

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

CONTRIBUTION CNR



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

Pièce 3

Evaluation de la crue de décembre 2003 – Analyse hydraulique

 © Compagnie Nationale du Rhône 2 rue André Bonin 69316 Lyon cedex 04	☎ 04.72.00.69.69 Web : http://www.cnr.tm.fr DI-EE 05-381 Fax 04.72.10.66.62 Date : juin 2005
---	---

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	3
1.1	LE CONTEXTE ET L'OBJET DU RAPPORT	3
2	PRESENTATION DES MODELES MATHEMATIQUES DU RHONE.....	4
2.1	PRESENTATION DES BIEFS HYDRAULIQUES	4
2.2	PRINCIPES DE MODELISATION	7
2.2.1	<i>Schématisation du lit de la rivière</i>	<i>8</i>
3	METHODOLOGIE	10
3.1	PROPAGATION DE LA CRUE DE VIVIER A BEAUCAIRE – ENCHAÎNEMENT DES MODELES	10
3.2	DEUX SCENARIOS DE SIMULATION	10
4	PROPAGATION DE LA CRUE DE VIVIER A BEAUCAIRE	11
4.1	MODELISATION SANS TENIR COMPTE DES APPORTS DES BASSINS VERSANTS INTERMEDIAIRES.....	11
4.2	MODELISATION DES APPORTS DES BASSINS VERSANTS INTERMEDIAIRES	13
4.2.1	<i>Calcul des apports des bassins versants intermédiaires.....</i>	<i>13</i>
4.3	COHERENCE DES RESULTATS DE CALCUL AVEC LES OBSERVATIONS	16
4.3.1	<i>Analyse des limnigrammes et des laisses de crue</i>	<i>16</i>
4.3.2	<i>Analyse des lignes d'eau</i>	<i>17</i>
4.4	FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DES PLAINES INONDABLES	19
4.4.1	<i>Vieux Rhône de Donzère Mondragon.....</i>	<i>19</i>
4.4.2	<i>Plaine de Codolet et zone industrielle de l'Ardoise.....</i>	<i>19</i>
4.4.3	<i>Plaine de Caderousse.....</i>	<i>20</i>
4.4.4	<i>Plaine de Vallabrègues - Boulbon.....</i>	<i>21</i>
4.4.5	<i>Plaine d'Aramon - Montfrin.....</i>	<i>22</i>
4.5	SENSIBILITE DU MODELE AUX PARAMETRES DE REGLAGE.....	23
5	ANNEXE 1 : PLAN DE SITUATION DES BIEFS HYDRAULIQUES	24
6	ANNEXE 2 : PLAN DE SITUATION DES STATIONS PRINCIPALES DU RHONE.....	25
7	ANNEXE 3 : ETALONNAGE ET VALIDATION DES MODELES	26
7.1	LA MISE A JOUR D'UN MODELE.....	26
	<i>Phase d'étalonnage d'un modèle</i>	<i>26</i>
7.2	PHASE DE VALIDATION DU MODELE.....	26
7.3	ÉTALONNAGE DES MODELES EN RÉGIME PERMANENT	27
7.4	CALAGE DES MODELES EN RÉGIME TRANSITOIRE	28
	<i>Choix des crues.....</i>	<i>28</i>
8	ANNEXE 4 : SIMULATION DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003	29

1 INTRODUCTION

1.1 LE CONTEXTE ET L'OBJET DU RAPPORT

Dans le cadre de la conférence de consensus, l'Etat souhaite disposer d'une estimation du débit maximum instantané au droit de la station de Beaucaire au cours de la crue du Rhône de décembre 2003.

L'objet de ce rapport est de **présenter la démarche d'évaluation des débits de la crue de décembre 2003 par la voie de la modélisation de la propagation de la crue.**

L'étude montre les résultats hydrauliques de la propagation de la crue de Viviers à Beaucaire. Les modèles mathématiques du Rhône, développés à la CNR, ont été enchaînés de l'amont vers l'aval en injectant les hydrogrammes des affluents et les apports des bassins versants intermédiaires.

Les résultats hydrauliques concernent :

- le fonctionnement hydraulique en crue des plaines inondables (débits de mise en eau, débit maximum de surverse, écrêtement de la crue...)
- les comparaisons entre les niveaux observés et les niveaux calculés par les modèles (laisse de crue, limnigrammes, lignes d'eau)
- la sensibilité du modèle aux paramètres de réglage (coefficient de strickler) et aux apports des bassins versants intermédiaires.

2 PRESENTATION DES MODELES MATHEMATIQUES DU RHONE

La Compagnie Nationale du Rhône dispose de modèles mathématiques sur l'ensemble des aménagements du Rhône. Ces modèles ont été utilisés dans le cadre de l'Etude Globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône.

Cette étude a été engagée par l'Etat suite aux crues très importantes de 1993 et 1994.

La Compagnie Nationale du Rhône s'est vu confié le volet modélisation hydraulique du Rhône hors Delta. L'étude a consisté à analyser les conditions d'écoulement et de propagation des crues du Rhône de la frontière Suisse (en amont de la retenue de Génissiat) à la restitution de Beaucaire.

L'architecture des modèles et la qualité de l'étalonnage ont été validés par un comité d'experts de l'administration et des collectivités territoriales.

2.1 PRESENTATION DES BIEFS HYDRAULIQUES

Dix-huit aménagements hydroélectriques ont été réalisés par la C.N.R sur le Rhône. Un aménagement comprend généralement un barrage, une usine hydroélectrique, une écluse sur le Bas-Rhône, une retenue, un canal d'amenée, un Vieux-Rhône et un canal de fuite (figure 1).

PRINCIPE D'AMENAGEMENT DU FLEUVE

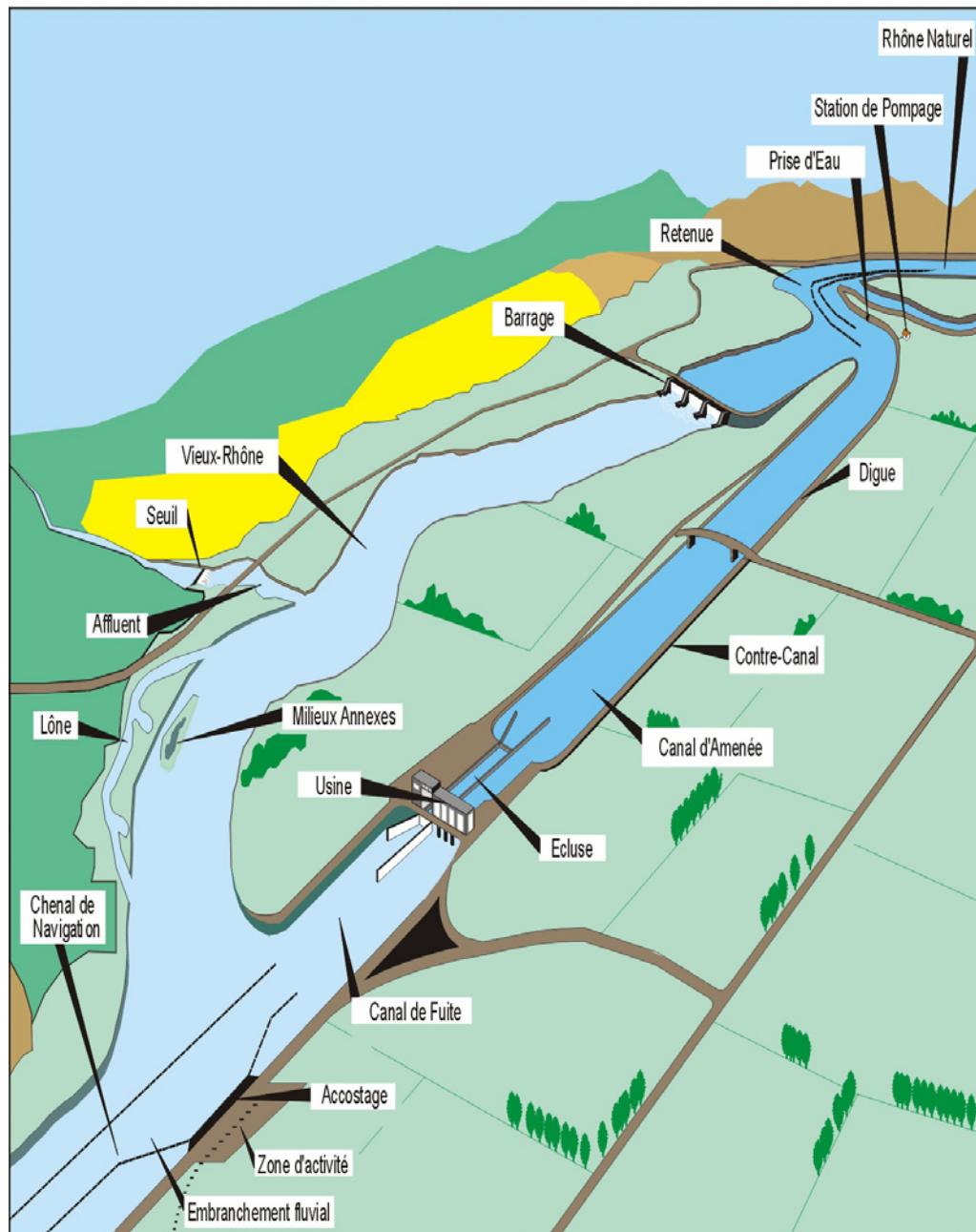


Figure 1 : Schéma d'aménagement du Rhône

D'un point de vue hydraulique, chaque ouvrage provoque une discontinuité dans les écoulements et nécessite une représentation spécifique. Ainsi, le Rhône a été découpé en biefs hydrauliques homogènes.

Chaque bief est limité à l'amont par le barrage et l'usine de l'aménagement amont et, à l'aval, par le barrage et l'usine de l'aménagement étudié. Il comprend en général le

Vieux Rhône et le canal de fuite de l'aménagement amont et la retenue et le canal d'amenée de l'aménagement étudié (figure 2).

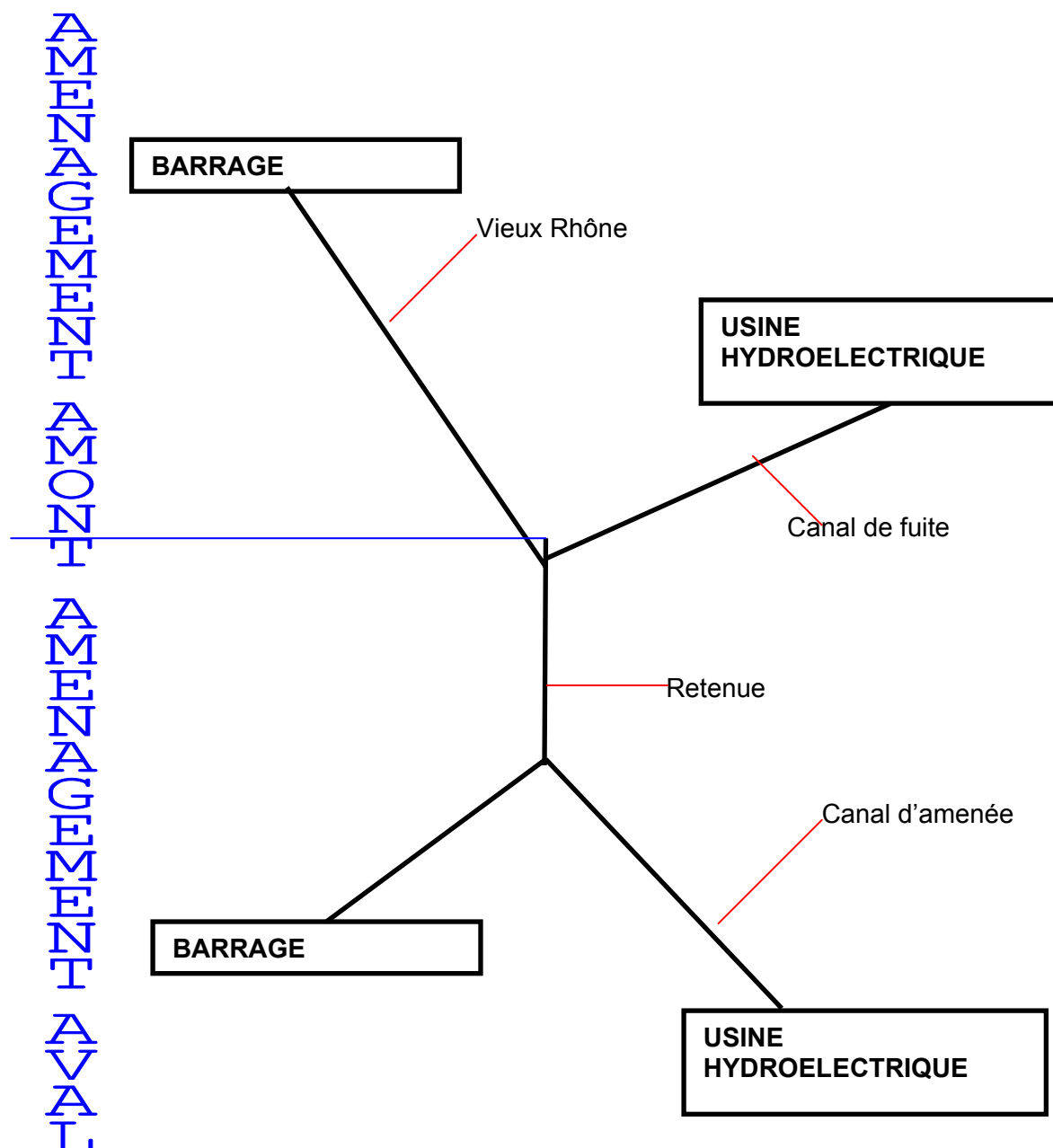


Figure 2 : Schéma d'un bief hydraulique

Les aménagements CNR sont gérés de façon à ne pas aggraver les risques de crues. La gestion de l'aménagement en période normale d'exploitation et en période de crue, est réalisée en appliquant la consigne d'exploitation. Elle fixe les niveaux à respecter dans la retenue en fonction du débit du Rhône et la répartition du débit entre le canal de dérivation et le vieux Rhône.

Un modèle mathématique est construit pour chaque bief hydraulique. L'annexe 1 présente le plan de situation des biefs hydrauliques du Bas Rhône. Les principales stations hydrométriques du Rhône sont indiqués dans l'annexe 2.

2.2 PRINCIPES DE MODELISATION

La modélisation mathématique est effectuée à partir du logiciel « CRUE » développé à la Compagnie Nationale du Rhône. Le modèle, simulant le comportement hydraulique d'une rivière, est basé sur l'intégration numérique des équations de Barré-Saint-Venant appliquées le long de biefs séparés par des profils en travers permettant la meilleure représentation physique du tronçon à modéliser.

Le code de calcul permet de représenter des réseaux ramifiés ou maillés en régime permanent ou transitoire. Il est composé de branches et de casiers reliés entre eux par diverses lois hydrauliques permettant la simulation de situations particulièrement complexes.

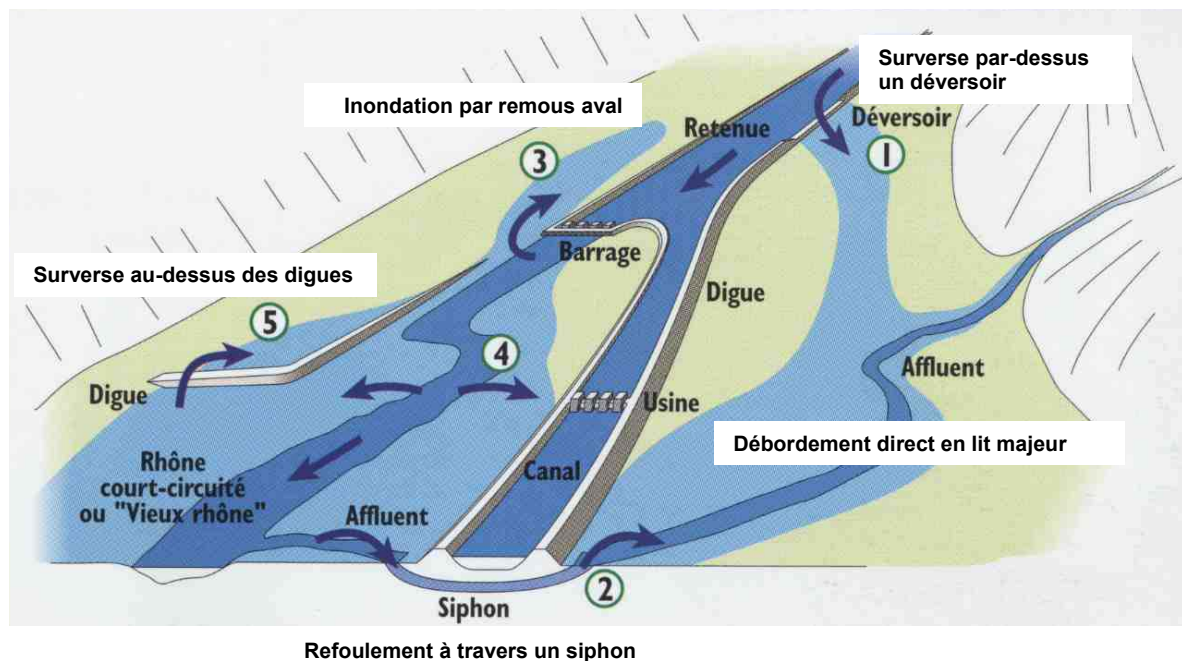


Figure 3 : Le modèle permet de simuler différentes modes de submersion des plaines

Une branche représente une zone de l'écoulement régie par un seul type de loi hydraulique. Concrètement, une branche fluviale modélise un tronçon de rivière sans singularité, composé de plusieurs profils en travers. La simulation de cas particuliers tels que le franchissement d'un seuil, passage d'une vanne, perte de charge localisée..., se fait en utilisant des branches appropriées.

