

NOTE

Rédacteur : Patrick Fourmigué

Téléphone 04 42 24 76 70

Télécopie 04 42 60 79 48

Messagerie :patrick.fourmigue@equipement.gouv.fr

Nom fichier : NOTEcdtBeaucaireTarascon_V3.doc

Objet :

**Crue du Rhône de décembre 2003
à la station de Beaucaire-Tarascon**

***Proposition de détermination du débit, de
la courbe de tarage et des volumes écoulés***

Diffusion : **DIREN RA -DB**

PJ : 4

1 Introduction

La crue du Rhône de décembre 2003 a soulevé nombre d'interrogations sur la valeur du débit de pointe à la station limnimétrique de Beaucaire-Tarascon, utilisée par la CNR et le service d'annonce de crues de la DDE du Vaucluse.

En raison de son expérience acquise sur le Rhône depuis plusieurs années, le CETE est en mesure d'apporter un éclairage aux experts de la Conférence de Consensus. Il est précisé que ces éléments ont également été établis afin de préciser le contenu du retour d'expérience qu'il est prévu de réaliser sur cette crue.

Dans ce contexte, le CETE a travaillé en concertation avec MM. Jean-François Brochot et Jean-François Celle de la DB¹, qui ont rédigé les notes techniques de base (cf. pièces jointes 1 et 2).

La présente note de synthèse abordera successivement les quatre points suivants :

- L'analyse des jaugeages ADCP de la CNR, à Beaucaire-Tarascon, pour obtenir une relation entre la Cote à l'échelle et la Vitesse moyenne d'écoulement dans la section de PK269.600, puis son extrapolation à la cote 11.30m pour estimer un débit de pointe.
- La proposition d'une nouvelle courbe de tarage de la station pour des Cotes supérieures à 8.00m, obtenue avec la relation Cote-Vitesse ci-avant.
- L'analyse des volumes écoulés lors de la crue de déc. 2003 depuis Ternay jusqu'à Beaucaire-Tarascon, tant sur le Rhône que ses affluents.
- L'analyse des limnigrammes entre Beaucaire-Tarascon et Arles (influence des débordements et des brèches)

2 Analyse des jaugeages ADCP

L'analyse s'est appuyée sur 20 jaugeages ADCP réalisés par la CNR :

- 12 jaugeages antérieurs à 2003 (3 en mars 2001 et 9 en nov. 2002), pour des cotes entre 6.81 et 9.76 m.
- 8 jaugeages autour de la pointe de la crue de décembre 2003, pour des cotes entre 9.93 et 11.10 m (3 en montée le 3/12 et 5 en descente le 4/12)

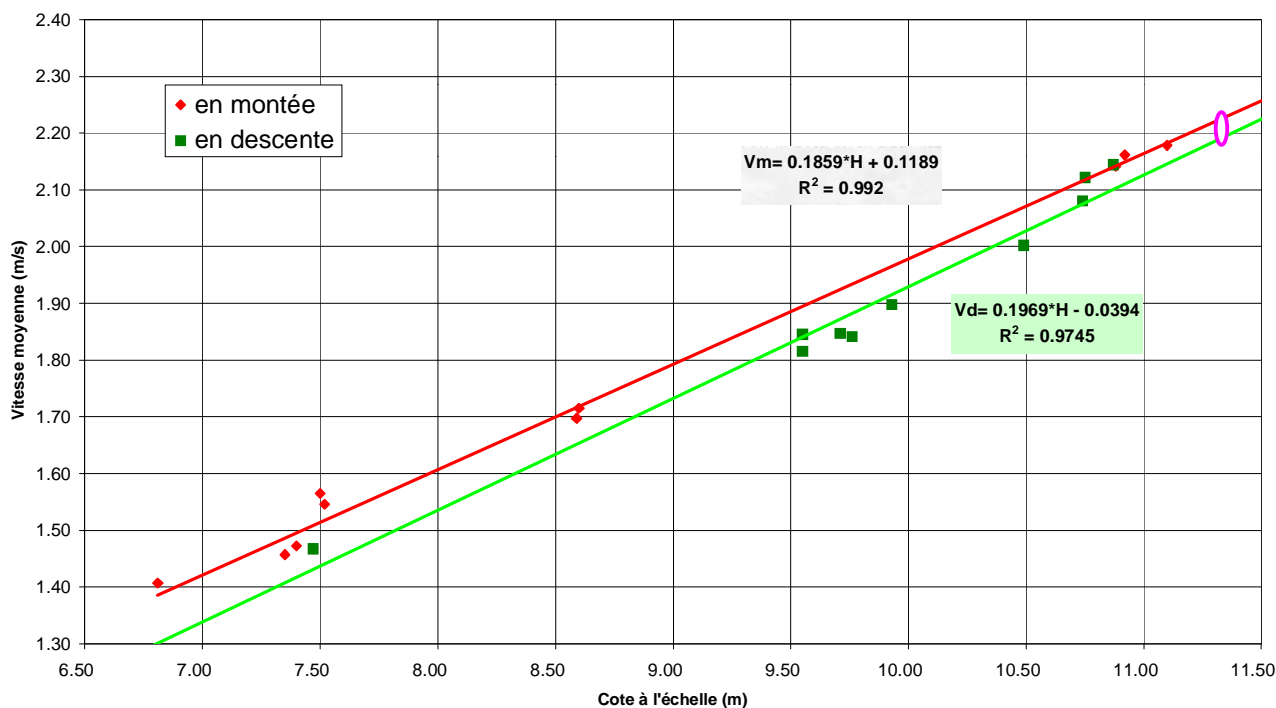
L'examen particulier des trois jaugeages en montée du 3 déc. 2003, pousse à écarter, sur chacun d'eux, une valeur extrême (sur les 6 à 8 traversées²). Le détail est donné en **annexe 1**.

