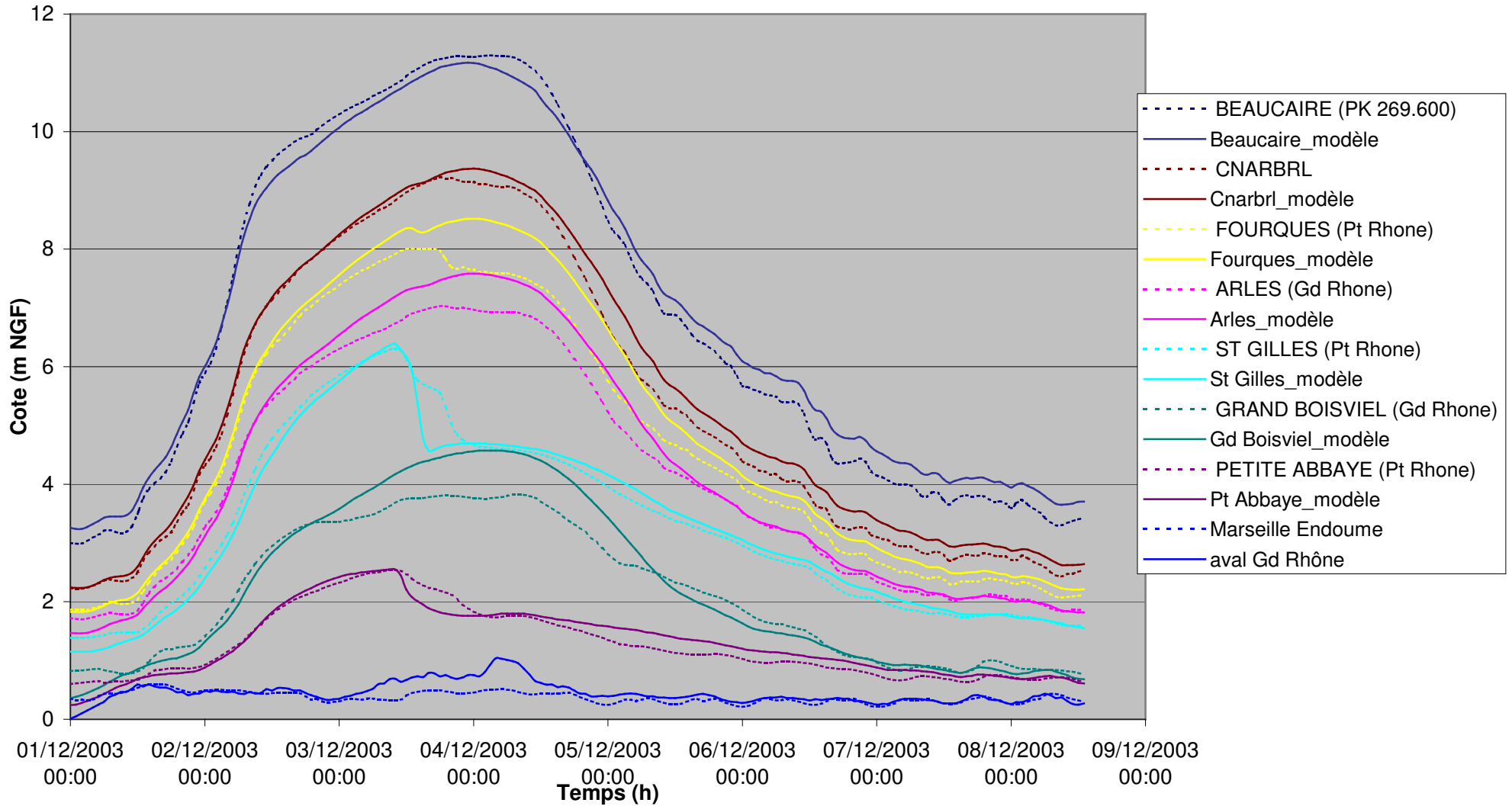
- Pour des brèches s'ouvrant entre 8h et 10h le 3 décembre, la baisse du niveau à Fourques est observée à partir de 14h avec le modèle.
- Selon le limnigramme mesuré lors de la crue, cette baisse aurait eu lieu à partir de 18h.

Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que les digues se seraient rompues de façon plus progressive.

Néanmoins, on constate que les modélisations intégrant les brèches observées ne peuvent entraîner un abaissement de ligne d'eau suffisamment important pour reproduire ce qui a été observé sur les limnigrammes.



**Figure 2**  
**Crue de type 2003 avec brèches observées**  
**Comparaison des cotes observées et des cotes calculées**



## 4.2. TEST 2 : CALAGE AUX LIMNIGRAMMES DE FOURQUES ET D'ARLES

Dans un second temps, l'objectif est de se recalibrer au niveau des limnigrammes de Fourques et d'Arles.

Pour cela, plusieurs simulations ont été effectuées intégrant différents ouvrages (déversoirs et brèches) permettant de retrouver les limnigrammes observés aux stations de mesure.