La construction de modèles maillés, constitués de branches fluviales et de casiers, reliés entre eux par diverses lois hydrauliques, permet de modéliser le caractère bidimensionnel des écoulements.

2.2.1 Schématisation du lit de la rivière

Le programme permet de prendre en compte la géométrie complexe du cours d'eau. De manière générale, on distingue :

✎ **les profils en travers** constitués de :

- lit mineur
- lit majeur actif participant à l'écoulement des crues
- zone de stockage représentant le champ d'expansion des crues où les vitesses sont presque nulles. Le remplissage s'effectue le long du lit majeur actif

✎ **les casiers** caractérisés par des vitesses d'écoulement faibles et dont le contour s'appuie sur la topographie naturelle ou sur des obstacles artificiels à l'écoulement des eaux. Le casier est alimenté par des ouvrages identifiés (déversement sur digues ou ouvertures de vannes).

La vue en perspective (figure 4) présente un exemple d'architecture associant les différents lits et casiers. Ces derniers peuvent avoir un comportement hydraulique plus ou moins indépendant du lit principal du fleuve, en fonction des lois de remplissage ou de vidange dictées par les ouvrages de contrôle.

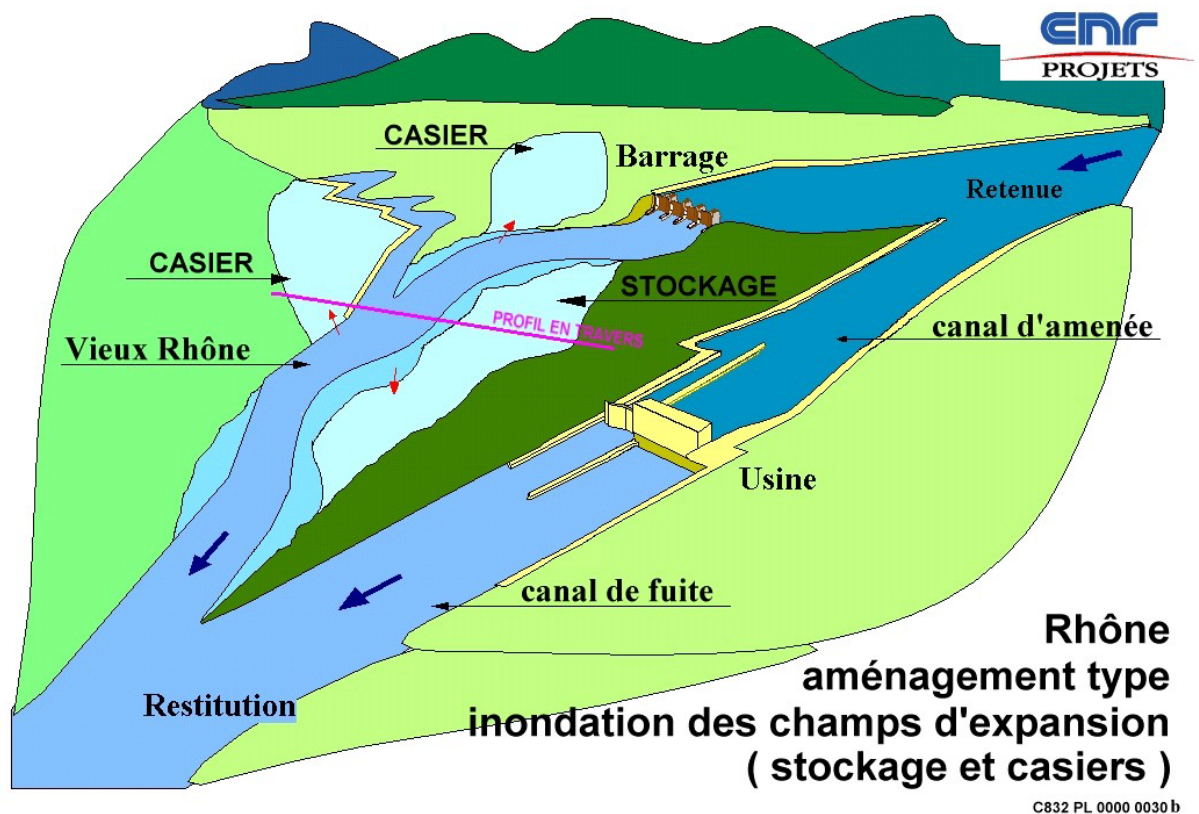


Figure 4 : Schéma d'architecture du modèle mathématique

La figure 5 présente un profil type de rivière composé de lit mineur, de lit majeur actif, de champs de stockage.

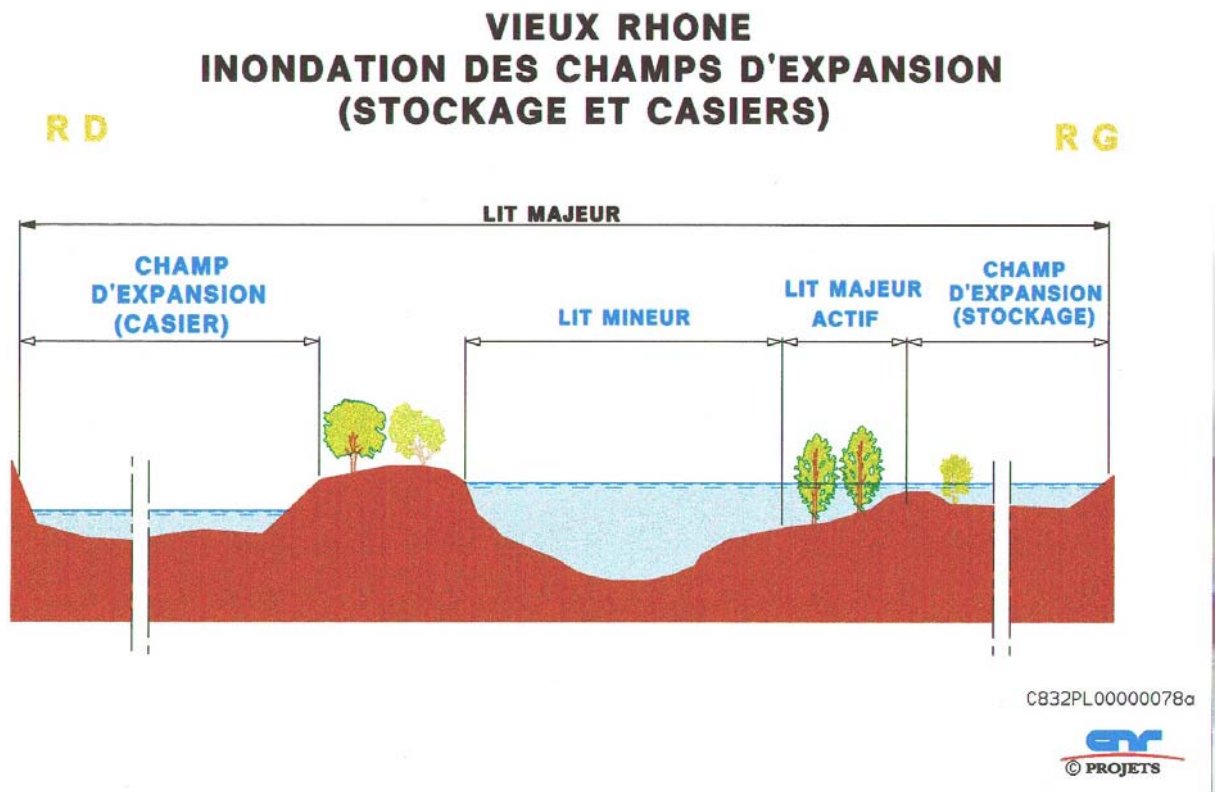


Figure 5 : Profil type de rivière

Diverses liaisons hydrauliques permettent de modéliser les échanges entre les casiers et le lit du fleuve et de casier à casier :

Liaison seuil : Le remplissage du casier se fait par déversement sur un seuil représentant les points bas des berges et des remblais faisant obstacles.

Liaison orifice (vanne, clapet) : Cette liaison permet de simuler l'écoulement à travers des ouvrages de vannage ou d'autres orifices : ponts, siphons, etc.

Liaison strickler : Elle exprime l'écoulement rugueux à surface libre dans le lit des cours d'eau ou des canaux ou l'écoulement en nappe dans la plaine inondable. La loi retenue est la relation de Strickler. Ce type de liaison est souvent utilisé pour relier deux casiers qui ne communiquent pas entre eux par des ouvrages spécifiques.

Les coefficients de rugosité sont introduits sous la forme de coefficients de Strickler, variables éventuellement, pour un profil donné, en fonction de la profondeur d'eau. Ces coefficients prennent en compte la rugosité des lits du cours d'eau ainsi que les obstacles localisés qu'il n'est pas possible de modéliser par des variations des profils en travers. L'étalonnage du modèle consiste à déterminer de façon précise les coefficients de Strickler tant pour le lit mineur que pour le lit majeur.

L'annexe 3 décrit de façon détaillée l'étalonnage des modèles utilisés dans le cadre de l'Etude Globale du Rhône.

3 METHODOLOGIE

La crue de décembre 2003 est propagée de Viviers à Beaucaire en enchaînant les modèles des biefs de Donzère-Mondragon, de Caderousse, d'Avignon et de Vallabrègues (annexe 1 : plan de situation des biefs).

Les niveaux calculés aux différents PK du Rhône sont comparés aux observations.

3.1 PROPAGATION DE LA CRUE DE VIVIER A BEAUCAIRE – ENCHAINEMENT DES MODELES

La démarche consiste à injecter le débit mesuré à la station principale de Viviers dans le modèle du bief de Donzère - Mondragon.

La crue du Rhône est propagée de Viviers au barrage de Donzère en imposant comme condition limite aval le niveau réel enregistré au point de réglage aval situé en amont du barrage de Donzère. Le modèle calcule le débit total au droit du point de réglage et le propage dans le bief suivant, celui de Caderousse, en le répartissant entre l'usine de Bollène et le barrage de Donzère.

Les débits des affluents (l'Ardèche et le Lez) sont également injectés dans le modèle de Caderousse.

Le logiciel propage ensuite l'onde de crue au travers du bief de Caderousse jusqu'au point de réglage aval de la retenue de Caderousse. La propagation est faite en imposant à l'aval le niveau réel enregistré au point de réglage.

La même méthodologie est appliquée sur les biefs d'Avignon et de Vallabrègues et ainsi de suite jusqu'à la station de Beaucaire.

La validation des débits entrant dans chaque aménagement est faite en comparant les niveaux calculés par le logiciel **CRUE** dans chaque bief avec les niveaux observés. Pour cela, on dispose :

- Des limnigraphes (évolution du niveau au fil du temps) au point de réglage situé en queue de retenue (PR1) et d'autres limnigraphes situés le long du bief.
- Des laisses de crue relevées par les Directions Régionales dans les champs d'inondation.
- Des lignes d'eau relevées en barque par les Directions Régionales au droit des échelles limnimétriques qui jalonnent les biefs.

3.2 DEUX SCENARIOS DE SIMULATION

Deux scénarios de propagation de la crue sont simulés :

1. Propagation de la crue du Rhône et des principaux affluents entre Viviers et Beaucaire **sans prendre en compte les apports des bassins versants intermédiaires**,
2. Propagation de la crue du Rhône et des principaux affluents entre Viviers et Beaucaire **en modélisant les apports des bassins versants intermédiaires**.

4 PROPAGATION DE LA CRUE DE VIVIERS A BEAUCAIRE

4.1 MODELISATION SANS TENIR COMPTE DES APPORTS DES BASSINS VERSANTS INTERMEDIAIRES

Dans un premier temps, l'hydrogramme de la crue enregistré à Viviers est propagé sur les biefs aval en n'injectant dans les modèles que les hydrogrammes des affluents principaux du Rhône, disposant d'une station de jaugeage : l'Ardèche, le Lez, la Cèze, l'Aygues, l'Ouvèze, la Durance et le Gardon.

Cette simulation ne prend pas en compte les apports des bassins versants intermédiaires (c'est-à-dire les affluents non jaugés et les bassins versants en aval des stations de jaugeage)

La figure 6 montre les hydrogrammes de crue des affluents. Pour l'**Ardèche**, le débit de pointe à Sauze est de 3 500 m³/s. Dans nos simulations ce débit est revu à la baisse en considérant un débit max de 3 000 m³/s en cohérence avec les analyses de la DIREN.

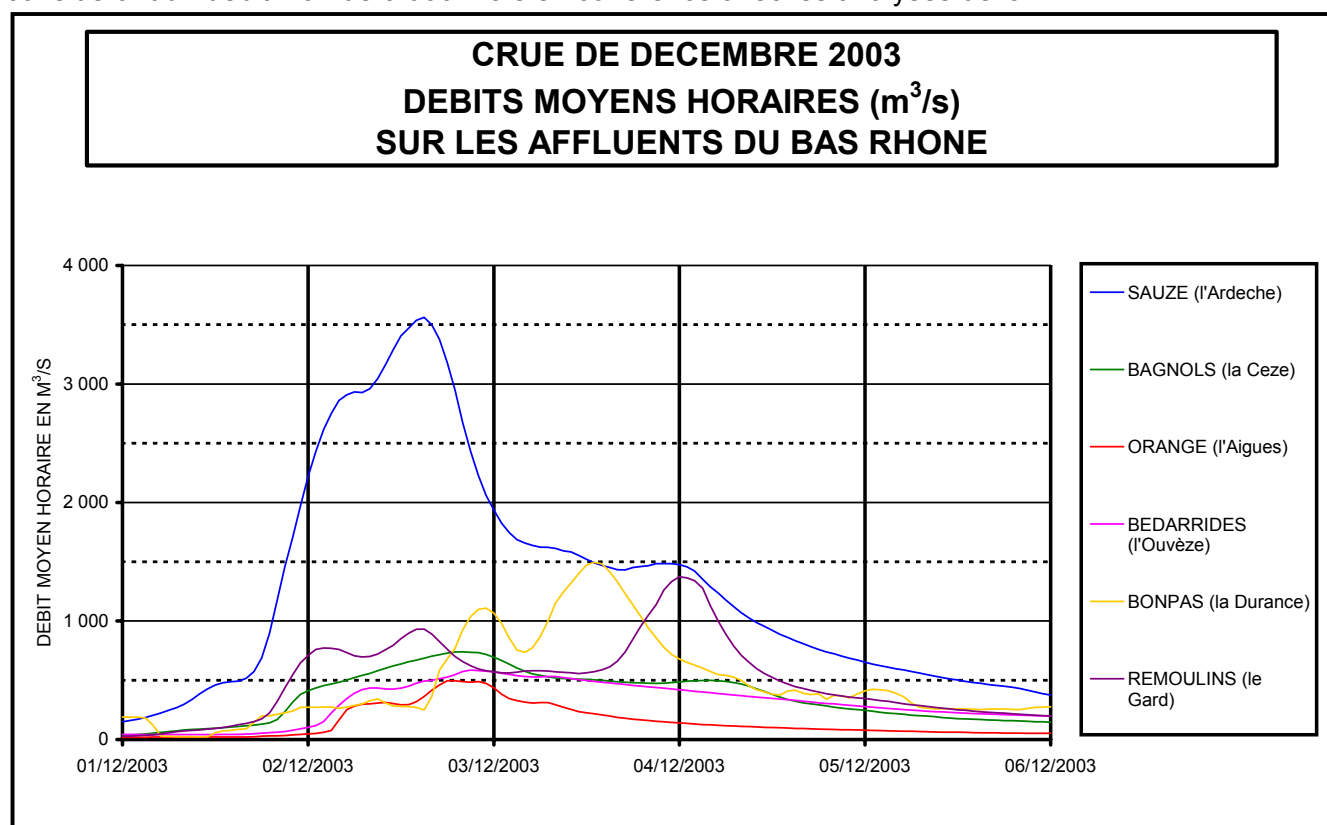


Figure 6 : Hydrogrammes des affluents du Bas-Rhône pendant la crue de décembre 2003

Les hydrogrammes ont été injectés au niveau de la confluence avec le Rhône avec un décalage temporel entre la station de mesure et la confluence de :

- 3 heures pour l'Ardèche ;
- 3 heures pour le Lez ;
- 3 heures pour la Cèze ;
- 2 heures pour l'Aygues ;
- 2 heures pour l'Ouvèze ;
- 4 heures pour le Gardon

Pour la **Durance**, le débit de pointe de l'hydrogramme à Bonpas a été de 1 500 m³/s. Dans le modèle, la Durance est injecté au niveau de la confluence avec le Rhône avec un débit de pointe réduit à 1 200 m³/s pour tenir compte d'un éventuel écrêtement de la crue entre Bonpas et la confluence. En effet, la station de Bonpas est située à 15 km de la confluence et la Durance comporte à cet endroit des lits à tresses avec une végétation relativement dense qui justifierait cet écrêtement.