En procédant ainsi, on retient finalement des valeurs corrigées des débits et vitesses moyennes, croissantes avec la cote, comme le montre le tableau ci-dessous :

Heure jaugeage	Cote moyenne (lecture échelle)	Débit moy. CNR	Vitesse moy. CNR	Section calculée ³	Débit moyen corrigé	Vitesse moy. corrigée
	m	m ³ /s	m/s	m ²	m ³ /s	m/s
09 :23	10,88	10 881	2,16	5044	10 804	2,14
10 :10	10,92	10 863	2,15	5057	10 930	2,16
12 :30	11,10	11 051	2,16	5114	11 141	2,18

Ensuite, on a reporté tous les couples (vitesse, cote) des 20 jaugeages, en distinguant "en montée" ou "en descente". L'ajustement de courbes de tendance montre des valeurs un peu supérieures "en montée"⁴.

Beaucaire-Tarascon : Relation Cote-Vitesse du Rhône : jaugeages en montée OU en descente



En extrapolant jusqu'à la pointe de déc. 2003 (**H=11.30m**, section calculée de **5179 m²**), on obtient :

- une vitesse de **2.20 m/s** environ⁵
- un débit de **11 400 m³/s** environ

² Le résultat de chaque jaugeage ADCP correspond en fait à la moyenne des débits et sections mesurés, lors de plusieurs traversées. Le détail est donné en annexe 1.

³ calculée avec la formule de Philippe Bois (GAES), $S(m^2)=2000+240*H+3.656*H^2$ (H cote échelle en m). Cohérente avec les sections ADCP-CNR et avec le profil en travers au PK269.500 transmis par la CNR.

⁴ que l'on pourrait expliquer par la forme en "raquette" de la relation Q(H) en écoulement non permanent

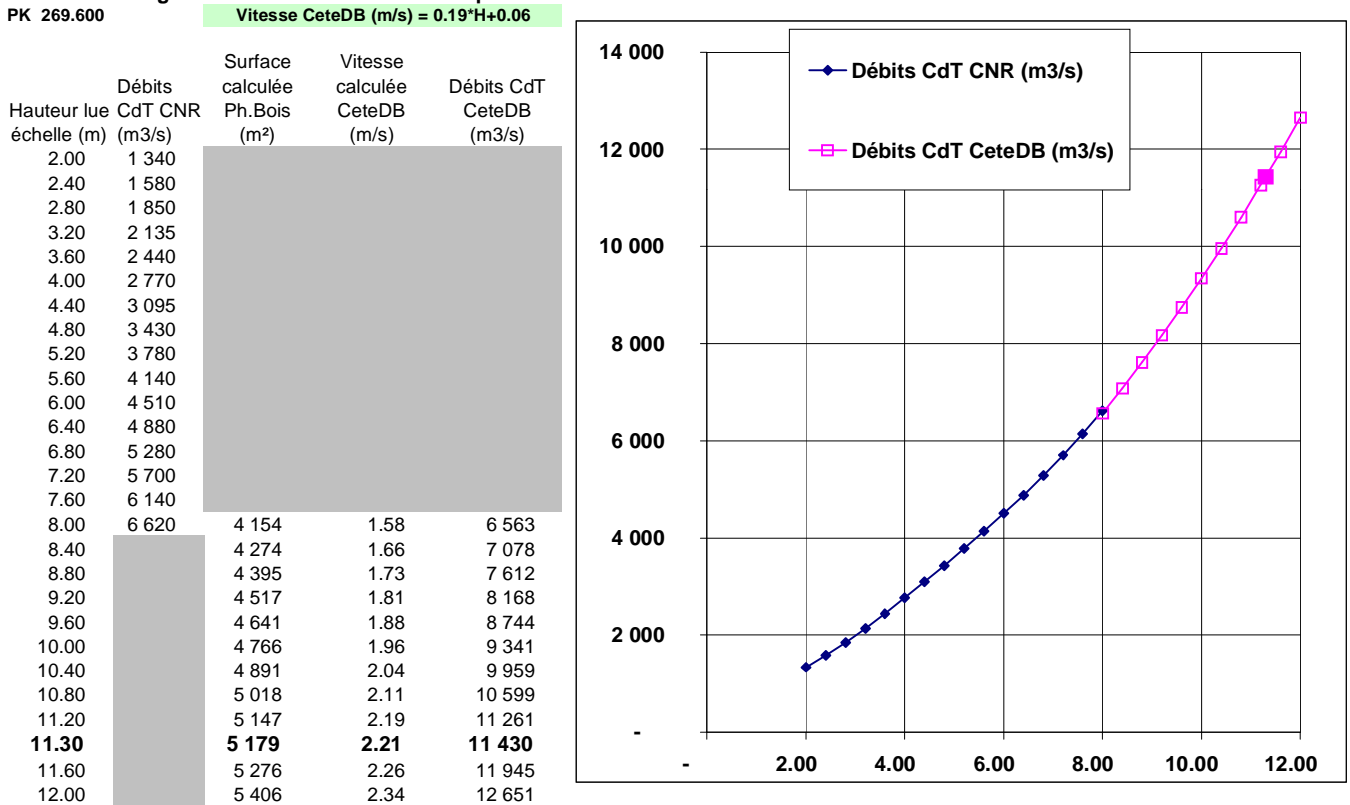
⁵ on trouve 2.22 m/s avec la relation "en montée" et 2.19 avec celle "en descente".

