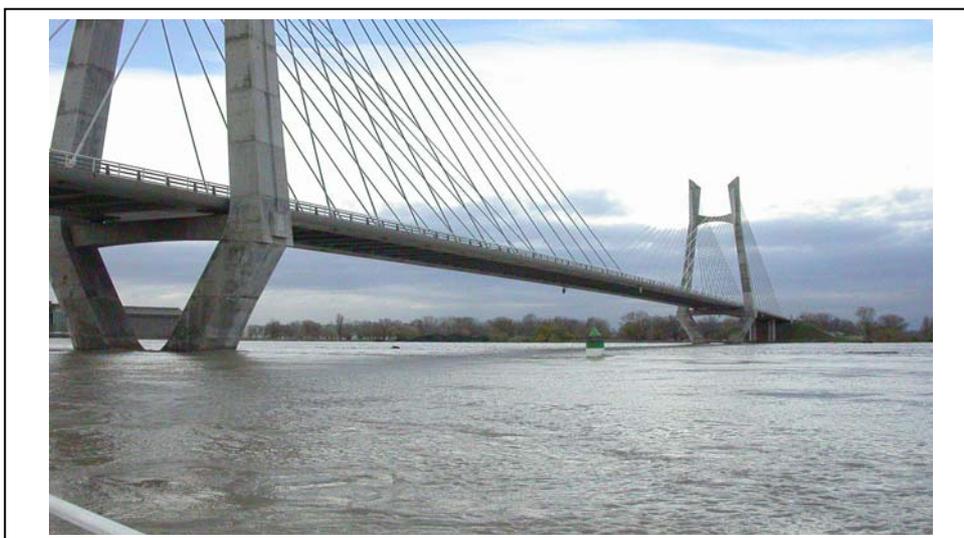


***Conférence de consensus sur le débit du Rhône à  
Beaucaire pour la crue de Décembre 2003***

**CONTRIBUTION CNR**



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

**Pièce 2**

**Evaluation de la crue de décembre 2003 – Analyse hydrométrique**

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

## Contribution CNR

### Pièce 2

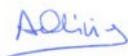
#### Evaluation de la crue de décembre 2003 – Analyse hydrométrique

#### Unité réalisatrice **COMPAGNIE NATIONALE DU RHONE**

Département Laboratoire d'Essais – Mesures - Contrôles  
4, Rue de Chalon sur Saône  
69007 LYON

**Rapport**                      Définitif

#### Contrôle qualité

	Nom	Date	Signature
Réalisé par	A. OLIVIER	le 15 juin 2005	
Vérifié par	G. PIERREFEU	le 15 juin 2005	
Approuvé par	M. SCOTTI	15 juin 2005	

#### Historique du document

Indice	Date	Désignation de la révision
0	02 juin 2005	Création du document
a	15 juin 2005	Mise en forme