La figure 7 montre les hydrogrammes calculés par le modèle entre Viviers et Beaucaire.

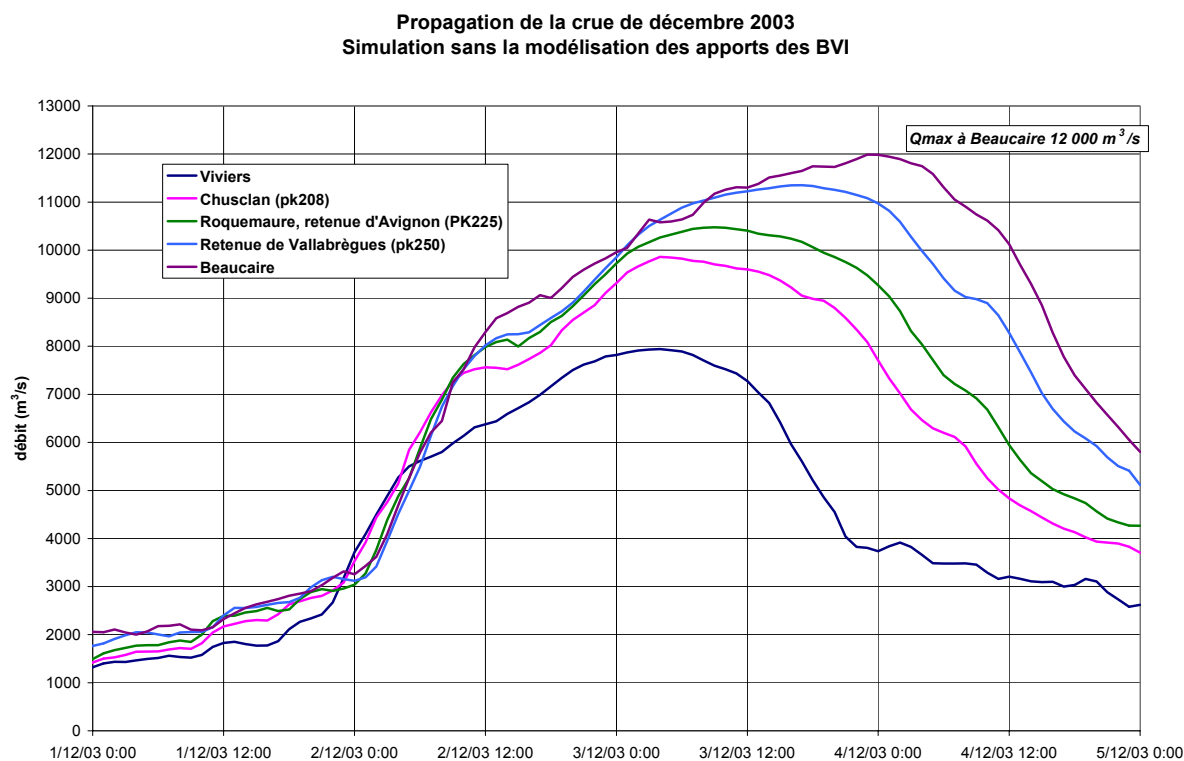


Figure 7 : Hydrogrammes de la crue de décembre 2003 aux différents PK du Rhône. Simulation sans la modélisation des apports des bassins versants intermédiaires.

Les débits de pointe de la crue, évalués par le modèle mathématique, sont les suivants :

Simulation entre Viviers et Beaucaire sans prendre en compte les apports des bassins versants intermédiaires	
Station, retenue	Débit maximum
Viviers (retenue de Donzère)	7 950 m ³ /s (mesuré)
Chusclan (retenue de Caderousse)	9 850 m ³ /s (calculé)
Roquemaure (retenue d'Avignon)	10 500 m ³ /s (calculé)
Retenue de Vallabrègues (en aval de la Durance)	11 350 m ³ /s (calculé)
Beaucaire	12 000 m ³ /s (calculé)

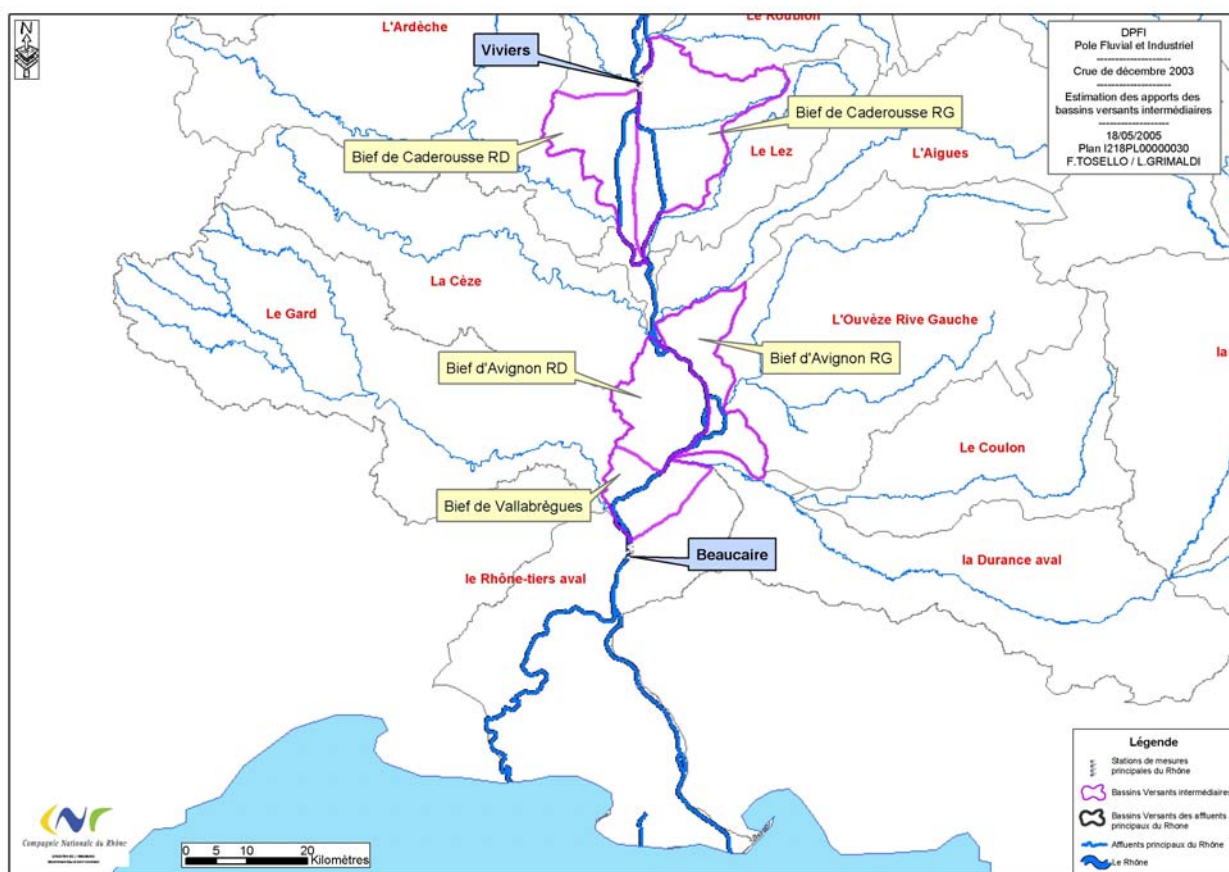
La propagation de la crue du Rhône et de ses principaux affluents depuis Viviers conduit à un débit de pointe à Beaucaire de 12 000 m³/s. Cette simulation ne prend pas en compte les apports des bassins versants intermédiaires non contrôlés par une station de mesure.

4.2 MODELISATION DES APPORTS DES BASSINS VERSANTS INTERMEDIAIRES

4.2.1 Calcul des apports des bassins versants intermédiaires

Le calcul des apports des bassins versants intermédiaires entre Viviers et Beaucaire est réalisé à partir des lames d'eau précipitées calculées par Météo France dans le cadre d'une étude qui leur a été confiée par la CNR (« Fortes précipitations de DECEMBRE 2003 et conséquences sur les bassins du Rhône » - Météo-France Centre-Est Division Développement-Etudes-Climatologie»). Il s'agit de lames d'eau précipitées cumulées sur 6h et calculées sur l'ensemble des sous-bassins du Rhône, y compris les bassins versants intermédiaires. Pour cela Météo France a exploité les postes pluviométriques sur l'ensemble du bassin du Rhône.

Pour le secteur situé entre Viviers et Beaucaire, on distingue 2 bassins versants intermédiaires sur le Bief de Caderousse, 2 bassins sur le Bief d'Avignon et 1 bassin sur le bief de Vallabrègues (cf carte ci-après).



Les hydrogrammes issus de ces bassins versants intermédiaires sont déterminés en appliquant :

- un coefficient d'écoulement estimé à partir des valeurs calculées sur les bassins versants jaugés proches,
- un décalage temporel entre les précipitations et les écoulements les plus réalistes possible par rapport aux décalages observés sur les bassins versants jaugés proches.

Le tableau ci-après récapitule les hypothèses utilisées pour l'estimation des hydrogrammes des bassins versants intermédiaires.

Bassin versant Intermédiaire	Surface (km²)	Coefficient d'écoulement
Bief de Caderousse RG	260	0.70
Bief de Caderousse RD	420	0.40
Bief d'Avignon RG	200	0.50
Bief d'Avignon RD	220	0.50
Bief de Vallabrègues	160	0.50

Les apports des bassins versants intermédiaires sont introduits :

- soit sous forme de « **ruissellement** » le long du Rhône (vieux Rhône de Donzère, bras d'Avignon, bras de Villeneuve, vieux Rhône de Vallabrègues),
- soit sous forme d'injection d'un débit dans le Rhône (apports du BVI de Caderousse rive gauche, apports du BVI d'Avignon rive droite).

Les débits de pointe des apports des BVI simulés, sont les suivants :

- ↳ Le débit maximal des apports du BVI de Caderousse rive droite (vieux Rhône de Donzère) est de 320 m³/s (débit injecté sous forme de ruissellement tout au long du vieux Rhône)
- ↳ Le débit maximal des apports du BVI de Caderousse rive gauche est de 350 m³/s (débit injecté au droit de la confluence du Lez avec le Rhône)
- ↳ Le débit maximal des apports du BVI d'Avignon en rive droite est de 250 m³/s (débit injecté au droit de la confluence de la Cèze avec le Rhône)
- ↳ Le débit maximal des apports du BVI de Vallabrègues en rive droite est de 190 m³/s (débit injecté sous forme de ruissellement le long des bras de Villeneuve et d'Avignon et dans le vieux Rhône de Vallabrègues)

La figure 8 montre la propagation de la crue de Viviers à Beaucaire en modélisant les apports des bassins versants intermédiaires.

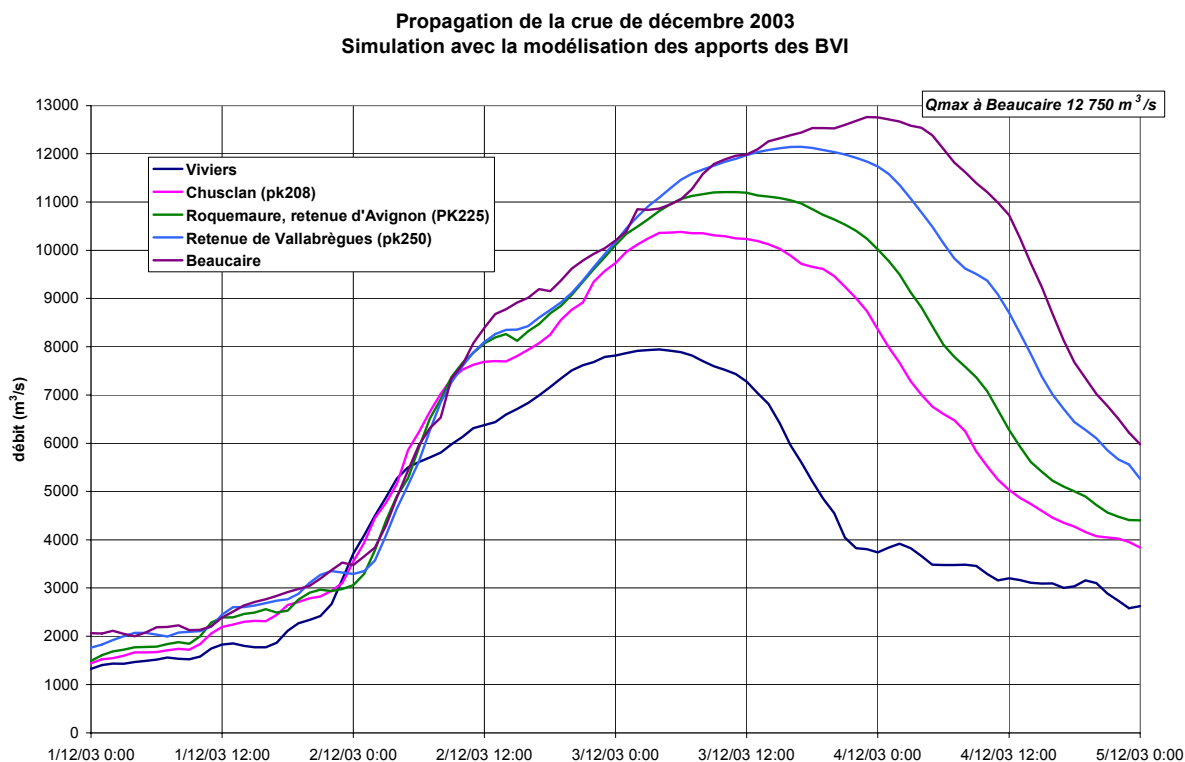


Figure 8 : Hydrogrammes de la crue de décembre 2003 aux différents PK du Rhône. Simulation en modélisant les apports des bassins versants intermédiaires.

Les débits de pointe de la crue, évalués par le modèle mathématique, sont les suivants :

Simulation entre Viviers et Beaucaire en modélisant les apports des bassins versants intermédiaires	
Station, retenue	Débit maximum
Viviers (retenue de Donzère)	7 950 m ³ /s (mesuré)
Chusclan (retenue de Caderousse)	10 350 m ³ /s (calculé)
Roquemaure (retenue d'Avignon)	11 200 m ³ /s (calculé)
Retenue de Vallabrègues (en aval de la Durance)	12 150 m ³ /s (calculé)
Beaucaire	12 750 m ³ /s (calculé)

La propagation de la crue du Rhône et de ses affluents principaux depuis Viviers, en tenant compte des apports des bassins versants intermédiaires entre Viviers et Beaucaire, conduit à un débit de pointe à Beaucaire de 12 750 m³/s.

4.3 COHERENCE DES RESULTATS DE CALCUL AVEC LES OBSERVATIONS

4.3.1 Analyse des limnigrammes et des laisses de crue

Il s'agit de comparer les niveaux calculés par le modèle avec les niveaux observés le long du Rhône. Des limnigraphes, situés le long des biefs, enregistrent l'évolution du niveau au cours du temps. On dispose également des niveaux aux points de réglage des retenues de Caderousse, de Vallabrègues et d'Avignon. Pour chaque retenue, il y a deux points de réglage. Les simulations ont été effectuées en imposant le niveau au point de réglage aval, le plus près du barrage ; le niveau enregistré au point de réglage amont est ainsi comparé avec le niveau calculé par le modèle.

Les niveaux calculés par le modèle pour les deux scénarios de simulation (avec et sans prise en compte des apports des BVI) sont confrontés aux observations (annexe 4) au droit de :

1. Saint Montant (vieux Rhône de Donzère Mondragon, PK 173.2)
2. Bourg Saint Andéol (vieux Rhône de Donzère Mondragon, PK 180.1)
3. Pont Saint Esprit (vieux Rhône de Donzère Mondragon, PK 192.1)
4. Mondragon (restitution du canal de fuite de l'usine de Bollène, PK 200.5)
5. Saint Etienne des Sorts (point de réglage de la retenue de Caderousse, PK 204)
6. En aval du barrage de Caderousse
7. Point de réglage de la retenue d'Avignon, en amont du viaduc de Roquemaure
8. Point de réglage de la retenue de Vallabrègues situé au droit du Pont Daladier, PK242.2
9. Viaduc des Angles situé en amont de la confluence de la Durance, PK 244
10. En aval du barrage de Vallabrègues au PK 262.8
11. Pont de Beaucaire dans le vieux Rhône de Vallabrègues au PK 2676.7

Convention pour les graphiques

Sur les graphiques présentés en annexe 4, sont distinguées les valeurs observées (niveaux) des valeurs calculées. Les **valeurs observées** apparaissent avec des **symboles carrés**. Les **valeurs calculées** sont tracées avec des **courbes sans symboles**.