Après divers essais, le modèle a pu être calé au niveau des limnigrammes de Fourques et d'Arles en procédant suivant plusieurs étapes :

- Etape 1 : Baisse du niveau à Arles et Fourques en implantant un déversoir sur le Grand Rhône en aval immédiat d'Arles.
- Etape 2 : Baisse brutale du niveau d'eau à Fourques le 3 décembre à 18h en implantant une brèche importante entre le limnigraphe de Fourques et la brèche du Mas d'Argence

Les brèches observées lors de la crue ont été prises en compte.

En supplément des débits évacués en lit majeur par les brèches observées, la brèche supplémentaire en aval immédiat de Fourques déverse un débit de 2060 m<sup>3</sup>/s en pointe et le déversoir en aval d'Arles un débit d'environ 1200 m<sup>3</sup>/s en pointe.

Les résultats obtenus sont donnés en **figure 3**.

**Tableau : Estimation des écarts entre les cotes mesurées et les cotes du modèle pour un débit de 12500 m<sup>3</sup>/s**

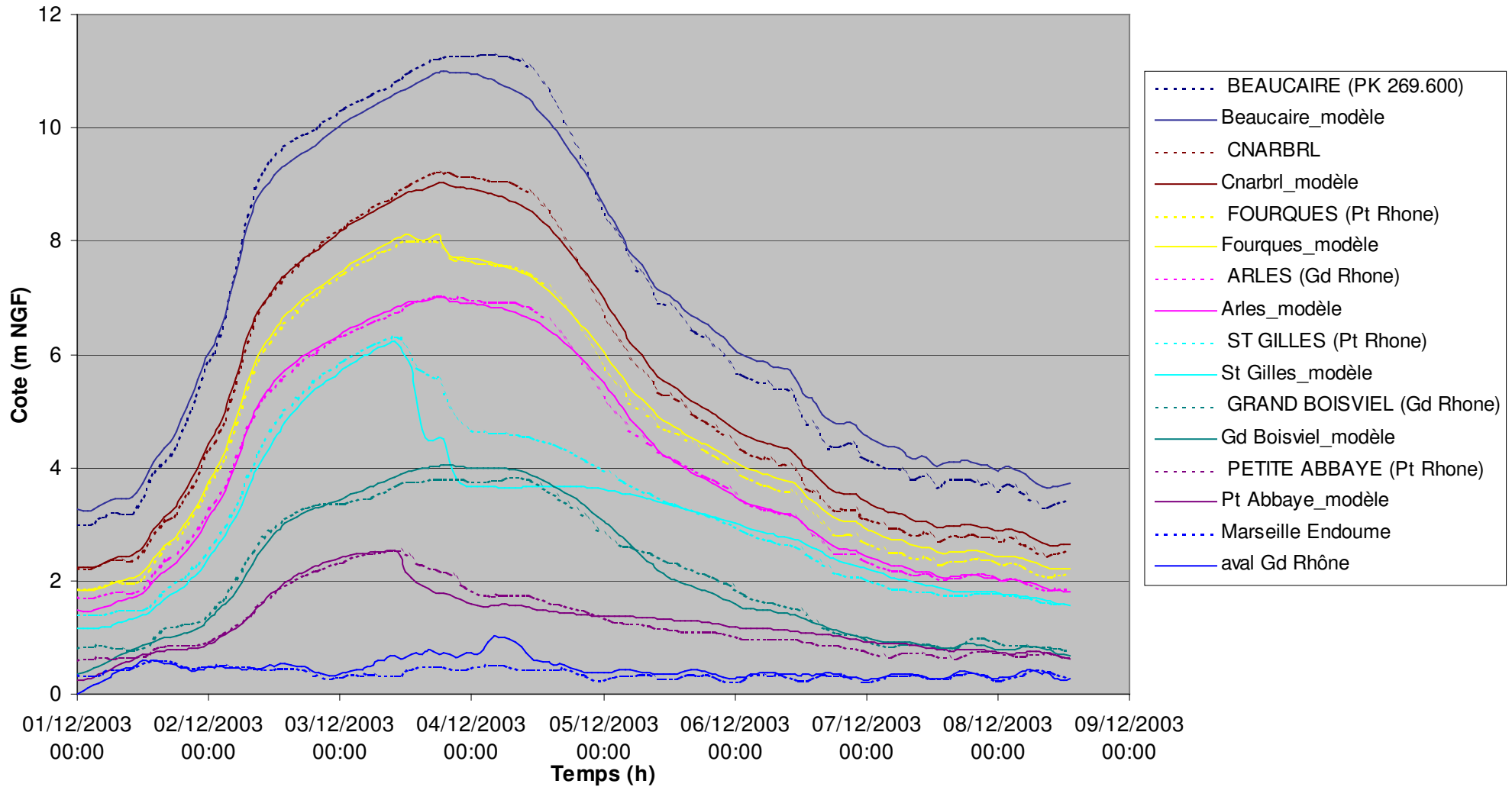
Limnigraphes	Ecart en cm (cotes calculées - cotes mesurées)
Beaucaire	- 30 cm
Canal BRL	- 20 cm
Arles	0
Grand Boisviel	+ 20 cm
Fourques	0
Saint Gilles	0
Petite Abbaye	0

Les écarts figurant dans ce tableau sont des valeurs moyennes extraites des graphiques au niveau du pic de crue

Le modèle est beaucoup mieux calé au niveau des limnigrammes de Fourques et d'Arles. Cependant, on observe des écarts plus importants en amont (-30 cm à Beaucaire).