3 Extrapolation de la courbe de tarage

On a considéré que la courbe de tarage CNR (utilisée en déc. 2003) faisait consensus jusqu'à la cote 8.00 m env.

Pour extrapoler, on a choisi de procéder par la méthode des vitesses en retenant une loi intermédiaire entre celles précédemment calculées : $V_{moy} = 0,19 H + 0,06$.

Courbe de tarage POINT PAR POINTS CeteDB pour le Rhône à Beaucaire-Tarascon
PK 269.600



Le graphique ci-dessus montre que l'écart est de 1% avec la courbe CNR pour H=8.00m⁶.

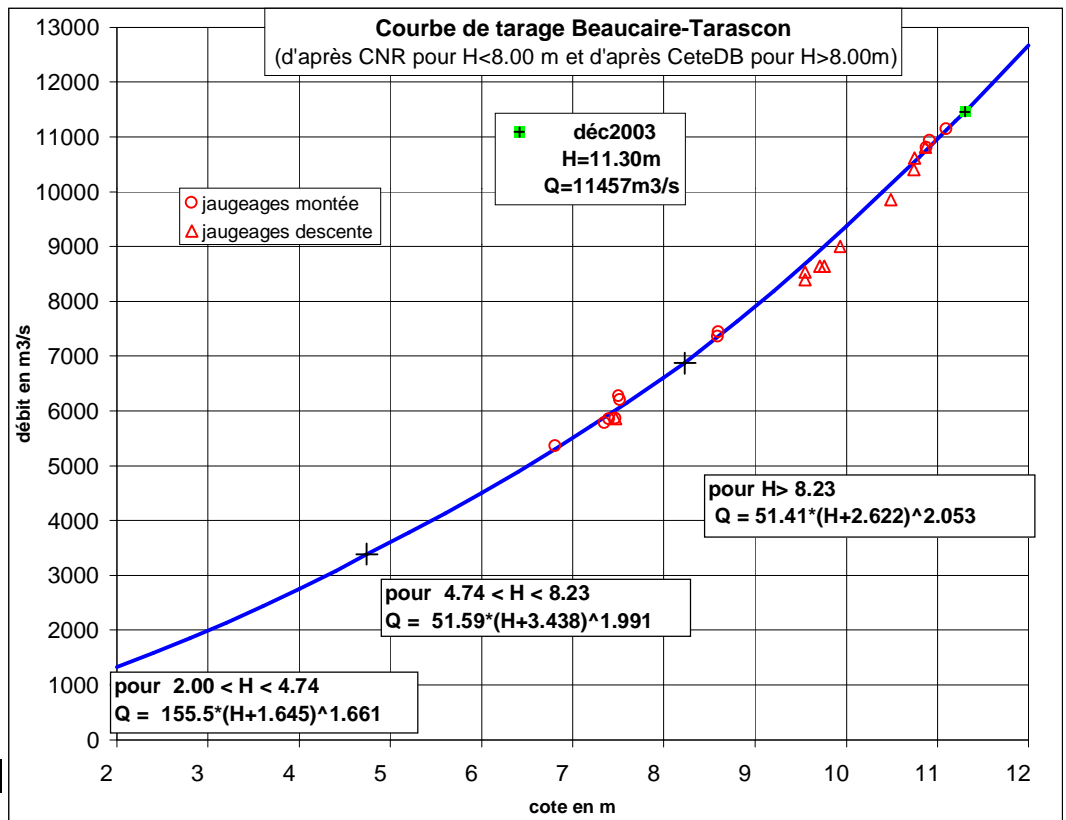
Enfin, pour faciliter les calculs de volumes des hydrogrammes, on a ajusté 3 lois puissance (de part et d'autre des seuils 4.74 et 8.23 m) pour obtenir in fine la courbe ci-après.