L'analyse des résultats de simulation montre que :

- 1) Les niveaux observés dans le **vieux Rhône de Donzère** (à Saint Montan, à Bourg Saint Andéol, à Pont Saint Esprit) sont correctement reproduits par le modèle. Les écarts moyens entre les calculs et les observations sont de l'ordre de 15 cm.
- 2) Dans la **retenue de Caderousse**, le modèle sous estime les observations. Ainsi à Saint Etienne des Sorts, les niveaux calculés sont 20 cm plus bas pour la simulation prenant en compte les apports des BVI ($Q_{\max}$ à Chusclan = 10 400 m³/s) ; les écarts sont plus importants (- 40 cm) pour la simulation sans les apports intermédiaires ($Q_{\max}$ à Chusclan = 9 850 m³/s).
- 3) On retrouve la même tendance dans le **bief d'Avignon** où la simulation des apports des BVI permet de mieux reproduire les niveaux observés en aval du barrage de Caderousse et au point de réglage de la retenue d'Avignon au PK 221,6. Sans les apports intermédiaires, les observations sont sous estimées de 50 cm.

- 4) Dans le **bief de Vallabrègues** (pont de Daladier à Avignon, viaduc des Angles, en aval des barrages de Villeneuve et de Sauveterre), les niveaux calculés sont cohérents avec les limnigrammes enregistrés. Les observations se situent généralement entre les niveaux calculés par les deux scénarios de simulation (avec et sans apports intermédiaires).

La comparaison entre les niveaux calculés dans les champs d'inondation modélisés par des casiers et les laisses de crue est présentée dans le tableau ci-après.

Secteur	Ecart moyen
Vieux Rhône de Donzère	30 cm
Plaine de Caderousse	20 cm
Plaine de Codolet, Ardoise	24 cm
Ile de la Barthelasse, Bras d'Avignon et de Villeneuve	21 cm
Plaine de Boulbon Vallabrègues	22 cm
Plaine de Montfrin Aramon	20 cm

Les écarts sont globalement satisfaisants.

4.3.2 Analyse des lignes d'eau

Lors de la crue, la CNR a relevé par descente en barque, les lignes d'eau au droit des échelles limnimétriques qui jalonnent les biefs.

☞ Une ligne d'eau a été levée par la Direction Régionale d'Avignon le 2 décembre dans le **vieux Rhône de Caderousse et dans la retenue d'Avignon**. Les niveaux calculés par le modèle mathématique, le long du bief, au moment de la levée de la ligne d'eau, sont comparés à ceux observés.

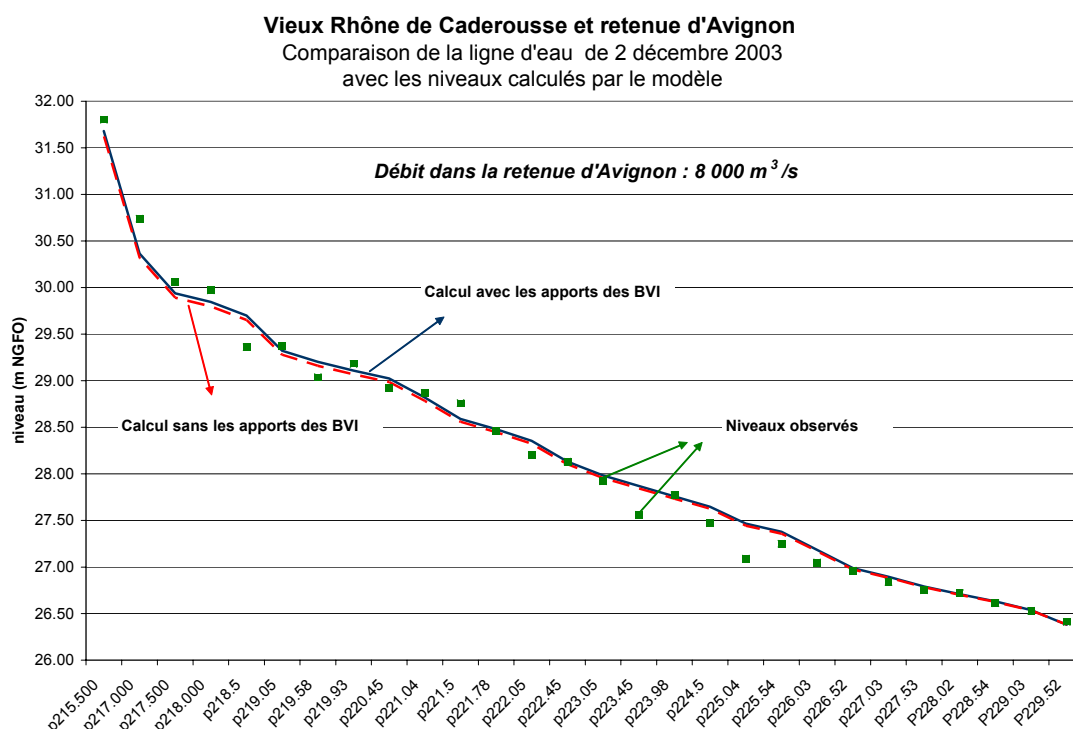


Figure 9 : Ligne d'eau levée le 2 décembre 2003. Comparaison des observations avec les niveaux calculés par le modèle.

On constate que les lignes d'eau calculées par le modèle mathématique passent au milieu des niveaux observés. Les résultats du modèle sont cohérents avec les niveaux observés. Cette ligne d'eau correspond à un débit du Rhône dans la retenue d'Avignon de 8 000 m³/s.

↳ Une autre ligne d'eau est levée **dans la retenue de Vallabrègues**. La figure 10 présente la comparaison des observations avec les niveaux calculés par le modèle au moment de la levée de la ligne d'eau.

Les résultats de calcul sont globalement satisfaisants et permettent d'évaluer le débit du Rhône au moment de la levée de la ligne d'eau.

Dans la retenue de Vallabrègues, la simulation sans prendre en compte les apports des bassins versants intermédiaires, conduit à un débit du Rhône en amont du Gardon de 11 400 m³/s (au moment de la levée de la ligne d'eau). Pour ce débit, les niveaux calculés dans la retenue, se situent en dessous des observations. Les écarts sont de l'ordre de 20 cm. La ligne d'eau, simulée en prenant en compte les apports intermédiaires, s'accorde mieux aux observations. Le calcul donne un débit du Rhône en amont de la confluence du Gardon de 12 200 m³/s.

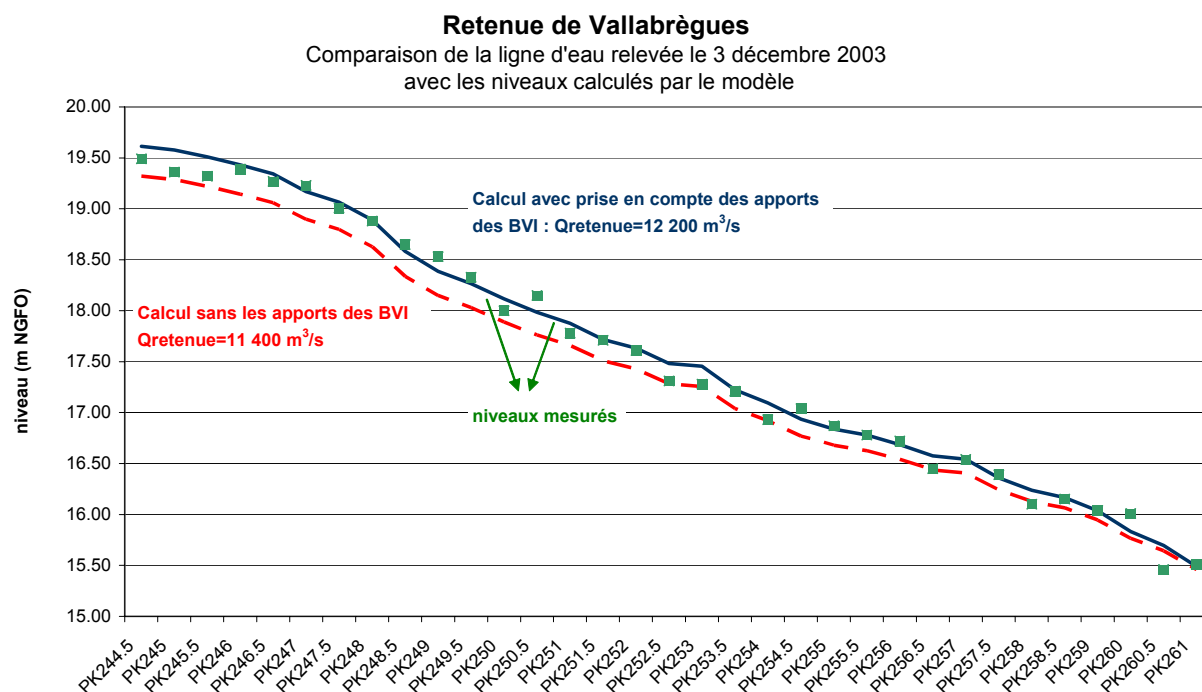


Figure 10 : Ligne d'eau levée le 3 décembre 2003 dans la retenue de Vallabrègues. Comparaison des observations avec les niveaux calculés par le modèle.

4.4 FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DES PLAINES INONDABLES

4.4.1 Vieux Rhône de Donzère Mondragon

La plaine située le long du Vieux Rhône de Donzère à Mondragon est la plaine de submersion la plus importante du Rhône à l'aval de Lyon. Elle est protégée par tout un système de digues anciennes situées soit le long du Rhône, soit transversalement.

La plaine commence à être inondée pour des débits du Rhône à Donzère proche de 5 000 m³/s. La plaine est inondable par débordement naturel et surverse au dessus des digues syndicales submersibles.

Le volume maximum stocké lors de la crue de décembre 2003 est **de 92 Millions de m³**. La surface inondée couvre **environ 6 000 ha**.

4.4.2 Plaine de Codolet et zone industrielle de l'Ardoise

La plaine de Codolet, protégée des inondations directes du Rhône par l'endiguement insubmersible de la retenue de Caderousse, reste inondable par remous aval du Rhône dans la Cèze. La mise en eau de la plaine de Codolet commence pour un débit du Rhône à Roquemaure de 6 700 m³/s.

La zone industrielle de l'Ardoise est inondable à partir d'un débit du Rhône à Roquemaure d'environ 8 300 m³/s.

Le volume maximum stocké lors de la crue de décembre 2003 est **de 10.7 Millions de m³** couvrant une surface inondée de **667 ha**.

4.4.3 Plaine de Caderousse

La plaine de Caderousse est inondée par déversement au dessus des deux déversoirs situés à l'extrémité aval de la plaine. La figure 11 illustre le processus de remplissage de la plaine : l'évolution du niveau du Rhône au droit des déversoirs, le niveau de submersion de la plaine et le débit au dessus des déversoirs (les débits entrant dans la plaine sont positifs et l'écoulement de la plaine vers le Rhône correspond à des débits négatifs). Les deux déversoirs débitent jusqu'à 450 m³/s avant l'arrivée de la pointe de la crue. Au maximum de la crue, le débit déversé dans la plaine est faible : 20 m³/s. La plaine est inondable à partir d'un débit du Rhône à Roquemaure de 7 000 m³/s.

Le volume maximum stocké est **de 27 Millions de m³** couvrant une surface inondée de **1 790 ha**.

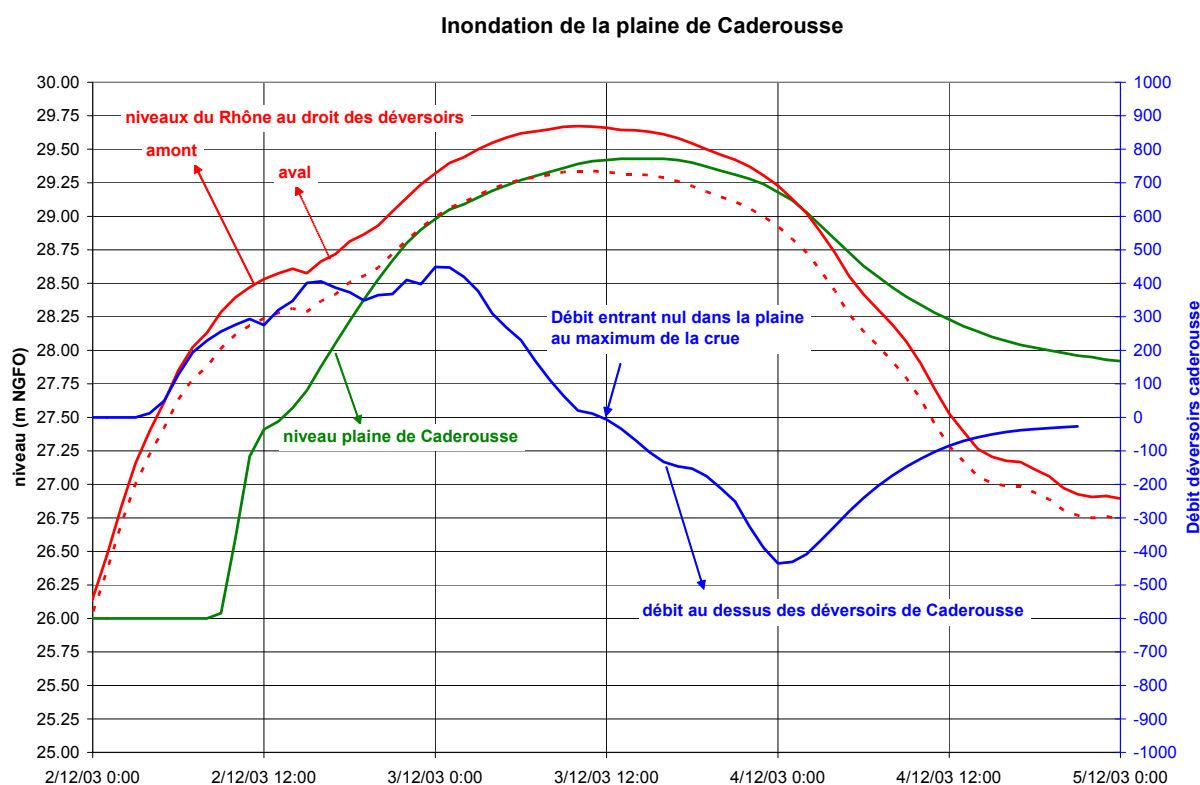


Figure 11 : Processus d'inondation de la plaine de Caderousse

4.4.4 Plaine de Vallabrègues - Boulbon

La plaine de Vallabrègues – Boulbon est inondée par l'aval moyennant le déversoir de Tarascon. Elle est inondée à partir d'un débit du Rhône de 9 800 m³/s (fréquence trentennale environ).

La figure 12 illustre le processus d'inondation de la plaine.

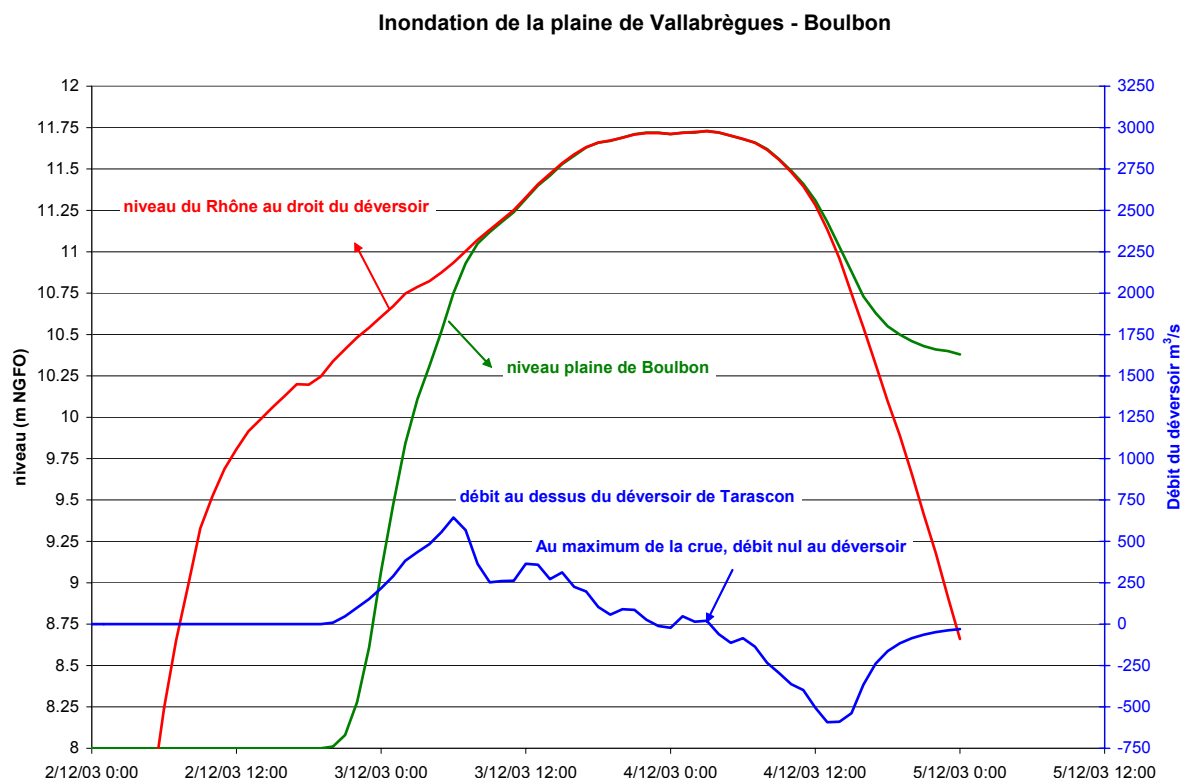


Figure 12 : Processus d'inondation de la plaine de Caderousse

Le déversoir débite jusqu'à 640 m³/s avant l'arrivée de la pointe de la crue.