Pour retrouver le niveau à Fourques et à Arles, il a été ainsi nécessaire de modifier de manière conséquente la répartition des débits entre le Grand Rhône et le Petit Rhône. On a ainsi un transfert de débit d'environ 600 m<sup>3</sup>/s de plus dans le Petit Rhône, transfert lié à la mise en place de la brèche supplémentaire et du déversoir.

**Figure 3**  
**Crue de type 2003 avec calage à Fourques et Arles**  
**Comparaison des cotes observées et des cotes calculées**



## 5. AJUSTEMENT DE LA LIGNE D'EAU RELEVÉE PENDANT LA CRUE

---

Des levés de niveaux d'eau ont été réalisés durant la crue. Ces mesures ont été réalisées le 3 décembre 2003 à partir de 11h10 en descente en barque depuis l'amont de Beaucaire jusqu'au canal du Rhône à Fos.

L'objectif de ce test est de trouver le débit correspondant à ces niveaux de crue.

Le modèle hydraulique prenant en compte les brèches observées a été utilisé. L'hydrogramme de la crue de type 2003 avec un débit de pointe de 12500 m<sup>3</sup>/s a été pris en compte.

Les lignes d'eau les plus proches de la ligne d'eau mesurée ont été extraites du modèles (10500, 11000 et 11500 m<sup>3</sup>/s à Beaucaire)

Les résultats obtenus sont donnés en **figure 4**.

Les débits correspondants au mieux sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

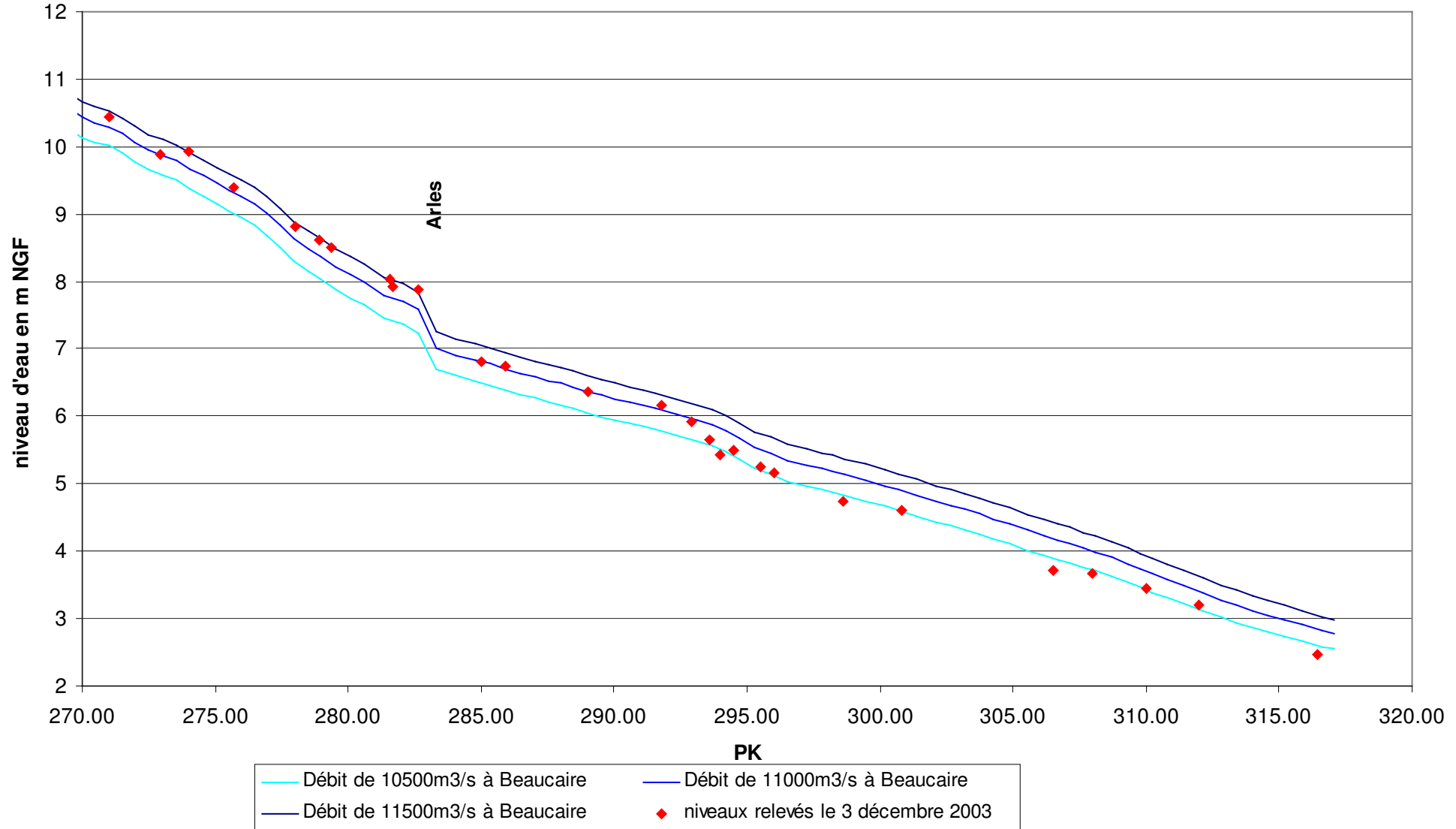
**Tableau : ajustement du débit à la ligne d'eau mesurée**