Avertissement : l'extrapolation jusqu'à la cote 12.00m est purement indicative

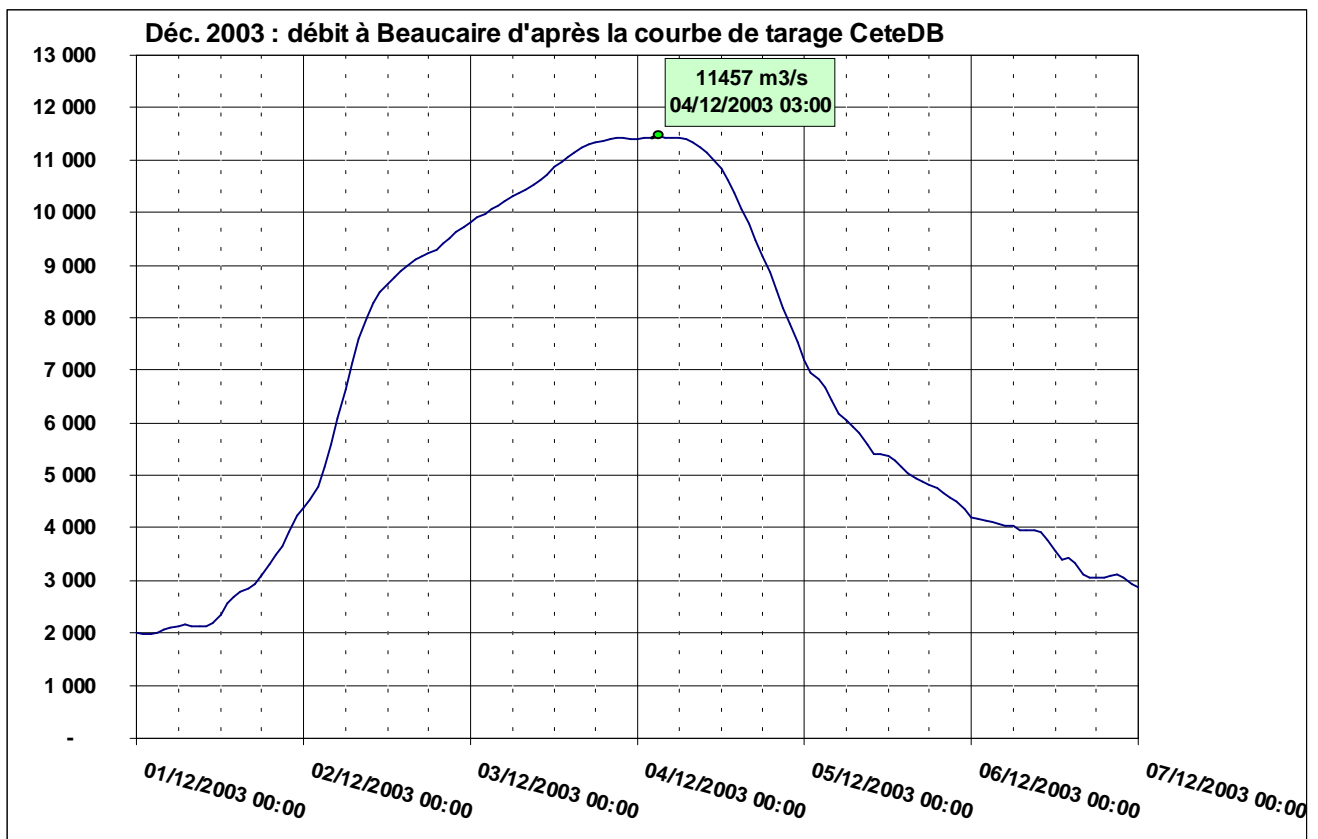
⁶ La courbe CNR s'écarte nettement pour les hauteurs supérieures à 8.00m.

On note que les points de jaugeages ne sont pas trop éloignés de la courbe, sauf pour ceux en décrue et que le raccord est presque parfait avec les valeurs de la courbe CNR.

Courbe de tarage Beaucaire-Tarascon CeteMed+DB (8 juin 2005)	
Hauteur(m)	Débit (m3/s)
2.00	1 333
2.40	1 584
2.80	1 853
3.20	2 138
3.60	2 439
4.00	2 756
4.40	3 088
4.74	3 386
5.20	3 775
5.60	4 131
6.00	4 504
6.40	4 892
6.80	5 295
7.20	5 715
7.60	6 151
8.00	6 603
8.23	6 870
8.40	7 093
8.80	7 631
9.20	8 190
9.60	8 769
10.00	9 368
10.40	9 988
10.80	10 628
11.20	11 289
11.30	11 457
11.60	11 969
12.00	12 671



Le débit de déc. 2003 atteint la valeur de **11 457 m3/s** et un volume écoulé⁷ de **3519 Mm3**.



⁷ sur 6 jours (du 1^o au 6 déc.). Application au limnigramme utilisé au chapitre 5

4 Analyse des volumes

L'analyse des volumes écoulés lors de la crue de décembre 2003 a été faite depuis Ternay jusqu'à Beaucaire-Tarascon, en prenant en compte les débits du Rhône et de ses affluents équipés d'une station de mesure.