Au maximum de la crue, le niveau d'inondation de la plaine atteint le niveau du Rhône au droit du déversoir ce qui se traduit par un débit nul au dessus du déversoir de Tarascon.

Le volume maximum stocké est **de 24 Millions de m³** couvrant une surface inondée de **1 770 ha**.

4.4.5 Plaine d'Aramon - Montfrin

La plaine est inondée par remous aval du Rhône dans le Gardon. La figure 13 montre l'évolution du niveau d'inondation de la plaine et des débits du Gardon et du Rhône à Beaucaire.

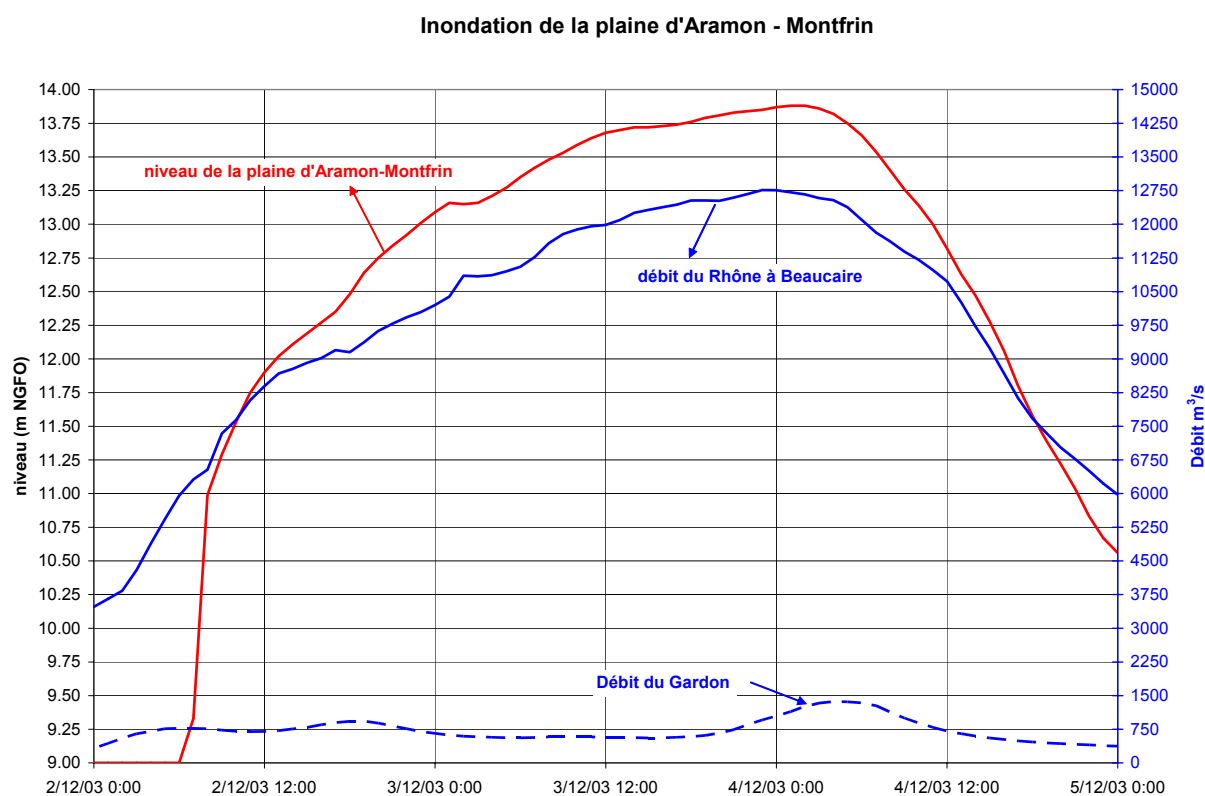


Figure 13 : Processus d'inondation de la plaine d'Aramon - Montfrin

Le volume maximum stocké dans la plaine, au maximum de la crue, est de **22,7 Millions de m³** couvrant une surface inondée de **1 180 ha**.

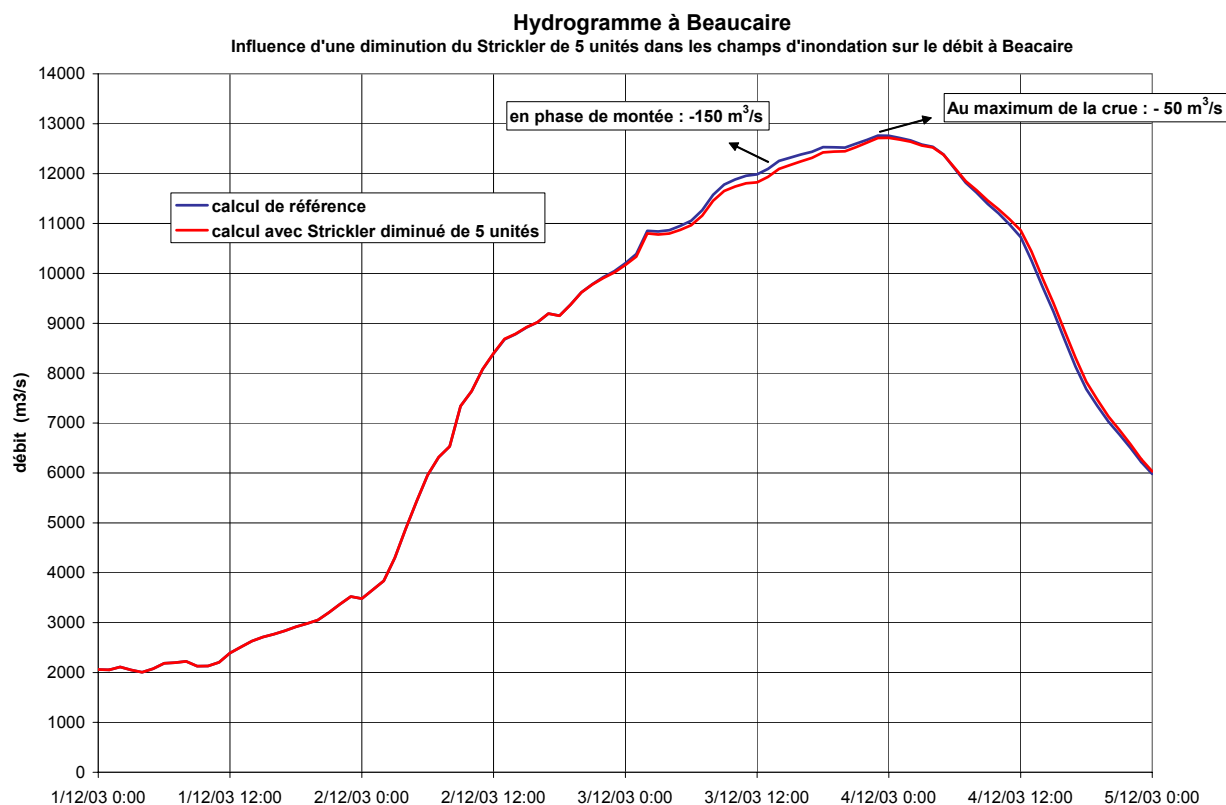
4.5 SENSIBILITE DU MODELE AUX PARAMETRES DE REGLAGE

L'étalonnage du modèle mathématique consiste à déterminer de façon précise les coefficients de Strickler qu doivent être conformes aux règles de l'art. La qualité de l'étalonnage est jugée par comparaison des écarts entre les valeurs observées et calculées.

Compte tenu du niveau exceptionnel de la crue de décembre 2003, une étude de sensibilité du modèle aux paramètres de réglage, est réalisée. Le test consiste à évaluer l'impact d'une diminution du coefficient de Strickler sur la propagation de la crue. La rugosité des plaines inondables, situées entre Donzère et Beaucaire, est diminuée de 5 unités.

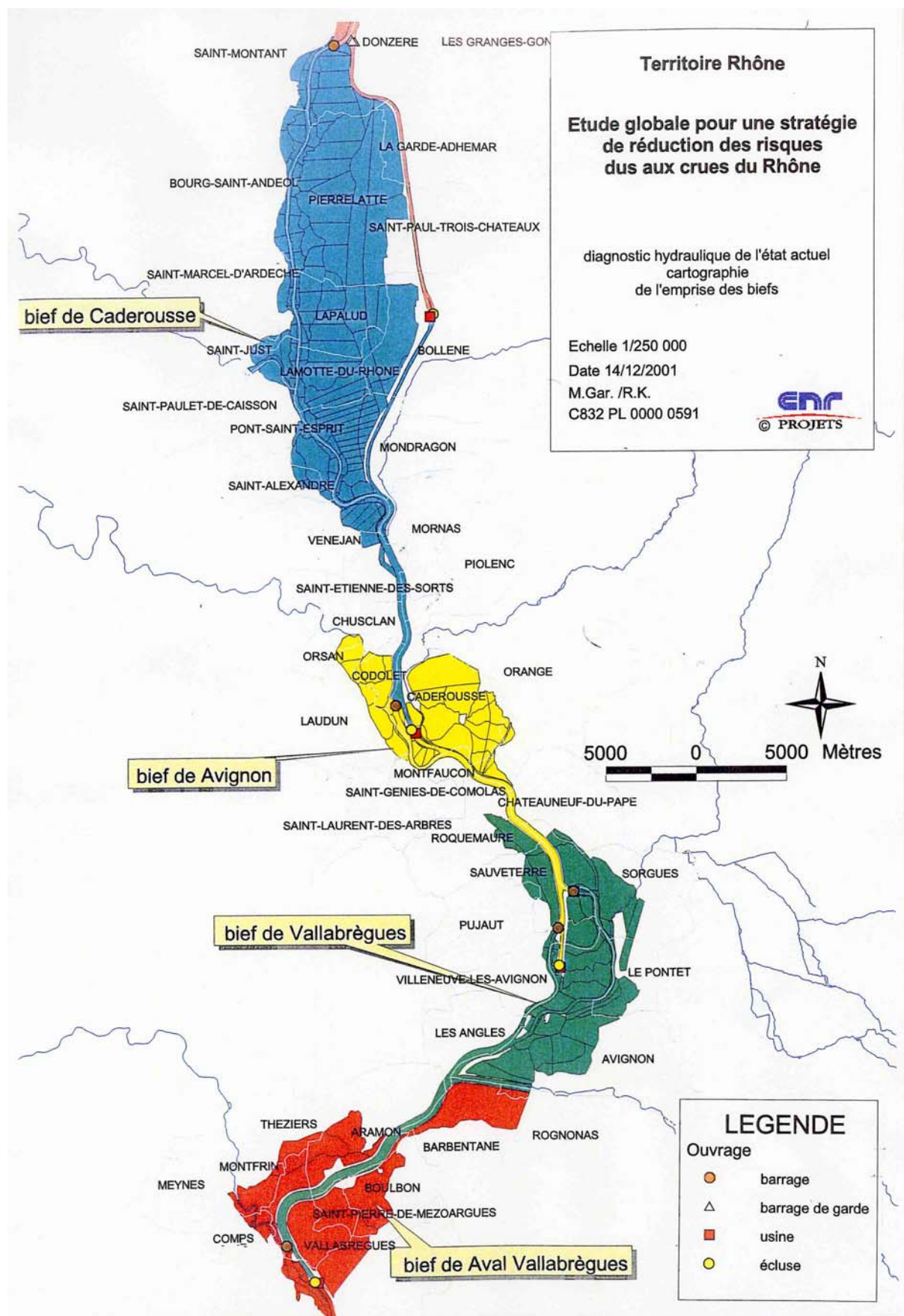
La figure 16 présente l'hydrogramme de la crue de décembre 2003 à Beaucaire obtenu avec le modèle de référence et l'hydrogramme calculé par le modèle modifié.

On note que le débit de pointe n'est réduit que de 50 m³/s alors qu'en phase de montée de la crue, la diminution est de 150 m³/s.

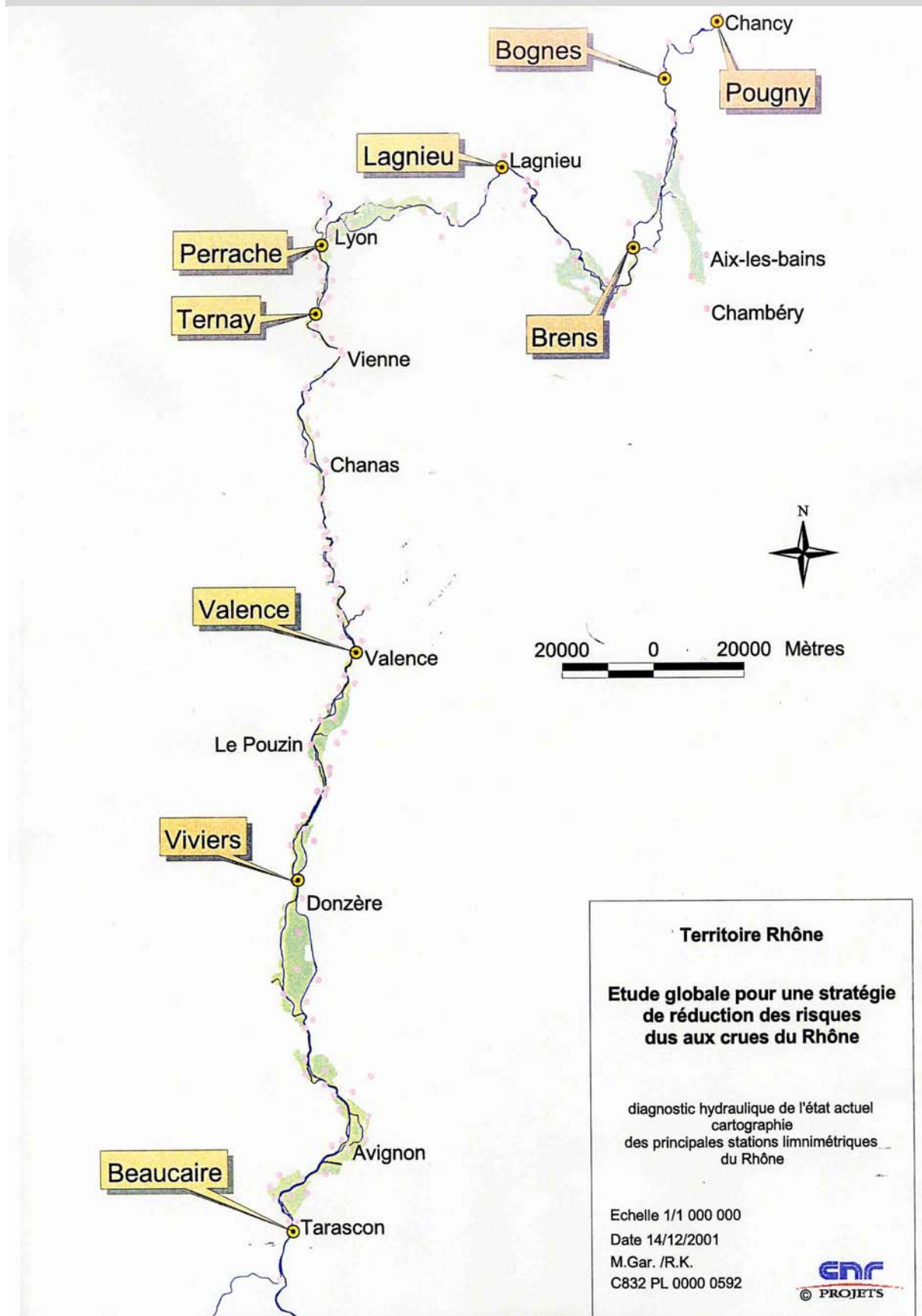


Ce test montre que la modification de la rugosité du modèle n'a pas un effet significatif sur le débit de pointe calculé de la crue à Beaucaire.

5 ANNEXE 1 : PLAN DE SITUATION DES BIEFS HYDRAULIQUES



6 ANNEXE 2 : PLAN DE SITUATION DES STATIONS PRINCIPALES



7 ANNEXE 3 : ETALONNAGE ET VALIDATION DES MODELES

7.1 LA MISE A JOUR D'UN MODELE

Des campagnes de levés bathymétriques sont réalisées par la CNR sur l'ensemble des tronçon et bras du Rhône selon un programme pluriannuel ou suite à des crues importantes (fréquence supérieure à la décennale).

Une analyse bathymétrique visant à estimer l'évolution des fonds par rapport aux campagnes précédentes et en particulier par rapport à une campagne de référence, est faite bief par bief.

Un modèle est mis à jour si l'évolution morphologique du lit entre les deux campagnes n et $n-1$ est significative ou si la campagne bathymétrique intégrée dans le modèle date de plus de 10 ans.

La mise à jour consiste à remplacer tous les profils en travers du modèle par ceux levés lors de la dernière campagne. Le nouveau modèle est validé, selon les deux phases explicitées ci-après.

Phase d'étalonnage d'un modèle

L'objectif de cette phase est de retrouver par le modèle mathématique des grandeurs observées, c'est-à-dire les couples (niveaux, débits) en différents points du fleuve qui ont été retenues pour cette phase.