# SOMMAIRE

<b>1 MESURES ET OBSERVATIONS HYDROMETRIQUES SUR LE RHONE ET SES AFFLUENTS</b> .....	<b>7</b>
1.1 RESEAU DE MESURE .....	7
1.2 HISTORIQUE DES STATIONS .....	8
1.3 MESURES ET MATERIELS ASSOCIES.....	10
1.3.1 <i>Mesure de niveaux : limnimètres à enregistrement automatique et échelles limnimétriques</i> .....	10
1.3.2 <i>Mesures de débit en continu : stations ultrasons</i> .....	11
1.3.3 <i>Mesure de débit ponctuel : jaugeages</i> .....	12
1.4 LES EQUIPES ET LEURS METHODES DE TRAVAIL .....	18
1.5 EXPERIENCE DE LA CNR AUPRES DE CLIENTS EXTERNES.....	19
<b>2 INCERTITUDES SUR LES MESURES</b> .....	<b>21</b>
2.1 LES METHODES DE JAUGEAGE .....	22
2.1.1 <i>La mesure du niveau du plan d'eau</i> .....	22
2.1.2 <i>La mesure de débit au moulinet</i> .....	23
2.1.3 <i>La mesure de débit à l'ADCP</i> .....	25
2.2 INCERTITUDE SUR LES MESURES DE NIVEAUX .....	27
2.3 INCERTITUDE SUR LES MESURES DE DEBIT .....	27
2.3.1 <i>Incertitude des mesures au moulinet</i> .....	28
2.3.2 <i>Incertitude des mesures à l'ADCP</i> .....	29
2.3.3 <i>Bilan sur les incertitudes de mesure de débit</i> .....	33
2.3.4 <i>Incertitude des débits issus des courbes hauteur – débit</i> .....	33
<b>3 CRITIQUE ET ANALYSE DES DONNEES</b> .....	<b>37</b>
3.1 TRAITEMENT DE LA DONNEE THALIE .....	37
3.2 GESTION DES STATIONS HYDROMETRIQUES ET VALIDATION DES DONNEES ACTUELLES .....	38
3.3 ANALYSE CRITIQUE DES DONNEES HISTORIQUES .....	39
3.3.1 <i>Etude globale</i> .....	39
3.3.2 <i>Etudes diverses</i> .....	40
<b>4 ANALYSE ET EVOLUTION DE LA COURBE DE TRANSFORMATION HAUTEUR-DEBIT DE VIVIERS</b> .....	<b>42</b>
<b>5 ANALYSE ET EVOLUTION DE LA COURBE DE TRANSFORMATION HAUTEUR-DEBIT DE BEUCAIRE</b> .....	<b>44</b>
5.1 HISTORIQUE DE LA STATION HYDROMETRIQUE DE BEUCAIRE-TARASCON (PK 269.600) ...	46
5.2 CONFIGURATION DU RHONE A L'AVAL DE LA STATION HYDROMETRIQUE DE BEUCAIRE – TARASCON (PK 269.600).....	46
5.2.1 <i>Profils du Rhône au droit des stations de jaugeage de Beaucaire</i> .....	47
5.2.2 <i>Evolution des fonds et des endiguements à l'aval de Beaucaire</i> .....	52
5.2.3 <i>Recherche d'un éventuel effet raquette à partir des jaugeages</i> .....	56
5.2.4 <i>Impact du nouveau pont routier sur la courbe de Beaucaire</i> .....	58
5.2.5 <i>Bilan</i> .....	58
5.3 CONSTRUCTION ET VALIDITE DE LA COURBE AVANT LA CRUE DE DECEMBRE 2003.....	59

5.4	ANALYSE HYDROMETRIQUE DE LA PARTIE HAUTE DE LA COURBE APRES DECEMBRE 2003 .....	63
5.4.1	<i>Estimation d'un débit de pointe à partir des jaugeages et de la courbe préexistante .....</i>	<i>63</i>
5.4.2	<i>Analyse des mesures hydrométriques de décembre 2003.....</i>	<i>65</i>
5.4.3	<i>Impact des jaugeages de 2003 sur la courbe : courbe proposée par la CNR immédiatement après la crue de décembre 2003 .....</i>	<i>68</i>
5.5	ANALYSE STATISTIQUE DE LA PARTIE HAUTE DE LA COURBE .....	71
5.6	COURBE DE TRANSFORMATION HAUTEUR-DEBIT PROPOSEE .....	78
5.6.1	<i>Courbe de transformation hauteur-débit proposée .....</i>	<i>78</i>
5.6.2	<i>Débit de la crue de 2003 issu de la nouvelle relation Q(h) (hors effets de brèches).....</i>	<i>79</i>
5.7	INFLUENCE DES BRECHES DU PETIT-RHONE.....	80
<b>6</b>	<b>LA DEMARCHE QUALITE.....</b>	<b>84</b>
6.1	PRINCIPE ET INTERET DE LA DEMARCHE .....	84
6.2	RESEAU DE MESURE HYDROMETRIQUE.....	84

ANNEXE A	<i>Réseau d'observation Thalie</i>
ANNEXE B	<i>Historiques stations : Ternay, Valence, Viviers, Beaucaire</i>
ANNEXE C	<i>Organisation de l'activité Hydrométrie</i>
ANNEXE D	<i>Etude des coefficients de surface sur le Rhône et ses affluents, CNR</i>
ANNEXE E	<i>Photos du nouveau pont de Beaucaire (PK 269.600) pendant la crue</i>