Localisation	Débit à Beaucaire en m <sup>3</sup> /s
En amont d'Arles	11 500
Depuis Arles jusqu'au niveau du canal de Meyranne	11 000
Aval du Grand Rhône	10 500

On connaît l'heure de début de ces relevés mais pas la durée des mesures qui aurait permis une interprétation des résultats plus poussée.

On peut cependant observer que le débit moyen correspondant à la ligne d'eau mesurée est de 11 000 m<sup>3</sup>/s à Beaucaire.

**Figure 4**  
**Ajustement du débit aux niveaux d'eau relevés le 3 décembre 2003 à partir de 11h10**



## 6. DEBITS DE DEBUT DE DEBORDEMENTS ENTRE BEUCAIRE ET ARLES

---

Les débits de début de débordement dans les ségonaux et en lit majeur ont été déterminés à partir :

- des profils en long des berges du lit mineur pour le débit débordant dans les ségonaux
- des profils en long des digues pour le débit débordant dans le lit majeur.

Les lignes d'eau ont été extraites du modèle :

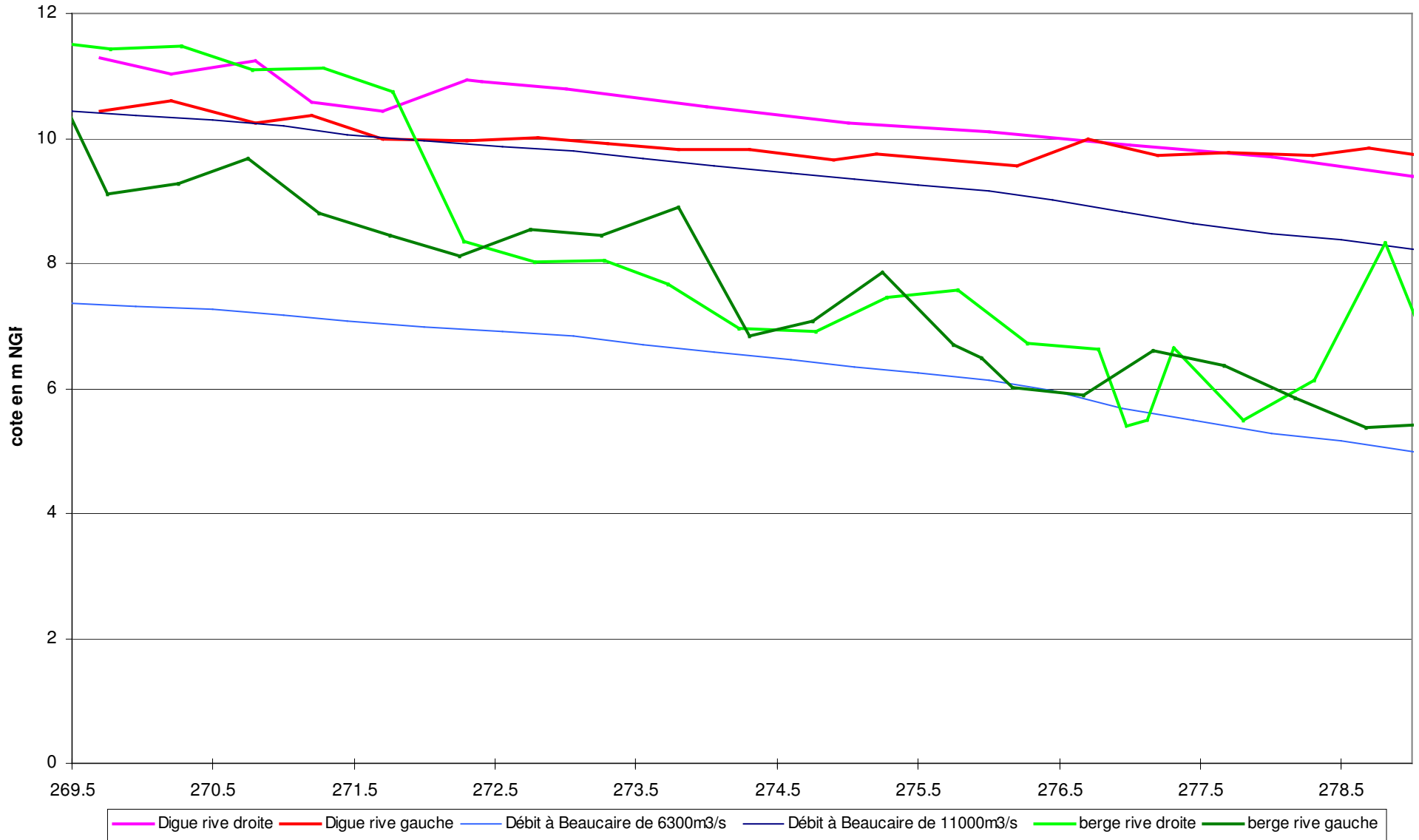
- avec implantation des brèches observées lors de l'épisode de crue
- avec l'hydrogramme de la crue de type 2003 d'un débit de pointe de 12500 m<sup>3</sup>/s