Les apports des bassins versants intermédiaires (notés BVi) ont été soit obtenus par différence des volumes écoulés sur le Rhône, soit estimés à partir de comparaison de lames écoulées sur d'autres affluents.

Les données utilisées sont les débits moyens horaires mis en commun par la DIREN Rhône-Alpes (Service de l'eau et des milieux aquatiques - SEMA), des services d'annonce des crues (SAC) et la CNR.

La période couvre 6 jours, du 1^{er} déc. à 0h au 6 déc. à 24h.

On a distingué 5 sections pour la présentation de ces calculs de volumes écoulés.

5 sections	commentaires
Ternay - Valence	stations fiables, les apports des BVi pourront être déduits par différences
Valence Viviers	
Viviers - Pont St Esprit	Pont Saint Esprit (PSE) est sur le Rhône court-circuité ; il faut ajouter le débit du canal usinier (CU) Donzère-Mondragon (estimé par DIREN DB)
Pont St Esprit -Avignon	Avignon est une station d'annonce des crues en <u>niveau</u> . Courbe de tarage, mal connue, fonction du débit Durance.
Avignon-BeaucaireTarascon-	Courbe de tarage à proposer (jusqu'aux environs de 8 m, elle n'est pas remise en cause)

4.1 Section Ternay – Valence

Stations	Ternay	<i>Givors</i>	<i>Sarras</i>	<i>Saint-Uze</i>	<i>Tournon</i>	<i>Beaumont</i>	Valence
Cours d'eau	Rhône	<i>Gier</i>	<i>Cance</i>	<i>Galaure</i>	<i>Doux</i>	<i>Isère</i>	Rhône
BV (km2)	51 100	406	380	232	636	11 800	66 450
<i>Volume (Mm3)</i>	779,2	38,7	45,4	13,7	101,2	254,2	1369,7
	Volume total = 1 233 Mm3						
Lames (mm)		95	119	59	159	22	

Le BV intermédiaire non mesuré (1896 km², principalement en RG du Rhône) a contribué à un volume de 137 Mm³, soit une lame de 72 mm, cohérente avec la Galaure, affluent RG.

4.2 Section Valence Viviers

Stations	Valence	Beaumont	Pontpierre	Loriol	Montélimar	Viviers
Cours d'eau	Rhône	Véore	Eyrieux	Drome	Roubion	Rhône
BV (km ²)	66 450	192	818	1640	610	70 900
Volume (Mm ³)	1369,7	9,2	195,4	141,7	74,4	1914,5
Volume total = 1 790 Mm ³						
Lames (mm)		48	239	86	122	

Le BV intermédiaire non mesuré (1190 km², principalement en RD du Rhône) a contribué à un volume de 124 Mm³, soit une lame de 104 mm, un peu faible comparée à l'Eyrieux, affluent RD.

- Cas de l'Eyrieux et de la Drôme : la prise en compte des stations immédiatement amont sur ces 2 affluents permet de comparer les lames d'eau écoulées.

Stations	Les Ollières	Pontpierre	Saillans	Loriol
Cours d'eau	Eyrieux		Drôme	
BV (km ²)	600	818	1150	1640
Volume (Mm ³)	148,8	195,4	101,4	141,7
Lames (mm)	248	239	88	86
BVi des affluents	46,6 Mm ³ pour 218 km ² soit 214 mm		40,3 Mm ³ pour 490km ² soit 82 mm	

4.3 Section Viviers - Pont St Esprit (PSE)

Au préalable, il nous a fallu analyser le cas de la station de Sauze-St Martin sur l'Ardèche, pour laquelle on a deux courbes de tarage, SEMA et CNR.

- Cas de l'Ardèche : la prise en compte de la station immédiatement amont de Vallon Pt d'Arc permet de comparer les lames d'eau écoulées.

Stations	Vallon	Sauze-St Martin (SEMA) (CNR)	
Cours d'eau	Ardèche		
BV (km ²)	1931	2240	2240
Volume (Mm ³)	489,1	555,6	599,1
Lames (mm)	253	248	267

Le BVi Ardèche de 309 km² aurait écoulé une lame comprise entre 215 mm (avec courbe SEMA, cohérente avec celle de l'Eyrieux) et 356 mm (avec courbe CNR, manifestement trop importante). **On a donc retenu le volume calculé par la station SEMA, apparemment plus cohérent.**

Sur le Rhône, il faut ajouter les débits PSE+CU⁸ pour reconstituer le débit complet.

Stations	Viviers	Sauze-St Martin (SEMA)	station "virtuelle PSE + CU	
Cours d'eau	Rhône	<i>Ardèche</i>	Vieux Rhône	Canal usinier
BV (km ²)	70 900	2240	73 500	
Volume (Mm ³)	1914,5	555,6	1641,6 + <u>910,5</u> = 2 552 Mm ³	
Volume total = 2 470 Mm ³				

Le BV intermédiaire non mesuré (360 km², principalement en RD du Rhône) a contribué à un volume de 82 Mm³, soit une lame de 227 mm, cohérente avec celle du BVi de l'Ardèche (sous réserve de la validité de la reconstitution du volume passé par le canal usinier).