## DOCUMENTS DE REFERENCE

Contribution CNR ANNEXE II	<i>Détermination du débit avec un ADCP</i>
Contribution CNR ANNEXE III	<i>Influence d'un fond mobile sur un jaugeage ADCP – Prise en compte de ce phénomène dans le dépouillement d'un jaugeage à l'ADCP par la CNR</i>
Contribution CNR ANNEXE IV	<i>« Estimation des incertitudes de mesure des débits issus d'un jaugeage au moulinet ou à l'ADCP », CETIAT</i>
Contribution CNR ANNEXE V	<i>« Estimation des incertitudes des débits calculés à partir des relations hauteur/débit », CETIAT</i>
Contribution CNR ANNEXE VI	<i>Historique de l'aménagement du fleuve – Palier d'Arles – 1967 – 1973</i>
Contribution CNR ANNEXE VII	<i>Evolution des fonds du Rhône en aval de Beaucaire – Hydrographie</i>

## Présentation de l'étude hydrométrique et principales conclusions

En tant que gestionnaire du Rhône, la CNR surveille le débit de ce fleuve grâce à un réseau hydrométrique constitué d'environ 150 stations de mesures. La majorité de ces stations mesure et enregistre un niveau d'eau. Ces données sont centralisées au siège de la Compagnie et sont ensuite traduites en débit par l'intermédiaire de courbes de transformation hauteur-débit. Ces dernières sont construites à partir des couples hauteur-débit issus de jaugeages au moulinet ou à l'ADCP.

Le **chapitre 1** de ce rapport présente le réseau d'observation du Rhône ainsi que le matériel de mesure et les équipes dédiées à l'activité hydrométrie de la CNR.

Les moulinets sont étalonnés, notamment par l'OFEG, et l'ADCP est vérifié par comparaison avec le moulinet. Début 2003, elle a initié une démarche visant à estimer les incertitudes de mesure de son matériel de jaugeage. Ceci a fait l'objet de diverses études au sein de la CNR et par des bureaux d'études spécialisés. Il convient notamment de retenir deux études réalisées par le CETIAT (Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques) pour le compte de la CNR, études correspondant aux annexes IV et V de la Contribution CNR à la conférence de consensus sur le débit du Rhône à Beaucaire pour la crue de décembre 2003.

Les principales conclusions des analyses conduites par la CNR et le CETIAT sur le sujet des incertitudes de mesure sont présentées dans le **chapitre 2** et dans le **paragraphe 5.5** de ce rapport. Elles indiquent que dans de bonnes conditions hydrauliques, on peut légitimement penser que :

- L'ADCP converge vers une incertitude de l'ordre de  $\pm 5 \%$  ;
- Le moulinet converge vers une incertitude de l'ordre de  $\pm 7 \%$  (jaugeage complet avec six points par verticale) ;
- La courbe résultante sur l'exemple de la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600) présente une incertitude comprise entre  $\pm 10 \%$  et  $\pm 14 \%$ .

Le **chapitre 3** est centré sur le traitement des données enregistrées en continu par le réseau d'observation du Rhône de la CNR. Il présente les méthodes de critique, de gestion et de validation de ces données. Une partie de ces données est directement enregistrée puis transmise au siège de la CNR à Lyon via un réseau téléphonique. C'est notamment le cas des mesures de niveau. Une autre partie correspond à des données issues du traitement des mesures. C'est le cas des débits calculés à partir des courbes de transformation hauteur-débit. Ainsi, en plus de la validité des mesures, il est aussi nécessaire d'examiner la validité des courbes de transformation hauteur-débit.

La courbe de transformation hauteur-débit de Viviers (PK 166.500) est présentée dans le **chapitre 4**. Cette courbe ne fait pas l'objet de discussions suite à la crue de décembre 2003. Elle est toutefois brièvement présentée car la station de Viviers est la première station en amont de Beaucaire où l'on mesure le débit du Rhône total.

Dans le cadre de la crue exceptionnelle de décembre 2003 à Beaucaire, la CNR a pu réaliser une campagne avec de nombreuses mesures, ce qui l'a conduit à s'interroger de manière très approfondie sur la relation hauteur-débit de la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600), notamment pour la gamme des hauts débits. L'analyse de l'évolution de cette courbe est présentée dans le **chapitre 5**.