L'étalonnage du modèle mathématique consiste à déterminer de façon précise les coefficients de Strickler appliqués aux différents profils en travers qui représentent le lit du fleuve. Ces coefficients prennent en compte la rugosité des lits du cours d'eau ainsi que les obstacles localisés qu'il n'est pas possible de modéliser par des variations des profils en travers. Les valeurs de ces coefficients doivent être conformes aux règles de l'art. La qualité de l'étalonnage est jugée par comparaison des écarts entre les valeurs observées et calculées et par des tests de la sensibilité du modèle à une variation des débits entrants dans le bief.

7.2 PHASE DE VALIDATION DU MODELE

La phase de validation consiste à vérifier que le modèle étalonné est représentatif des écoulements de crues. Des crues différentes de celles utilisées pour l'étalonnage sont simulées et les résultats des calculs sont comparés aux observations. Le but est de s'assurer que le modèle est capable de reproduire l'événement simulé.

Il s'agit de comparer lors de cette étape, les enregistrements limnimétriques, les hydrogrammes ainsi que les laisses de crue observées avec les résultats des simulations réalisées dans les mêmes conditions aux limites.

Une fois validé, le modèle permet de simuler la propagation de différents types de crues et déterminer les paramètres d'écoulements au droit de toutes les sections en travers du fleuve. Sauf cas de modifications importantes de la topologie, il n'est pas nécessaire de refaire l'étalonnage du modèle ainsi validé.

7.3 ETALONNAGE DES MODELES EN REGIME PERMANENT

L'étalonnage est effectué en s'appuyant sur des lignes d'eau relevées par descente en barque.

Le tableau ci-après résume les fourchettes de débits utilisés pour le calage des modèles hydrauliques du Rhône.

bief	Nbre de crues utilisées	Débit min (m3/s)	Débit max (m3/s)	Débit moyen annuel ¹ (m3/s)	Q 2ans ¹ (m3/s)	Q 10 ans ¹ (m3/s)
Donzère-Mondragon	8	1250	5580	1494	4480	6100
RCC de Donzère	4	480	7755	1494	44480	6100
Retenue de Caderousse	7	650	6278	1494	4480	6100
Avignon	9	650	6278	1494	4480	6100
Vallabrègues	6	1721	10680	1705	6060	8400

¹ valeur approchée à la station hydrométrique la plus proche

Le calage est réalisé bief par bief pour les débits estimés lors des observations.

L'analyse des écarts entre cotes calculées par le modèle et cotes observées montrent que près de **90% des valeurs s'inscrivent dans la fourchette d'écarts à ± 15 cm.**

Les écarts observés sont du même ordre que les incertitudes dZ liées à l'erreur estimée sur les débits. Cette erreur résulte de l'incertitude des mesures effectuées aux stations hydrométriques et la variation du débit durant la période de relevé des lignes d'eau.

Le calage effectué en permanent est testé par la suite en dynamique, ceci en vue d'étudier le comportement du modèle en régime transitoire.

7.4 CALAGE DES MODELES EN REGIME TRANSITOIRE

Choix des crues

Le tableau ci-joint liste les différents événements qui ont été observés lors de la dernière décennie sur le Bas-Rhône.

BAS RHÔNE : Débits maximums (m^3/s) observés de 1990 à 1999

Années / Débits	STATIONS					
	PERRACHE SAINT CLAIR	TERNAY	VALENCE	VIVIERS	BEAUCAIRE	ARLES
1990	16/02 3230	17/02 4354	17/02 5189	17/02 5345	18/02 5302	/
1991	23/12 2683	23/12 3612	24/12 4116	24/12 4125	10/03 5122	/
1992	23/11 2750	23/11 4340	23/11 5380	23/11 5480	23/11 5500	23/11 5214
1993	9/10 2825	9/10 4417	8/10 6680	9/10 7715	10/10 9800	10/10 8320
1994	2/01 2150	2/01 3523	7/01 5380	7/01 7589	8/01 11006	8/01 9034
1995	26/02 2389	26/02 3884	27/02 4583	27/02 4857	6/10 6711	6/10 5771
1996	14/08 6670	1/12 3347	1/12 4095	13/11 5795	13/11 8881	14/11 7332
1997	6/08 5550	21/12 3461	22/01 3232	22/01 3592	19/12 8020	19/12 6270
1998	19/08 3380	5/11 3117	5/11 3645	5/11 3869	28/05 4420	28/05 3608
1999	23/02 2430	23/02 4040	23/02 4770	23/02 5100	21/10 6118	24/02 4257

La crue d'octobre 1993 a été retenue pour le **calage des modèles du Bas-Rhône** (de Vaugris à Beaucaire).

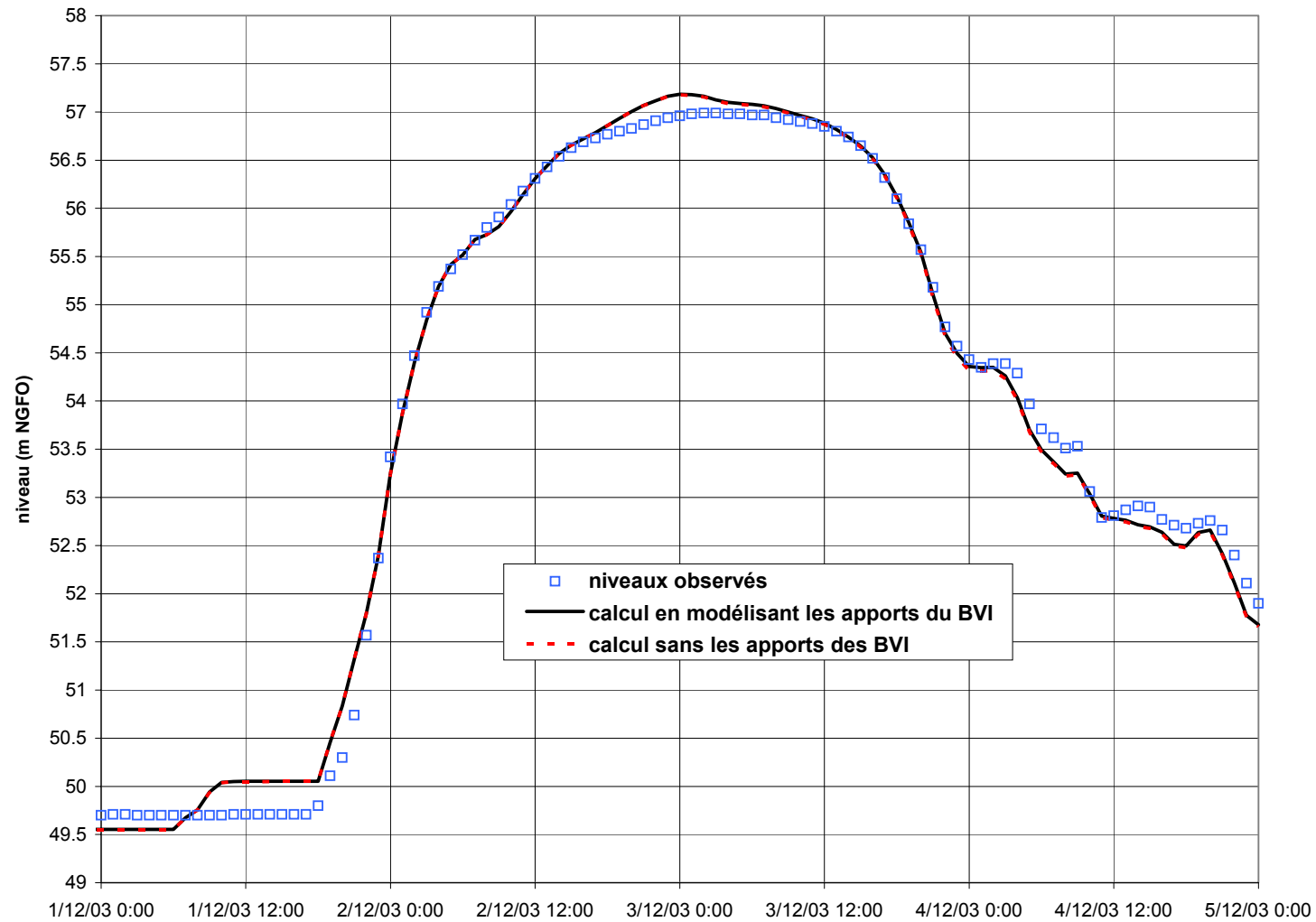
La crue de février 1999 a été utilisée comme **crue test de validation** dans la mesure où elle n'a pas servi pour le calage des modèles.

La comparaison des résultats de calcul avec les limnigrammes aux stations de référence a permis de vérifier les résultats du modèle en niveau, mais également en temps afin de s'assurer que le modèle est représentatif de la propagation de la crue.

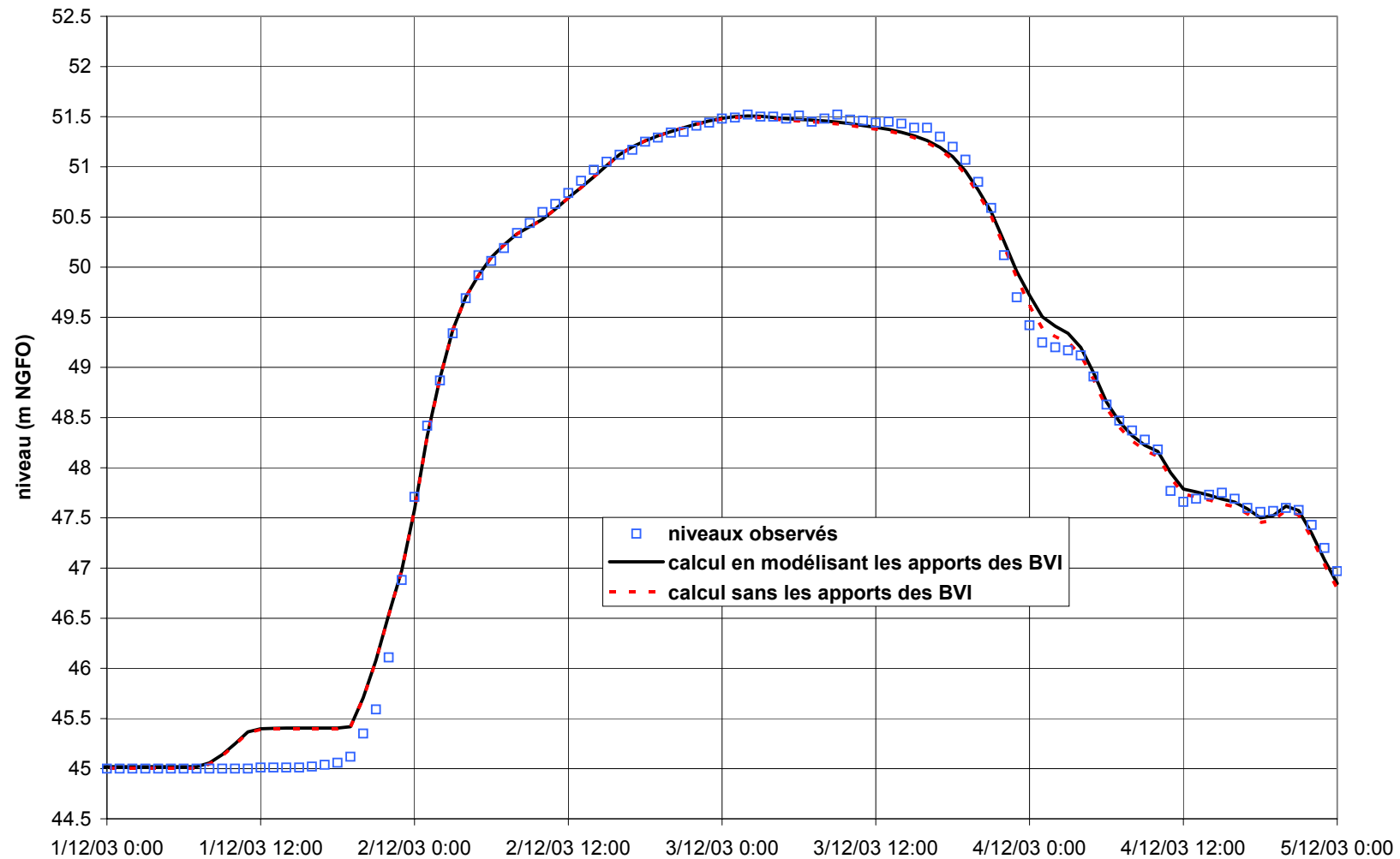
8 ANNEXE 4 : SIMULATION DE LA CRUE DE DECEMBRE 2003

Comparaison des limnigrammes avec les niveaux calculés par le modèle

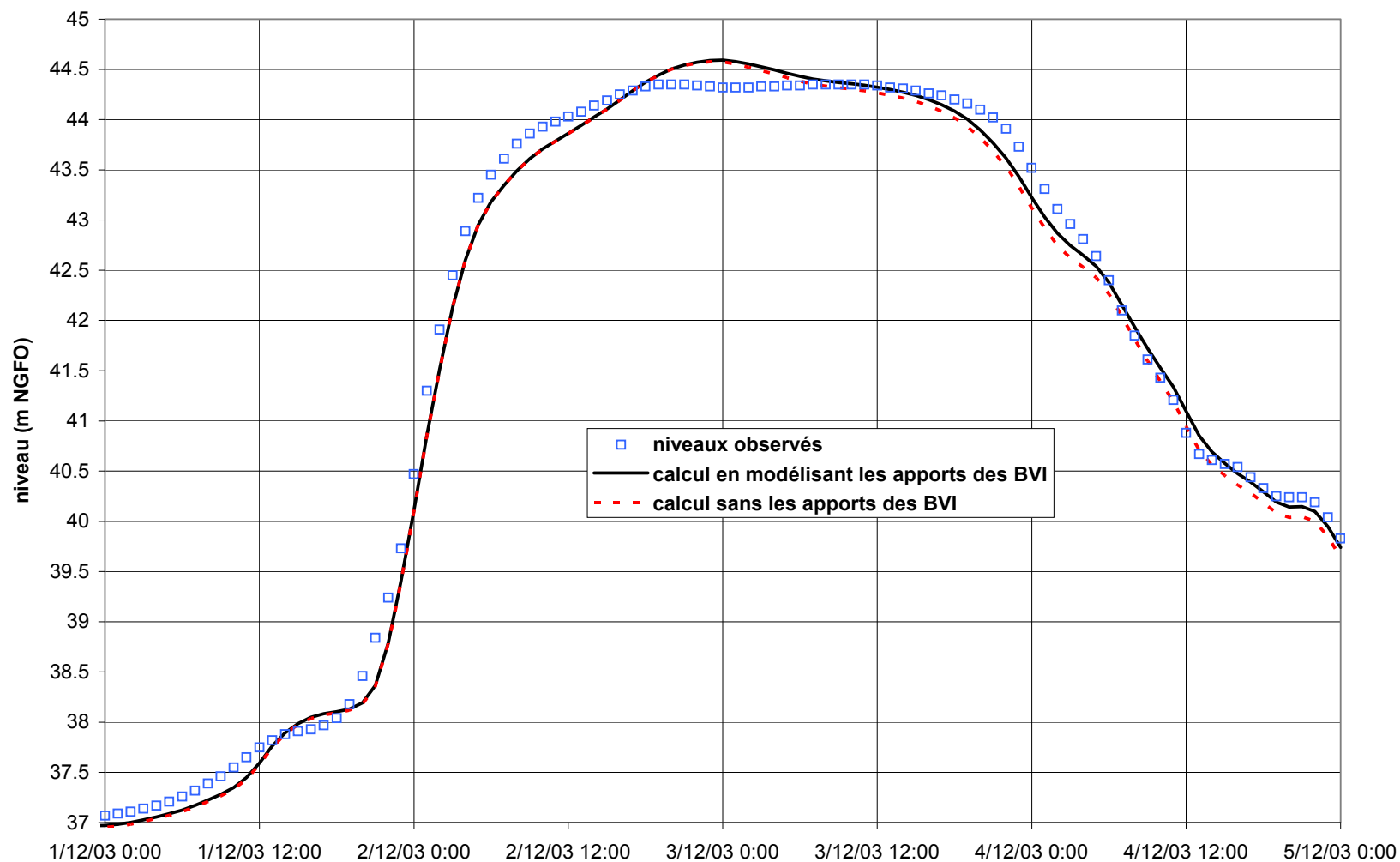
Crue de décembre 2003
Evolution des niveaux à St Montan pk173.20 (RCC Donzère)