Les résultats obtenus sont donnés en **figure 5**.

Le débit de début de débordement dans les ségonaux est de 6300 m<sup>3</sup>/s et le débit de début de débordement en lit majeur est d'environ 11000 m<sup>3</sup>/s sur la rive gauche entre Beaucaire et Arles. Cette valeur ne prend pas en compte le ballast de la voie ferrée qui mesure environ 50 cm d'épaisseur (altimétrie non connue précisément à ce jour). Elle est donc pessimiste, le ballast ayant été touché lors de la crue de 2003.

Sans la prise en compte des brèches, le débit de début de débordement en lit majeur est plus faible (entre 10500 et 11000 m<sup>3</sup>/s), sous les mêmes hypothèses que précédemment.

Figure 5  
Profil en long entre Beaucaire et Arles



## 7. IMPACT DES BRECHES

---

L'impact des brèches pour différentes crues est évalué en comparant les limnigrammes avec et sans brèches aux différentes stations de mesures.

### 7.1. CRUE DE DECEMBRE 2003

Deux comparaisons ont été effectuées :

- Avec la prise en compte des brèches observées
- Avec la prise en compte des brèches observées, de la brèche et du déversoir supplémentaires implantés de façon à retrouver les limnigrammes mesurés aux stations de Fourques et d'Arles (cf § 4.2)

Le modèle initial ne prenait pas en compte du ballast de la voie ferrée entre Tarascon et Arles. Celui-ci n'a pas cédé lors de la crue de décembre 2003.

Le modèle a donc été modifié de manière à ne pas autoriser le débordement en rive gauche le long de la voie ferrée. Il est à observer que la cote exacte du ballast n'est pas connue à ce jour.

#### 7.1.1. Avec les brèches observées

Pour cette configuration, les niveaux calculés par le modèle pour un débit de  $12500\text{m}^3/\text{s}$  à Arles et à Fourques ne sont pas conformes aux observations à Fourques et Arles lors de la crue de 2003.

Les limnigrammes calculés par le modèle sont donnés en **figure 6**.

**Tableau : Estimation de l'impact des brèches pour un débit de  $12500\text{m}^3/\text{s}$**

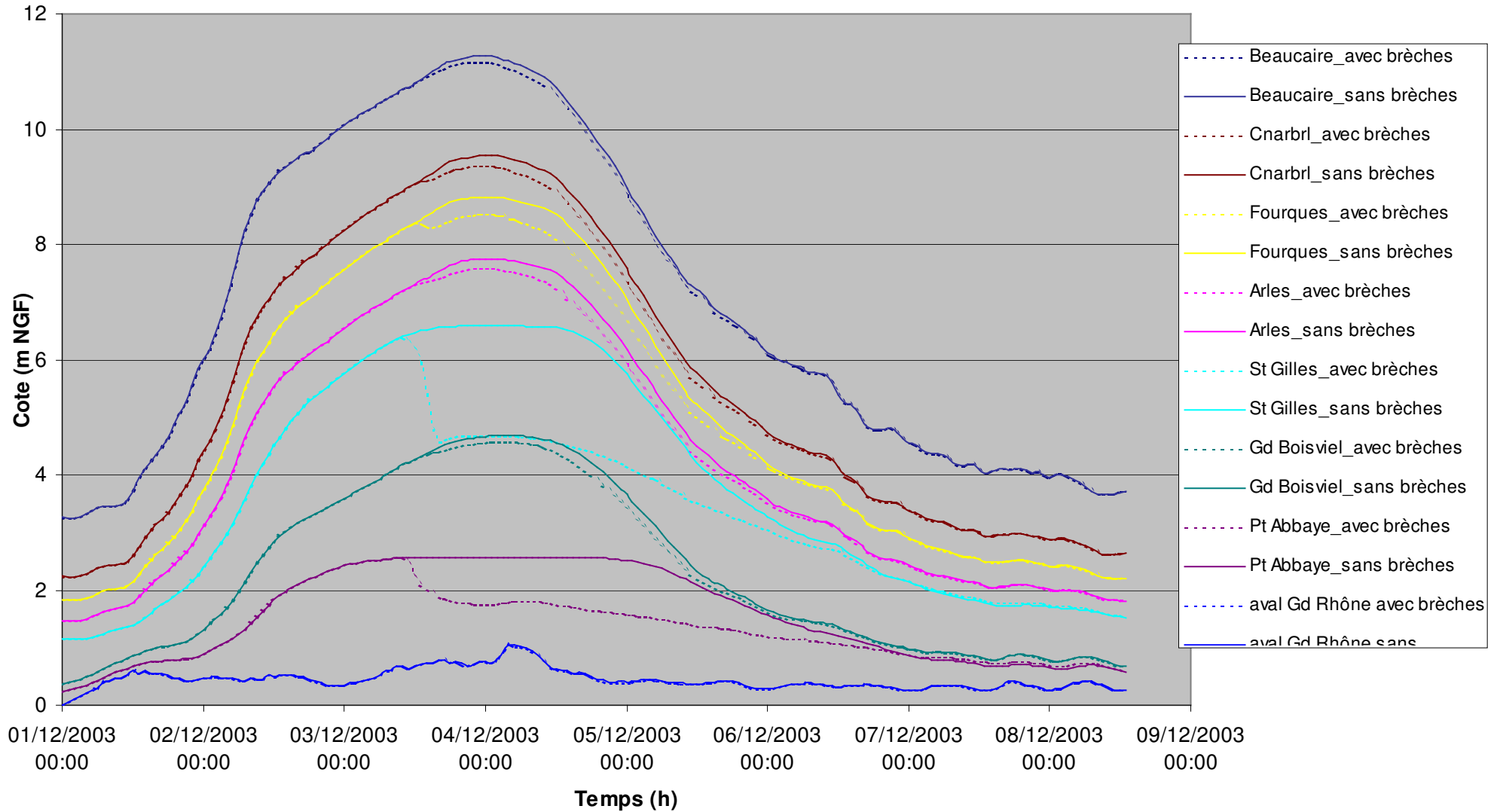
Limnigraphes	Impact des brèches en cm (cotes sans brèches – cotes avec brèches)
Beaucaire	10 cm
Canal BRL	15 cm
Arles	20 cm
Grand Boisviel	10 cm
Fourques	30 cm
Saint Gilles	190 cm
Petite Abbaye	80 cm