Après analyse, il a été constaté que les jaugeages effectués au droit de cette station pendant la crue de décembre 2003 remettaient en cause la partie haute de la courbe correspondant aux débits supérieurs à 7 300 m<sup>3</sup>/s. Après la crue, il s'est donc avéré nécessaire de construire une nouvelle courbe de transformation hauteur-débit à la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600). Pour cela, deux analyses distinctes ont été conduites et figurent dans le **chapitre 5** de ce rapport :

- L'une à caractère purement **hydrométrique**, réalisée par la CNR. Cette analyse est basée sur l'exploitation des mesures effectuées par la CNR, notamment celles réalisées pendant la crue de décembre 2003 ;
- L'autre conduite à la demande de la CNR par le CETIAT. Elle est basée sur l'analyse **statistique** des jaugeages réalisés par la CNR depuis 1992. Pour cette analyse, plusieurs échantillons ont été construits à partir des jaugeages effectués à Beaucaire, chacun correspondant à une période différente. Parallèlement, plusieurs lois d'interpolation ont été appliquées sur ces échantillons :
  - régression linéaire ;
  - loi polynomiale de degré 2 ;
  - loi puissance ;
  - loi de Manning-Strickler.

Les lois polynomiale de degré 2 et de Manning-Strickler sont satisfaisantes d'un point de vue statistique car la distribution de leurs résidus est aléatoire ce qui constitue une condition indispensable pour apprécier la pertinence d'une loi d'interpolation. La loi de Manning-Strickler est finalement conservée pour l'analyse statistique des mesures car elle correspond à une loi physique.

En confrontant l'analyse hydrométrique et l'analyse statistique, la CNR propose une relation hauteur-débit à la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600). Les résultats des courbes issues des diverses analyses conduisent à un débit compris entre 11 500 m<sup>3</sup>/s et 12 000 m<sup>3</sup>/s pour une cote de 11,30 m NGF (ortho) à la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600) (cf. Tableau en page 79). Cependant, **une courbe ne se suffit pas à elle-même pour estimer le débit maximal de la crue de décembre 2003**. En effet, pour le déterminer, il convient aussi de tenir compte des modifications des conditions hydrauliques avals pendant la crue. Ces conditions sont présentées à la fin du **chapitre 5** et dans l'analyse hydraulique conduite par ailleurs.

# 1 Mesures et observations hydrométriques sur le Rhône et ses affluents

## 1.1 Réseau de mesure

La CNR gère un réseau d'observations hydrométriques d'environ 150 stations de mesures pouvant mémoriser les niveaux du Rhône et de ses affluents à chaque instant (cf. ANNEXE A). Ce nombre ne tient pas compte des points de mesures de niveaux dédiés spécifiquement à la conduite des aménagements (usines et barrages).

Les stations de ce réseau de mesure sont classées en trois catégories :

- Première catégorie : les stations stratégiques qui sont suivies en priorité ;
- Deuxième catégorie : les stations de contrôle et de secours pour lesquelles la maintenance sur site est assurée en priorité 2 par rapport aux stations de la première catégorie ;
- Troisième catégorie : les stations qui sortent des catégories 1 et 2.

Les stations stratégiques sont actuellement au nombre de 80 dont 47 sur le Rhône et 33 sur les affluents. Les valeurs de débit sont principalement issues de mesures de niveaux transformées en débits à partir de courbes de transformation hauteur-débit. Ces courbes sont actualisées régulièrement grâce à des opérations de jaugeages. Parmi ces stations, 5 donnent directement la valeur du débit à l'aide de capteurs ultrasons qui fonctionnent selon la méthode du temps de transit d'une onde sonore (cf. 1.3.2).

Dans tous les cas, une station de mesure se compose au moins d'une échelle limnimétrique implantée sur la berge et d'un capteur de niveau (cf. 1.3.1). L'échelle limnimétrique permet la lecture directe du niveau d'eau par un observateur. Elle permet de contrôler régulièrement la conformité des informations acquises sur site par le capteur. Ce capteur, relié à une centrale d'acquisition, permet l'enregistrement continu de l'évolution de la cote du plan d'eau. Ces données sont téléchargées depuis un serveur implanté au siège de la CNR à Lyon via le réseau téléphonique. Les capteurs sont en général des capteurs de pression (80% sont du type bulle à bulle), mais certaines stations sont équipées de flotteurs ou de sondes piézométriques.

Les données sont donc acquises régulièrement et automatiquement sur site et transmises à la base de données centrale installée au siège de la CNR à Lyon. La fréquence de prélèvement varie en fonction des caractéristiques du site : d'un téléchargement par heure à un téléchargement par jour. Ces données sont traitées immédiatement par le logiciel THALIE (Traitements Hydrologiques Acquisitions Limnimétriques et Enregistrements) qui regroupe l'ensemble des données hydrométriques : cotes, débits, jaugeages, courbes de transformation de hauteur d'eau en débit, ...