⁸ CU canal Usinier . Modalités pour l'estimation du volume transité : débit réservé = 60 m³/s Débit turbiné par la CNR de 1900 m³/s. Réduit à 1500 m³/s pour les débits, entre 6000 et 7000 m³/s

4.4 Section Pont St Esprit –Avignon

Stations	PSE + CU	<i>Bollène</i>	<i>Bagnols</i>	<i>Orange</i>	<i>Bédarrides</i>	Avignon
Cours d'eau	Rhône	<i>Lez</i>	<i>Cèze</i>	<i>Aygues</i>	<i>Ouvèze</i>	Rhône
BV (km2)	73500	500 (*)	1305	1000 (*)	1860	78 500 (*)
<i>Volume (Mm3)</i>	2 552	34,1(**)	168,3	68,3	149.2	2 970
	Volume total = 2 972 Mm3					
Lames (mm)		68 (**)	129	68	80	

(*) estimations

(**) sur le Lez, pas de courbe de tarage. Valeurs égales à la moitié de celles de l'Aygues, comme les surfaces de bassin.

Le BV intermédiaire non mesuré (335 km²) n'aurait pas contribué au volume en Avignon, ce qui n'est guère possible.

Aussi, vu les doutes sur la courbe de tarage d'Avignon, on a repris l'hypothèse d'une lame apportée par le BV_i de 100mm, soit 33.5 Mm³.

Le volume écoulé en Avignon serait alors **de 3 005 Mm³**.

4.5 Section Avignon-BeaucaireTarascon

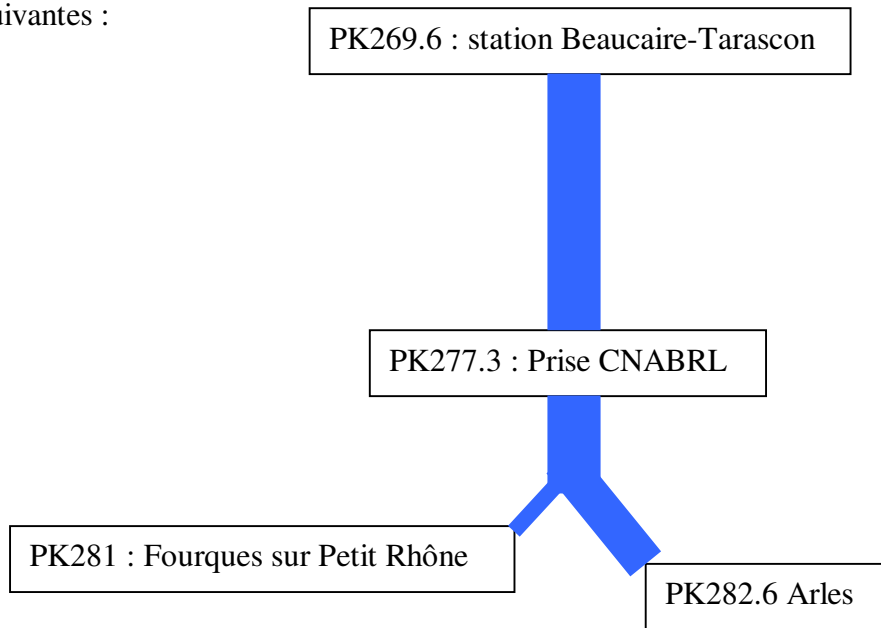
Stations	Avignon	<i>Bonpas</i>	<i>Rémoulins</i>	Beaucaire-Tarascon
Cours d'eau	Rhône	<i>Durance</i>	<i>Gardons</i>	Rhône
BV (km2)	78 500	14 225	2 050	95 590
<i>Volume (Mm3)</i>	3 005	233.2	238.5	Question posée ???
	Volume total = 3 477 Mm3			
Lames (mm)		16	116	

Pour le BV intermédiaire non mesuré (815 km²), on a pris de nouveau l'hypothèse d'une lame apportée de 100mm, soit 81.5 Mm³.