*Les impacts figurant dans ce tableau sont des valeurs moyennes extraites des graphiques au niveau du pic de crue*

L'impact des brèches du Petit Rhône est important en aval de celles-ci, notamment à St Gilles où il se traduit par une diminution de la ligne d'eau de 1.90m par rapport à l'état sans brèches. Cet impact s'atténue sur le tronçon Arles Beaucaire. Il n'est plus que de 10 cm à Beaucaire.



**Figure 6**  
**Crue de type 2003 - Comparaison des cotes avec et sans brèches**



### 7.1.2. Avec modèle conforme aux observations à Fourques et Arles défini au §4.2

Les limnigrammes calculés par le modèle sont donnés en **figure 7**.

Les hypothèses de travail sont les suivantes :

- configuration 1 : brèches observées+ brèche supplémentaire du Petit Rhône + déversoir sur le Grand Rhône tels que définis au § 4.2.
- configuration 2 : déversoir sur le Grand Rhône tel que défini au § 4.2 (les brèches de 2003 et la brèche supplémentaire sur le Petit Rhône ne sont plus actives)
- configuration 3 : sans déversoir sur le Grand Rhône et sans aucune brèche (état sans brèches)

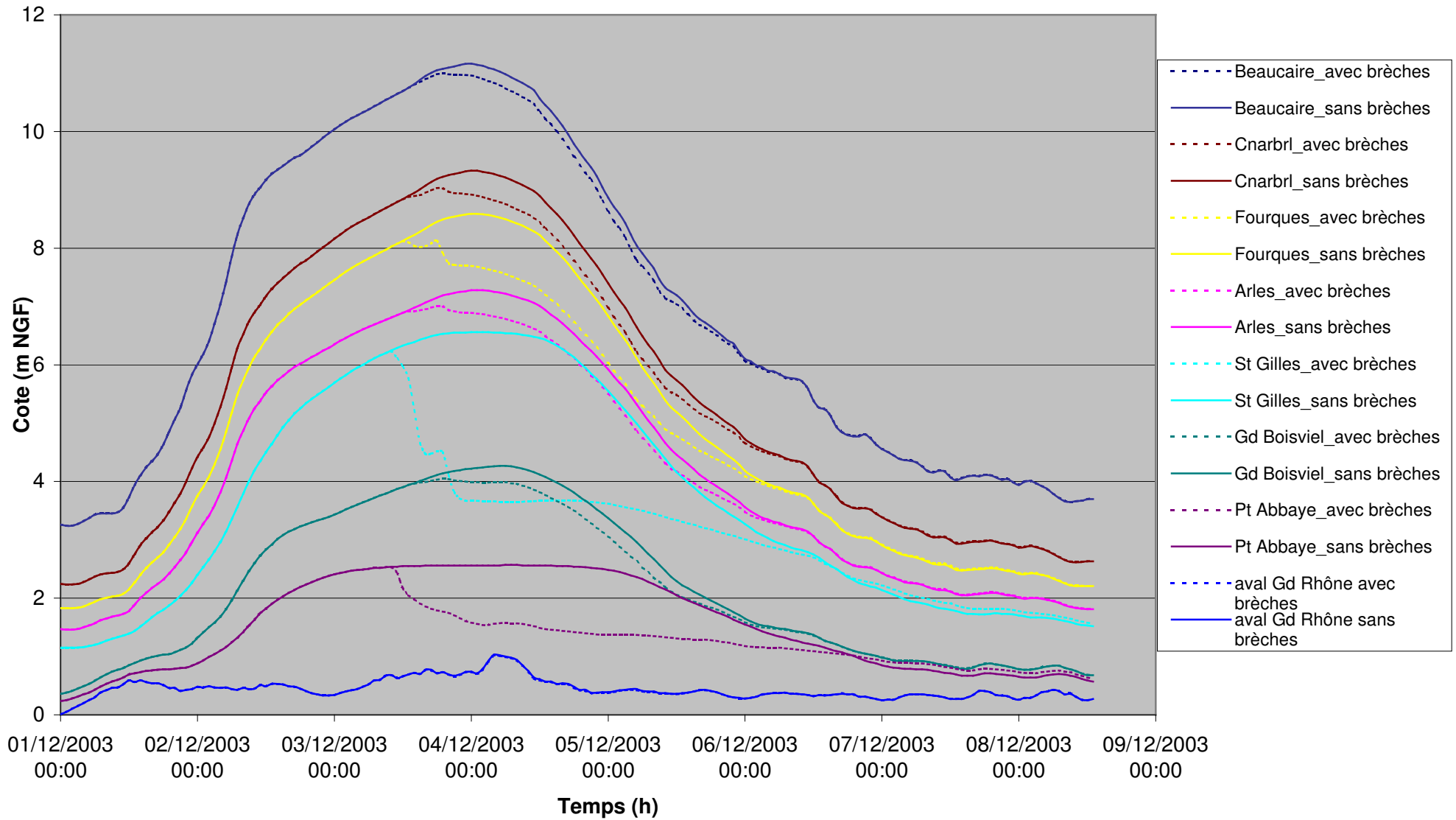
**Tableau : Estimation de l'impact des brèches pour un débit de 12500m<sup>3</sup>/s**

Limnigraphes	Impact des brèches en cm (configuration 2 – configuration 1)	Impact des brèches en cm (configuration 3 – configuration 1)