Toutes les données collectées ou calculées sont ensuite critiquées et validées selon des procédures bien définies. Ces dernières sont établies dans le cadre de

la démarche qualité pour laquelle la CNR est certifiée ISO 9001 version 2000 (cf . chapitres 3 et 6).

Le réseau hydrométrique est entièrement géré par des équipes de la CNR qui assurent la surveillance, la maintenance et le suivi des stations de mesures.

## 1.2 Historique des stations

Des échelles limnimétriques ont été installées depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle pour mesurer les niveaux du Rhône. Les données antérieures à 1940 proviennent des observations hydrométriques des services des Ponts & Chaussées. Ces données correspondaient à des relevés de trois cotes par jour à des heures fixes, soit 7h, 12h et 17h. La fréquence passe à une cote par heure en période de crue.

Depuis les années 1940, les échelles limnimétriques ont été reprises et suivies par la CNR. Les enregistrements de données vont alors devenir plus fréquents pour atteindre l'acquisition instantanée des valeurs caractéristiques. La CNR a eu besoin de plus de données en vue de la construction de ses aménagements hydroélectriques sur le fleuve. A ce titre, elle a modernisé les stations hydrométriques existantes et en a créé de nouvelles.

A partir des années 1990, la CNR se dote d'un logiciel d'acquisition et de traitement automatique des données THALIE qui permet la collecte, le traitement en temps réel ou en différé et l'archivage de la donnée dans une base de données centralisée.

Grâce à ce suivi, des chroniques de débits historiques ont été poursuivies sur plusieurs stations sur le Rhône et le sont encore. Des séries de données hydrologiques conséquentes ont été constituées sur les stations de référence du Rhône. Elles comprennent :

- Des débits maximaux annuels disponibles depuis la moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle ;
- Des débits moyens journaliers dont la majorité des chroniques débutent en 1920 ;
- Des débits au pas de temps horaire et instantané depuis le début des années 1990 correspondant à la mise en place de l'actuel réseau hydrométrique télétransmis de la CNR.

Sur le Rhône en aval de Lyon, les quatre plus anciennes stations hydrométriques sont celles de Ternay, Valence, Viviers et Beaucaire. Ce sont les stations de référence sur le Bas-Rhône qui mesurent le débit total du fleuve dans ces secteurs. L'historique détaillé de ces quatre stations se trouve en ANNEXE B.

L'emplacement des échelles limnimétriques de ces stations de référence a évolué au cours du siècle dernier en particulier lors des mises en eau des aménagements du Rhône. Cependant l'apport des bassins versants intermédiaires, entre les anciennes et les nouvelles échelles, peut être considéré comme négligeable et permet d'obtenir des séries de débits homogènes qui constituent les chroniques historiques de débit de ces stations.

Ainsi, la chronique de débits de la station de Ternay (PK 15,2 RG) comprend celles des stations historiques de La Mulatière et de Givors.

La station de Valence n'a quasiment pas évolué géographiquement.

La chronique de débits de la station de Viviers (PK 166,5 RG) comprend celles des stations historiques de Le Teil et de Joviac.

La chronique de débits de la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269,600 RG) comprend celle de la station historique de Pont de Beaucaire (PK267.700).

**N.B.** : Lors de la mise en eau des aménagements, les chroniques de débits de certaines stations n'ont pas pu être maintenues de par l'emplacement géographique du point de mesure. C'est le cas de la station d'Avignon : le suivi des débits à l'échelle historique située au PK 242,200 (Pont Daladier) a été abandonnée en 1973, année de mise en service de l'aménagement d'Avignon. Son emplacement au droit du Pont Dalladier, situé dans le bras d'Avignon en aval du barrage-centrale de Sauveterre, ne permettait plus de déterminer le débit total du Rhône dans ce secteur. Aucune échelle ne pouvait remplacer le site de mesure historique, les apports intermédiaires n'étant pas négligeables. Il a été impossible pour la CNR de continuer à suivre une chronique homogène et continue. De ce fait la courbe de transformation hauteur-débit n'est plus suivie par la CNR aujourd'hui, la dernière loi  $Q(H)$  établie date de plus de 30 ans (20 mars 1967).

En ce qui concerne les courbes de transformation hauteur-débit, elles ont été élaborées à partir de méthodes empiriques jusqu'en 1890 puis n'ont cessé d'être améliorées et affinées à partir des mesures de jaugeages. Parallèlement, les techniques de jaugeages ont elles aussi évolué dans des proportions considérables.