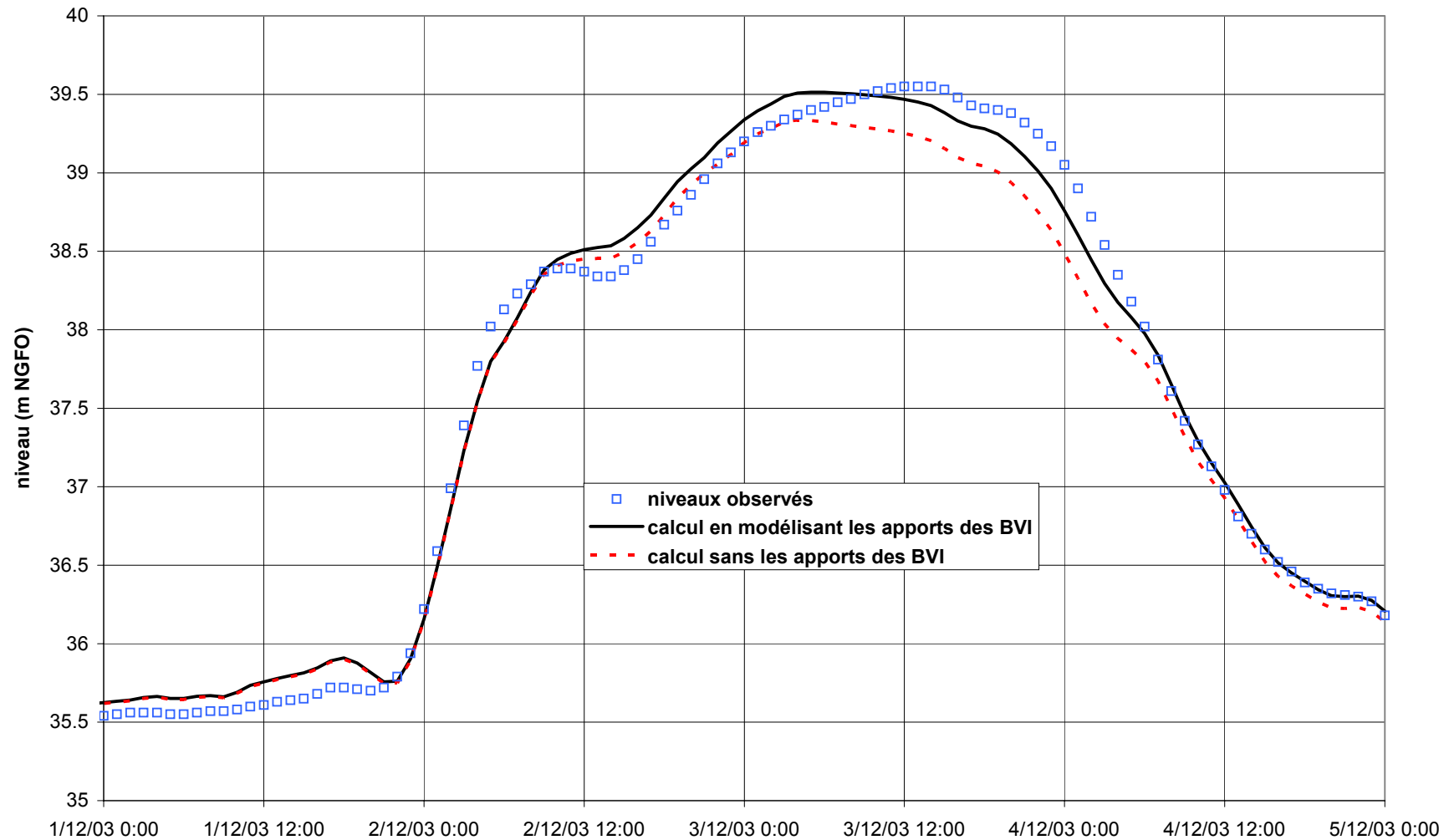
Crue de décembre 2003
Evolution des niveaux à Bourg St Andéol pk180.10 (RCC Donzère)



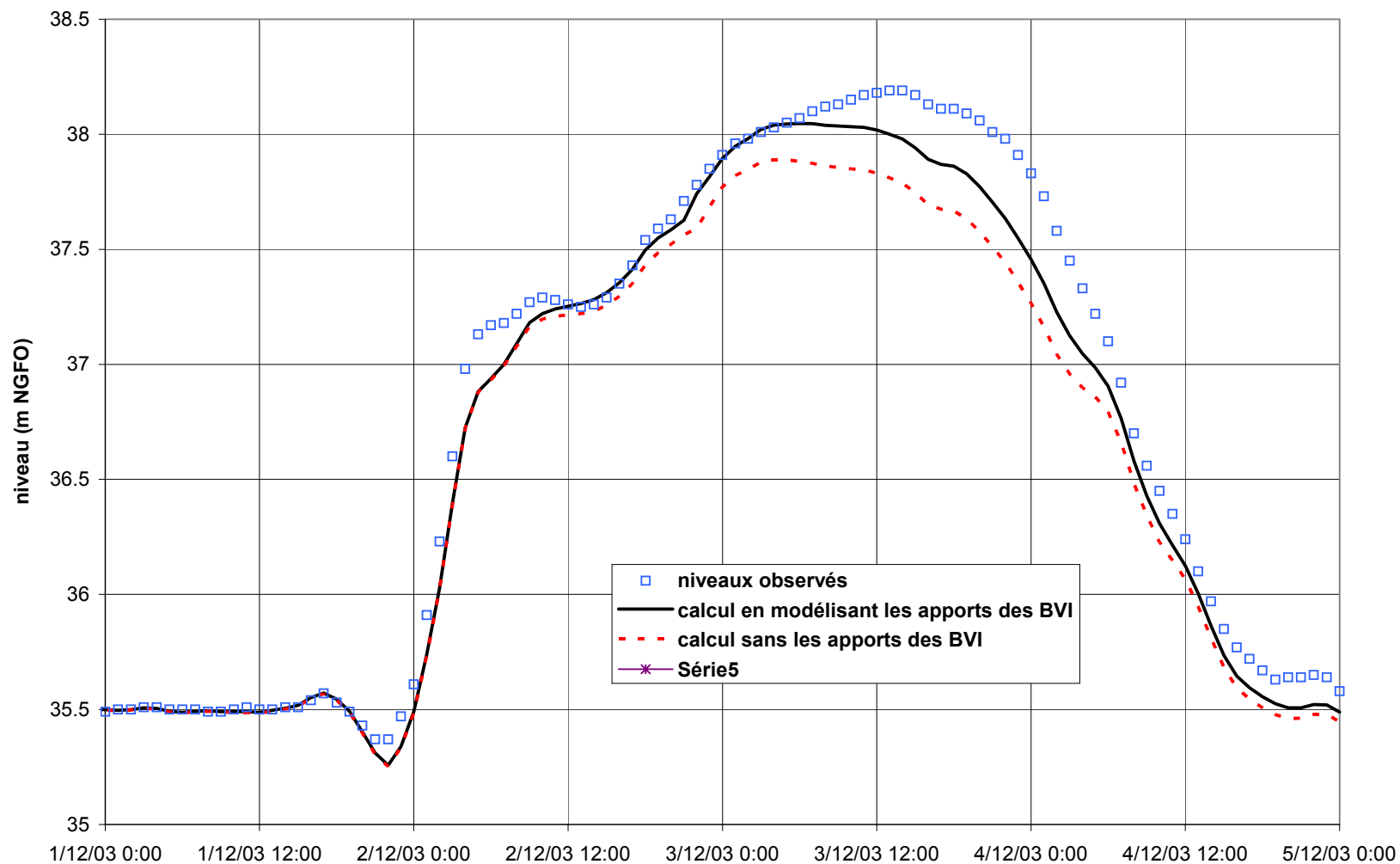
Crue de décembre 2003 **Evolution des niveaux à Pont St Esprit pk192.100**



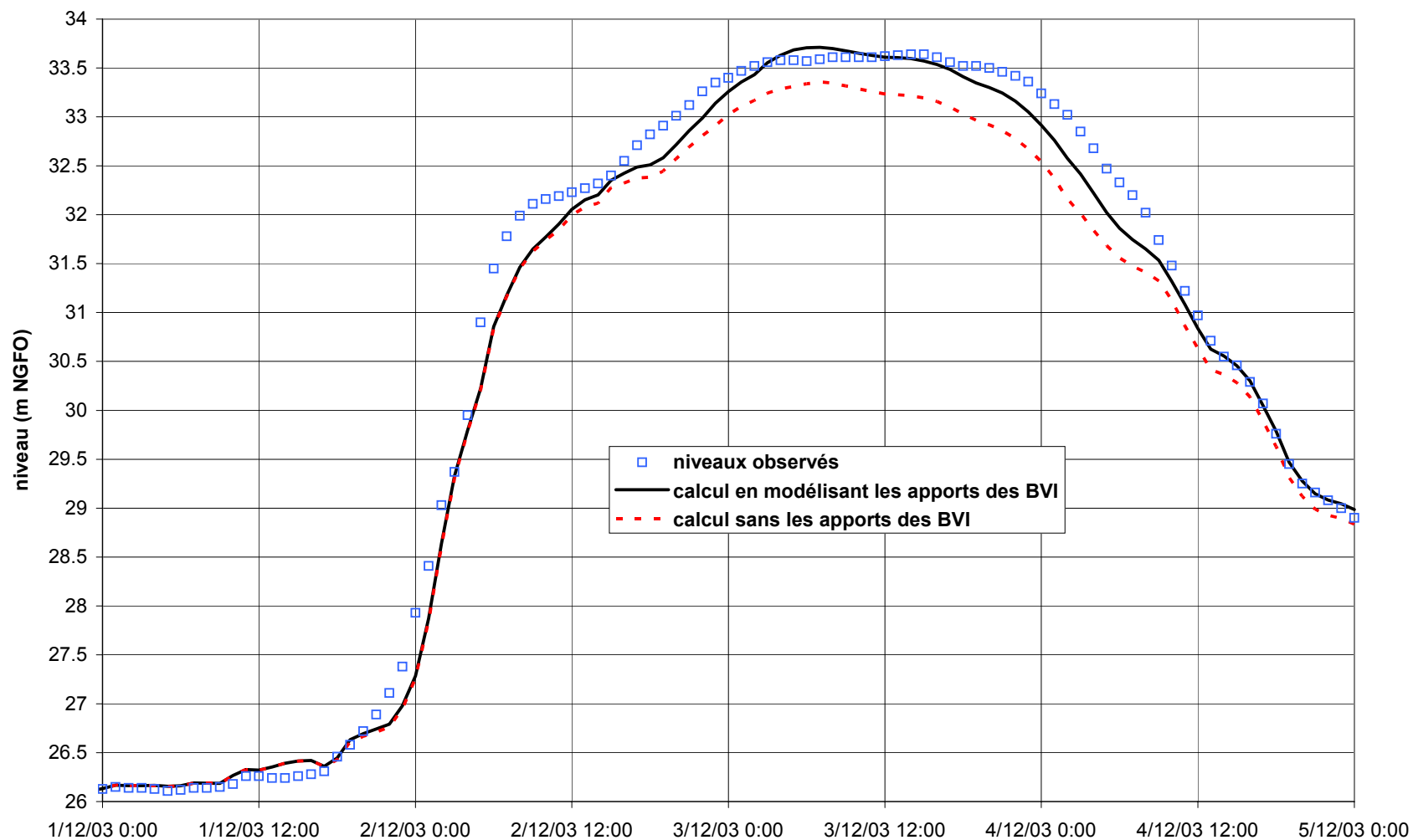
Crue de décembre 2003 Evolution des niveaux à Mondragon PK200.5



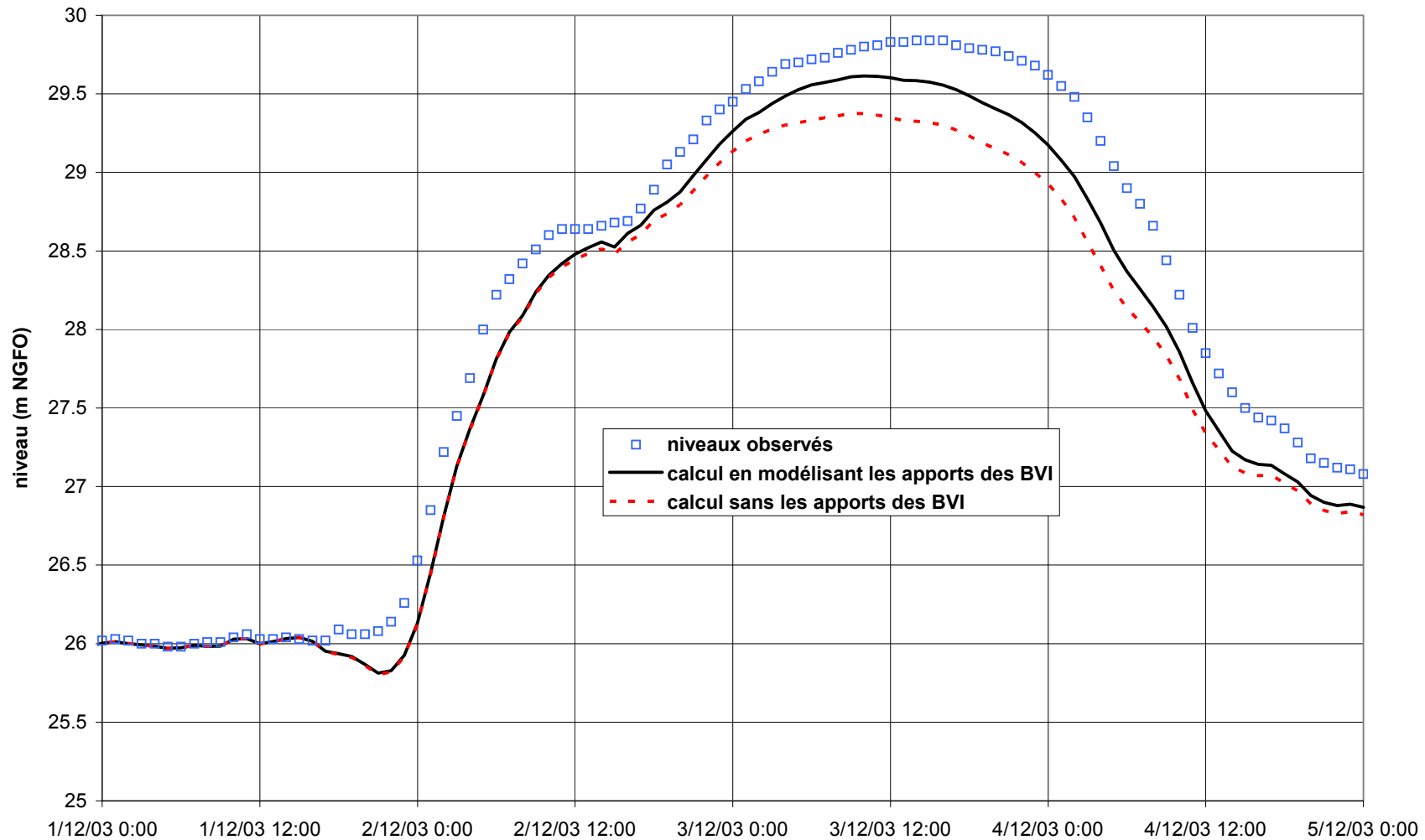
Crue de décembre 2003 **Evolution des niveaux à St Etienne des Sorts**



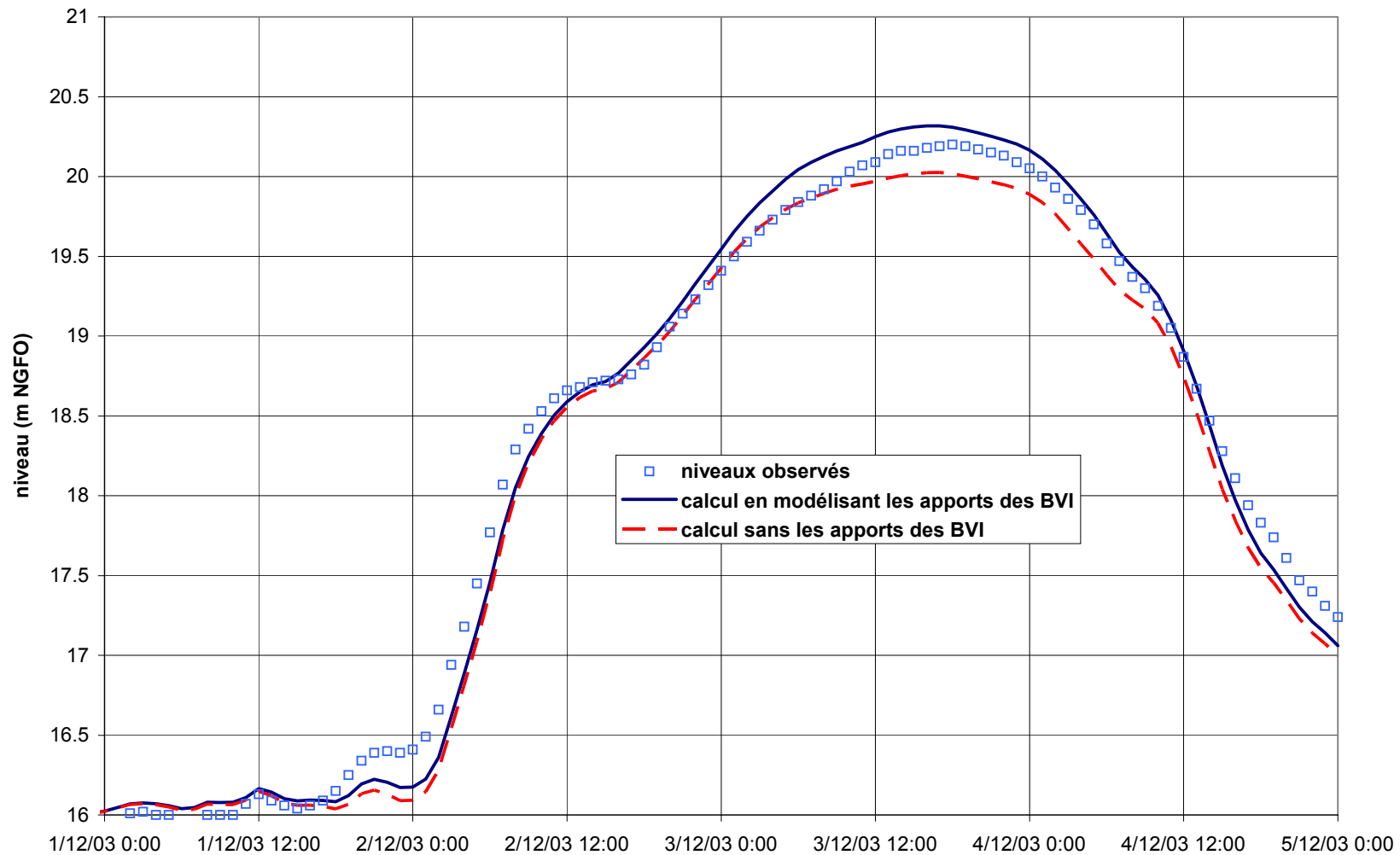
Crue de décembre 2003 **Evolution des niveaux en aval du barrage de Caderousse**