Beaucaire	20 cm	30 cm
Canal BRL	40 cm	60 cm
Arles	40 cm	85 cm
Grand Boisviel	30 cm	70 cm
Fourques	90 cm	110 cm
Saint Gilles	290 cm	290 cm
Petite Abbaye	100 cm	100 cm

*Les impacts figurant dans ce tableau sont des valeurs moyennes extraites des graphiques au niveau du pic de crue*

Figure 7

Crue de type 2003 - Comparaison des cotes avec et sans brèches - (configuration2 - configuration 1)



## 7.2. CRUE D'OCTOBRE 1993

Après avoir été calé sur deux crues non débordantes, le modèle réalisé dans le cadre de l'Étude Globale a été testé sur deux crues débordantes :

- crue d'octobre 1993
- crue de janvier 1994

La crue d'octobre 1993 a un débit de pointe à Beaucaire de 9800 m<sup>3</sup>/s. Le niveau marin maximal en aval est de 0.63 m NGF.

Cette crue est débordante et 11 ruptures de digues ont été observées, situées sur le Grand Rhône et le Petit Rhône, en aval de la défluence.

Ces brèches étaient de largeur beaucoup moins importante que celles observées en 2003.

Les résultats sont donnés en **figure 8**.

**Tableau : Estimation de l'impact des brèches pour la crue d'octobre 1993**

Limnigraphes	Impact des brèches en cm (cotes sans brèches – cotes avec brèches)
Beaucaire	0
Canal BRL	5 cm
Arles	10 cm
Grand Boisviel	10 cm
Fourques	10 cm
Saint Gilles	40 cm
Petite Abbaye	10 cm