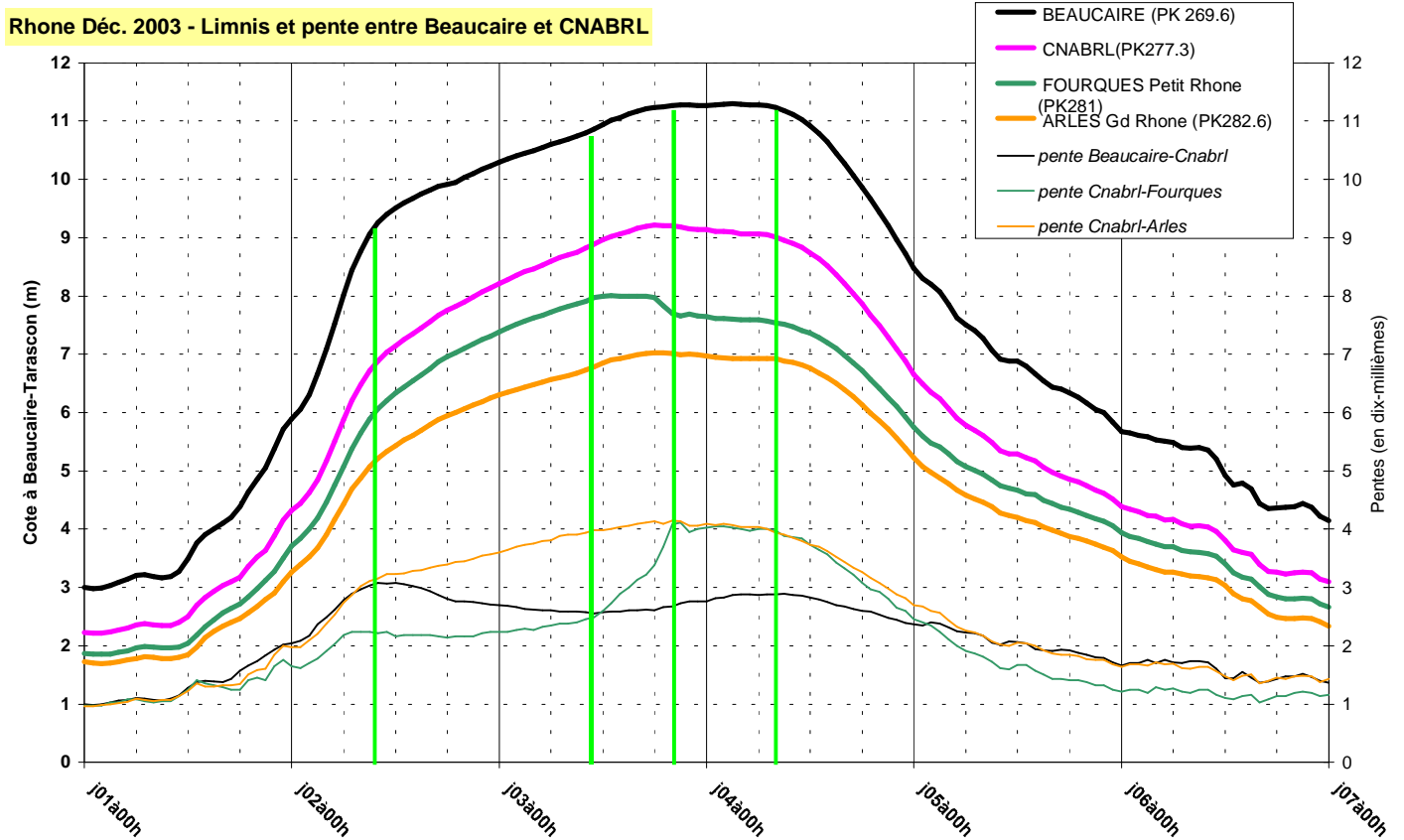
Le volume écoulé à Beaucaire-Tarascon serait alors **de 3 358 Mm³**, très proche de celui trouvé par la nouvelle courbe de tarage CETE DB (3 519 Mm³)

5 Analyse des limnigrammes

On a reporté sur un même graphique les limnigrammes (moyens horaires) aux stations limnimétrique suivantes :



On y a ajouté les pentes des trois tronçons (en dix-millièmes) ce qui peut donner une idée de l'augmentation des vitesses.



On peut en faire la lecture et l'interprétation suivantes :

le 3 à 10 heures , ouverture de la brèche de Fourques sur le petit Rhône

Lors de cette brèche qui s'est produite au niveau de Fourques sur le petit Rhône (dont l'ouverture a sans doute été progressive ?) un transfert de débit s'est opéré entre le Grand Rhône et le Petit Rhône, qui a pu être suivi sur les stations voisines.

La station la plus proche de Fourques sur le Petit Rhône a connu un plat puis un effondrement brutal vers 18 heures (environ 30 cm). Les stations d'Arles et de CNA BRL sur le Grand Rhône ont cessé de monter vers 18 heures également.

Par contre, la station de Beaucaire-Tarascon qui a connu un léger tassement vers 21 heures, a continué de monter et a connu son maximum vers 3 heures du matin le 4/12.

Pendant cette phase transitoire de propagation de l'effet de brèche, les vitesses se sont certainement accrues sensiblement sur le Grand Rhône avant d'atteindre un nouveau profil d'équilibre, mais on ne connaît pas la durée de cette phase transitoire et jusqu'où l'influence est remontée.

On remarque que la pente de la ligne d'eau entre Beaucaire et CNA BRL présente un plat ou léger flash à partir de la cote 9 m à Beaucaire, cote qui correspond sensiblement au début d'inondation des ségonaux*.

Avant ce phénomène, les 3 stations évoluaient de manière régulière (par exemple écart à peu près constant de 2 m entre Beaucaire et CNA BRL).

On constate entre 18 heures le 3/12 et 3 heures du matin le 4/12 que :

- Beaucaire a augmenté de 7 cm
- BRL a diminué de 13 cm (alors qu'en suivant simplement Beaucaire il aurait augmenté de 7 cm).
- Arles a diminué de 10 cm (alors qu'en suivant simplement Beaucaire il aurait augmenté de 5 à 6 cm).