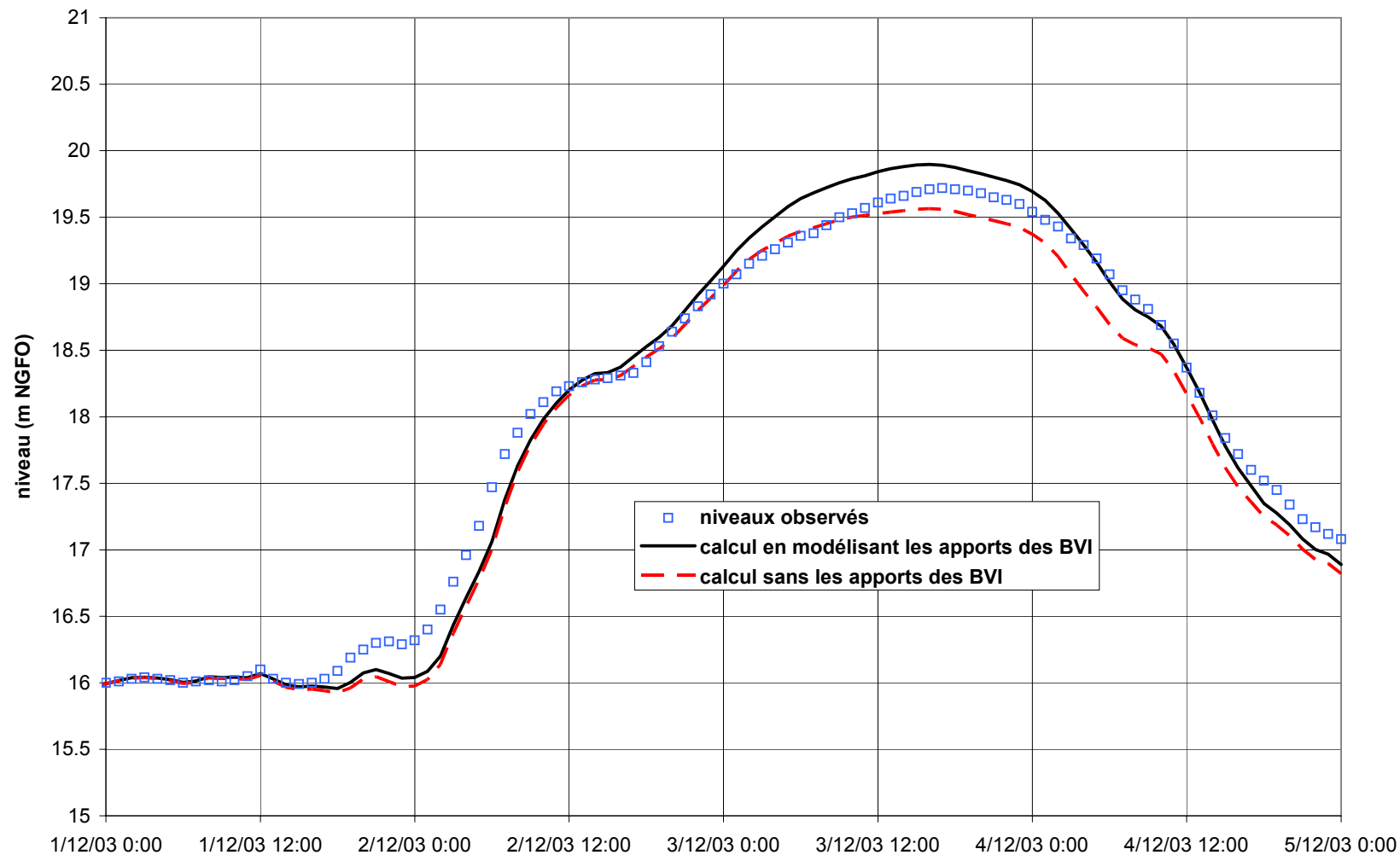
Crue de décembre 2003 **Evolution des niveaux au point de réglage PR1 d'Avignon (PK 221.8)**



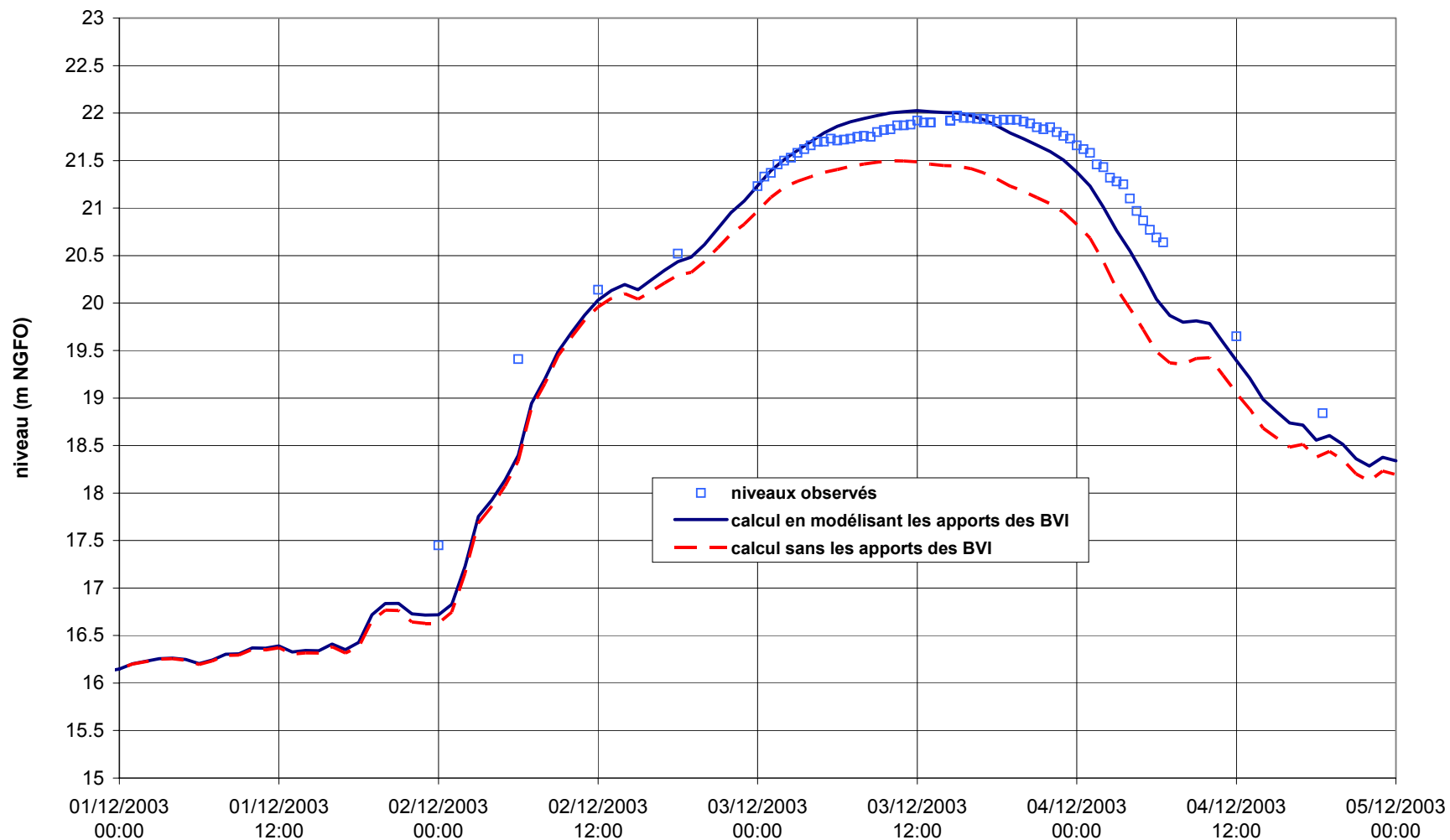
Crue de décembre 2004
Evolution des niveaux au Pont Daladier, Avignon (PK242.2)



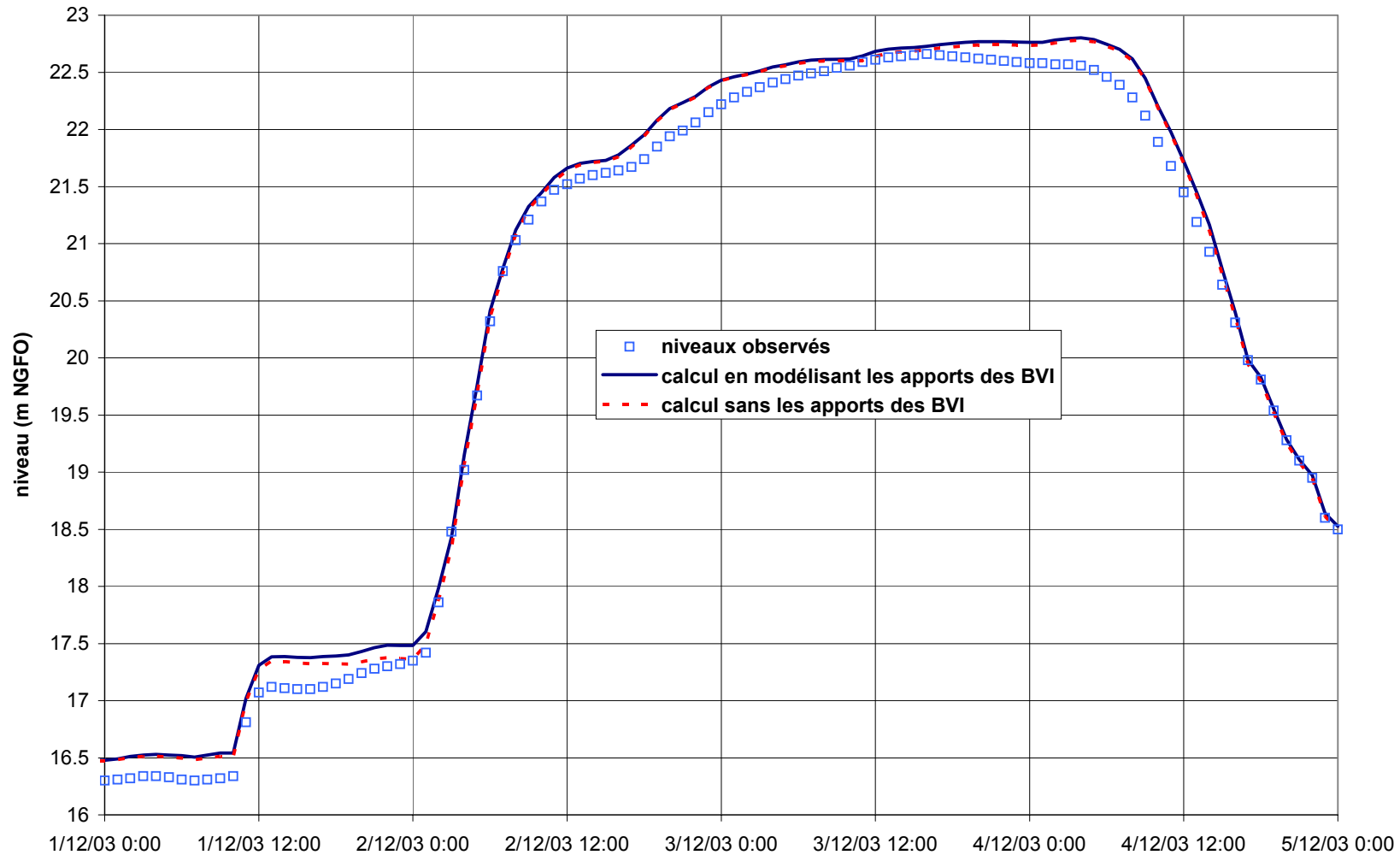
Crue de décembre 2003 **Evolution des niveaux au viaduc d'Angles (PK244)**



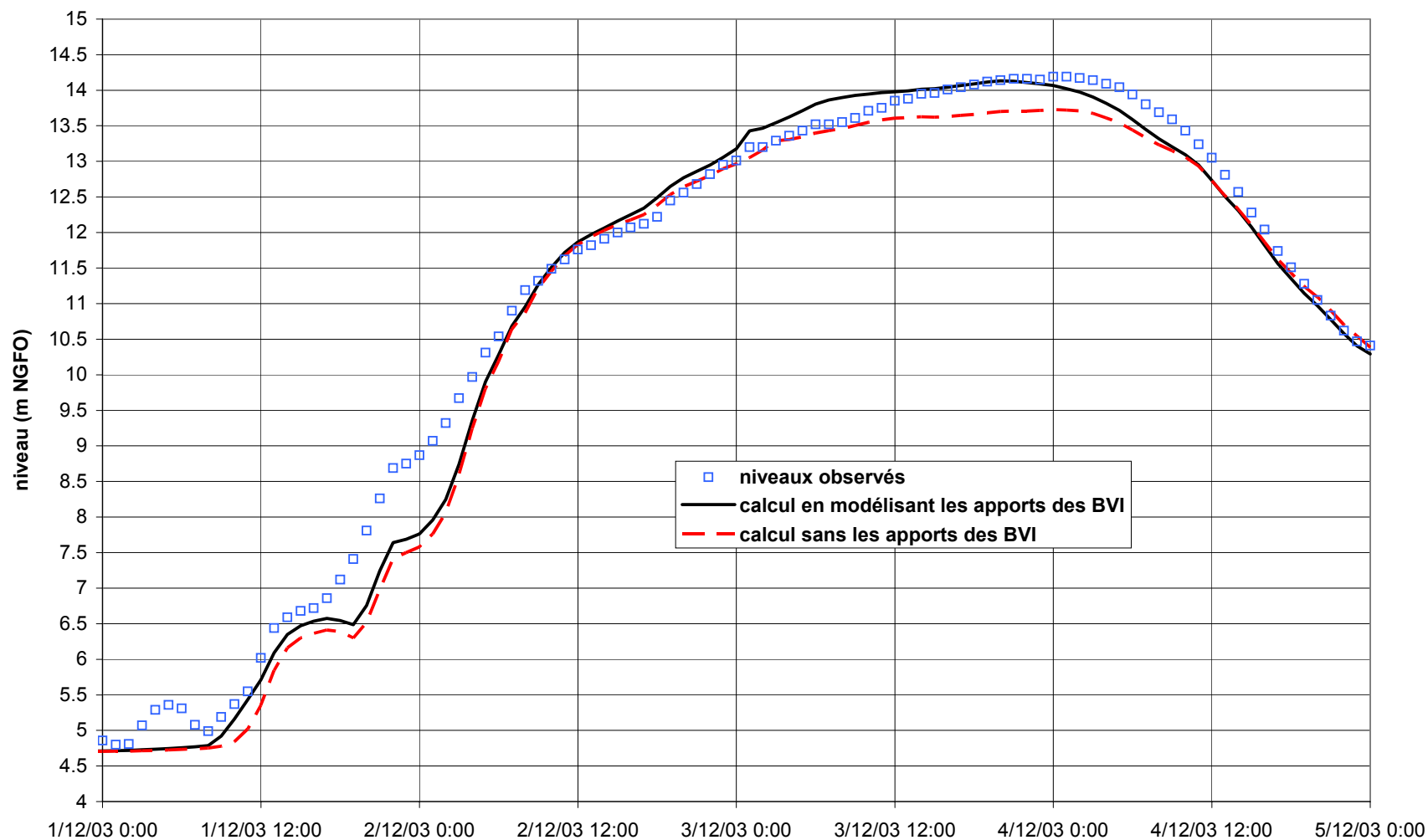
Crue de décembre 2003 **Evolution des niveaux en aval du barrage de Villeneuve**



Crue de décembre 2003 **Evolution des niveaux en aval du barrage de Sauveterre**



Crue de décembre 2003 **Evolution des niveaux en aval du barrage de Vallabrègues**



Crue de décembre 2003 **Evolution des niveaux au pont de Beaucaire (pk267.7)**