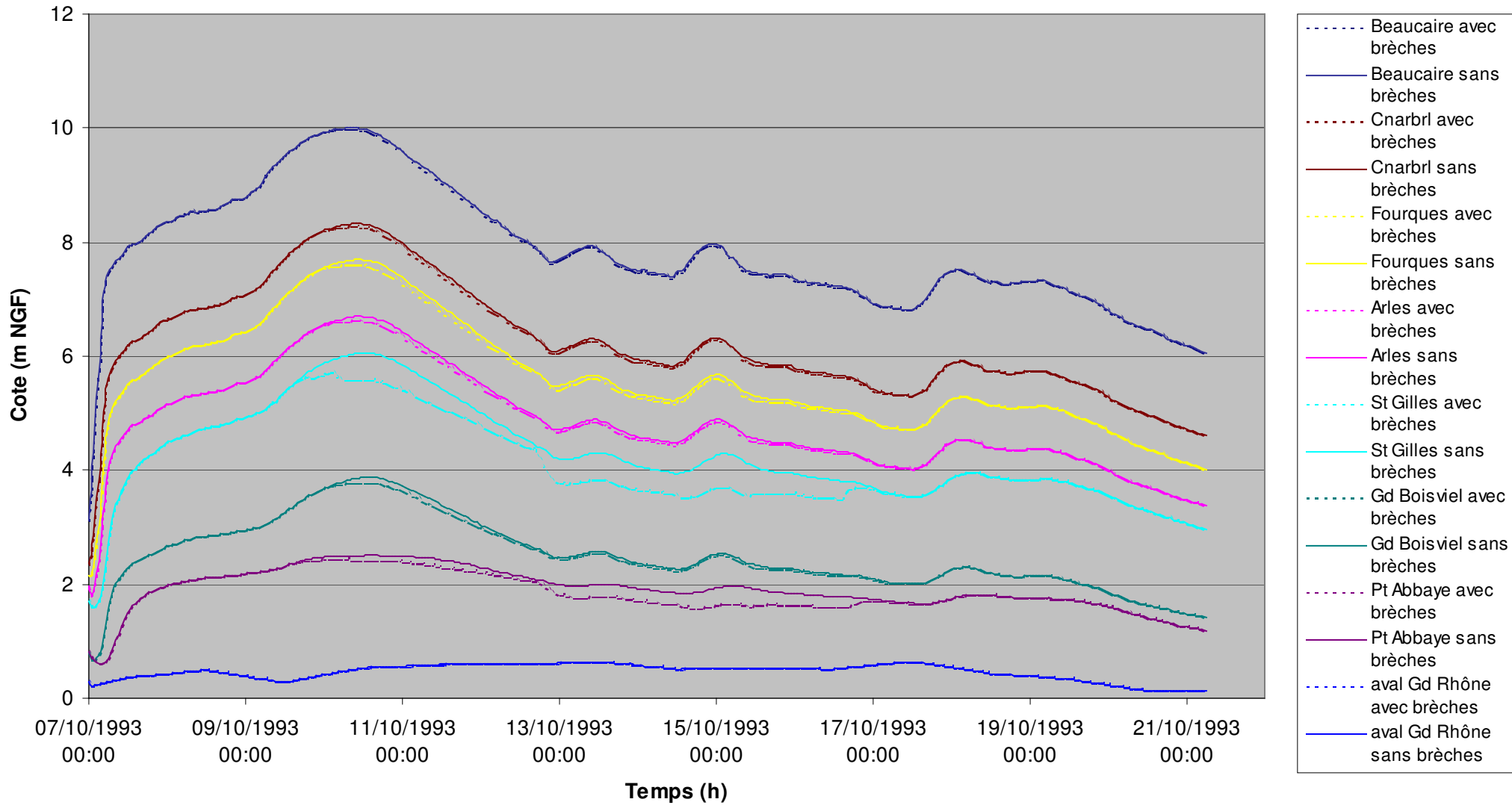
*Les impacts figurant dans ce tableau sont des valeurs moyennes extraites des graphiques au niveau du pic de crue*

Du fait de la localisation diffuse des brèches et de leur petite taille (10 à 20 m en moyenne), les impacts sur le niveau d'eau sont faibles mais homogènes sur le Petit Rhône et le Grand Rhône en aval d'Arles.

La baisse du niveau d'eau est plus importante au droit du limnigraphe de Saint Gilles puisque 3 brèches sont situées à proximité de ce point dont une de 40m de largeur. Deux autres ruptures se sont produites en aval de Saint Gilles et dont l'effet se fait ressentir jusqu'à la station de mesure.

On constate cependant que du fait de l'absence de brèches sur le Rhône amont, les brèches n'ont pas d'impact sur la station de Beaucaire.

**Figure 8**  
**Crue d'octobre 1993 - Comparaison des cotes avec et sans brèches**



### 7.3. CRUE DE JANVIER 1994

Le débit de pointe à Beaucaire de la crue de janvier 1994 est de 11 000 m<sup>3</sup>/s. Le niveau marin maximal en aval est de 0.60 m NGF.

Cette crue est débordante également et 2 brèches ont été constatées en rive gauche du Petit Rhône.

Ces brèches étaient moins larges ( 30 et 80 m) que celles observées en 2003 mais plus importantes que celles de 1993.

Les résultats sont donnés en **figure 9**.

**Tableau : Estimation de l'impact des brèches pour la crue de janvier 1994**

Limnigraphes	Impact des brèches en cm (cotes sans brèches – cotes avec brèches)
Beaucaire	0
Canal BRL	3 cm
Arles	5 cm
Grand Boisviel	0
Fourques	10 cm
Saint Gilles	40 cm
Petite Abbaye	10 cm

*Les impacts figurant dans ce tableau sont des valeurs moyennes extraites des graphiques au niveau du pic de crue*

Les effets des brèches se font essentiellement ressentir sur le Petit Rhône mais pas à Beaucaire.

Les niveaux au limnigraphes de Fourques et d'Arles étant dépendant l'un de l'autre, on a un faible impact à Arles.

**Figure 9**  
**Crue de janvier 1994 - Comparaison des cotes avec et sans brèches**