Ainsi, l'abaissement de la ligne d'eau serait d'environ 20 cm à BRL et 15 cm à Arles. Cela en faisant abstraction des temps de propagation (les temps de propagation sur cette section sont de l'ordre d'une heure (vitesse moyenne de 2m/s environ)).

Ces seuls éléments ne permettent pas de conclure sur l'influence de la brèche à Beaucaire. Cependant, si sur les stations de Fourques, d'Arles et de CNA BRL le décroché apparaît sensible (et pour toutes les 3 à partir de 18 heures) la déformation est peu perceptible à Beaucaire.

6 Limites et conclusions

L'analyse réalisée reste simple: elle n'a pas mis en œuvre d'outils lourds, type modélisation hydraulique ou pluie-débit.

Elle repose cependant sur une série d'hypothèses, notamment lors de l'extrapolation des vitesses pour la courbe de tarage ainsi que pour le calcul des volumes des apports intermédiaires et dérivés par le canal usinier.

Elle mériterait d'être complétée par :

- un croisement avec les données de pluie journalières
- une analyse des volumes écoulés à un pas de temps plus fin (journée ou moins)
- une meilleure connaissance des conditions de débordement du Rhône à l'aval de Beaucaire (modélisation ?)

Malgré ces réserves, on avancera, pour la crue de déc. 2003, les valeurs suivantes :

- **débit de pointe : dans la fourchette [11 000 ; 12 000] m³/s**, autour d'une valeur moyenne de 11 500 m³/s
- **volume écoulé : dans la fourchette [3 400 ; 3 600] Mm³**, autour d'une valeur moyenne de 3 500 Mm³ (**sur 6 jours**, du 1^{er} déc. au 6 déc.).

*Ségonaux : lit majeur entre Tarascon et Arles limité par les endiguements (en particulier voie ferrée)

Annexe 1

**Rhône à Beaucaire-Tarascon le 03/12/2003
Examen des 3 jaugeages ADCP CNR en montée de crue**

Jaugeage à 9 h 24					jaugeage à 10 h 14					jaugeage à 12 h 31					
6 traversées					8 traversées					6 traversées					
heure début	débit brut	débit corrigé	Section	vitesse moy	heure début	débit brut	débit corrigé	Section	vitesse moy	heure début	débit brut	débit corrigé	Section	vitesse moy	
09:11	10280	10557	4985	2.06	09:49	10575	10861	5050	2.09	12:14	10321	10600	5078	2.03	
09:15	10381	10662	5098	2.04	09:54	10767	11057	5139	2.10	12:19	11266	11570	5170	2.18	
09:22	10966	11262	5020	2.18	10:00	10338	10617	5035	2.05	12:27	10427	10709	5039	2.07	
09:26	10855	11149	5171	2.10	10:05	10841	11133	5153	2.10	12:33	11120	11421	5133	2.17	
09:32	10229	10505	4997	2.05	10:12	10448	10730	5053	2.07	12:42	10361	10641	4970	2.08	
09:37	10856	11149	5122	2.12	10:17	10759	11050	5135	2.10	12:49	11065	11363	5134	2.16	
					10:28	10771	11062	5031	2.14						
					10:39	10122	10396	5017	2.02						
MOYENNES					MOYENNES					MOYENNES					
Section et Vitesse calculées					Section et Vitesse calculées					Section et Vitesse calculées					
09:23		10881		5066		2.09		10:10		10863		5077		2.08	
				5044		2.16						11051		5087 2.11	
								5057		2.15				5114 2.16	

Après suppression des mesures "extrêmes"															
Jaugeage à 9 h 24					jaugeage à 10 h 14					jaugeage à 12 h 31					
6 traversées					8 traversées					6 traversées					
heure début	débit brut	débit corrigé	Section	vitesse moy	heure début	débit brut	débit corrigé	Section	vitesse moy	heure début	débit brut	débit corrigé	Section	vitesse moy	
09:11	10280	10557	4985	2.06	09:49	10575	10861	5050	2.09	-----	-----	-----	-----	-----	
09:15	10381	10662	5098	2.04	09:54	10767	11057	5139	2.10	12:19	11266	11570	5170	2.18	
-----	-----	-----	-----	-----	10:00	10338	10617	5035	2.05	12:27	10427	10709	5039	2.07	
09:26	10855	11149	5171	2.10	10:05	10841	11133	5153	2.10	12:33	11120	11421	5133	2.17	
09:32	10229	10505	4997	2.05	10:12	10448	10730	5053	2.07	12:42	10361	10641	4970	2.08	
09:37	10856	11149	5122	2.18	10:17	10759	11050	5135	2.10	12:49	11065	11363	5134	2.16	
					10:28	10771	11062	5031	2.14						
					-----	-----	-----	-----	-----						
MOYENNES					MOYENNES					MOYENNES					
Section et Vitesse calculées					Section et Vitesse calculées					Section et Vitesse calculées					
09:24		10804		5075		2.14		10:06		10930		5085		2.16	
				5044		2.14						11141		5089 2.18	
								5057		2.16				5114 2.18	