Les premiers jaugeages, dans les années 1890, étaient réalisés à l'aide d'un flotteur permettant d'estimer les vitesses de surface de l'écoulement. A partir des années 1920, le moulinet a été utilisé pour des jaugeages en basses et moyennes eaux. En 1945, la Compagnie réalise les premiers essais de jaugeages en crue avec moulinet et trille (câble aérien qui retient et guide le moulinet pendant sa traversée). Une quinzaine de trilles seront installées sur le Rhône et ses affluents par la CNR jusqu'en 1960. Puis, dans les années 1980 à 1990, les stations de jaugeage par téléphérique seront automatisées.

En 1994 la CNR se dote de l'ADCP (profileur de courant à effet doppler) pour effectuer ses jaugeages. Enfin, en 2002, les équipes hydrométriques de la CNR acquièrent un DGPS afin de préciser les mesures réalisées avec l'ADCP et apprécier un éventuel mouvement des fonds de nature à sous-estimer le débit mesuré.

## 1.3 Mesures et matériels associés

Comme évoqué en 1.1, la CNR dispose de matériel pour surveiller le Rhône en temps réel via son réseau hydrométrique. Elle dispose également de matériel pour vérifier la validité des mesures réalisées par ce réseau de surveillance : échelles limnimétriques et appareils de jaugeage. L'objet du paragraphe 1.3 est de présenter ces équipements.

### 1.3.1 Mesure de niveaux : limnimètres à enregistrement automatique et échelles limnimétriques

Les limnimètres permettent de mesurer le niveau de l'eau. L'essentiel des appareils de la CNR fonctionnent à partir d'un système dit bulle-à-bulle. Le principe de cet appareil est le suivant. Un débit constant de gaz sous pression circule dans une canalisation qui débouche au fond du cours d'eau par une prise de pression ouverte. Cette prise de pression ouverte est communément appelée sonde immergée. Le limnimètre expulse une quantité constante de gaz dont la pression d'expulsion est proportionnelle à la hauteur d'eau à la verticale de la sonde. Les variations de pression causées par les changements de niveau d'eau sont ainsi mesurées. Connaissant le calage altimétrique de cette sonde, le limnimètre en déduit une mesure de niveau.

Les techniciens CNR contrôlent régulièrement les limnimètres par comparaison avec la lecture à l'échelle limnimétrique située à la même station. L'heure d'enregistrement est également contrôlée en même temps.

Si l'écart entre les deux mesures est supérieur à 2 cm, le limnimètre est recalé. L'écart toléré est de 10 cm en période de crue pour des conditions favorables de lecture d'échelle. Si le batillage est fort, il se peut que le recalage ne soit pas effectué mais examiné a posteriori.

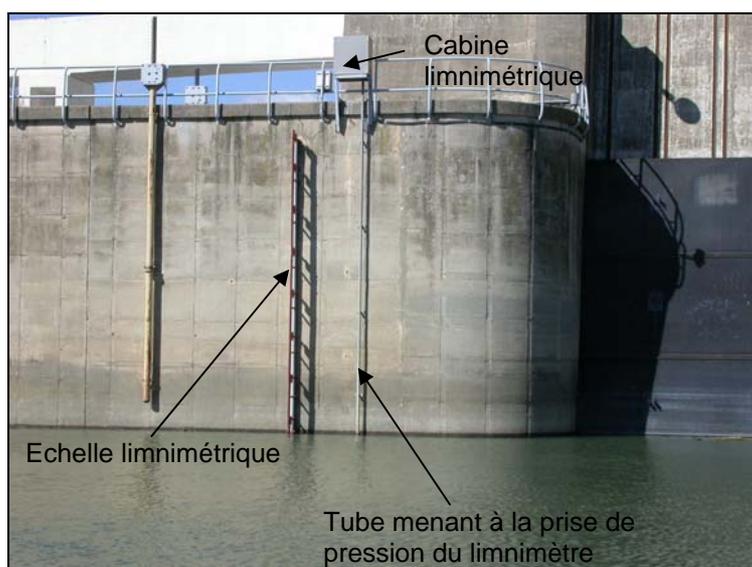


Figure 1 : Station limnimétrique de C.N.A.R.B.R.L. (PK 277.300)

### 1.3.2 Mesures de débit en continu : stations ultrasons

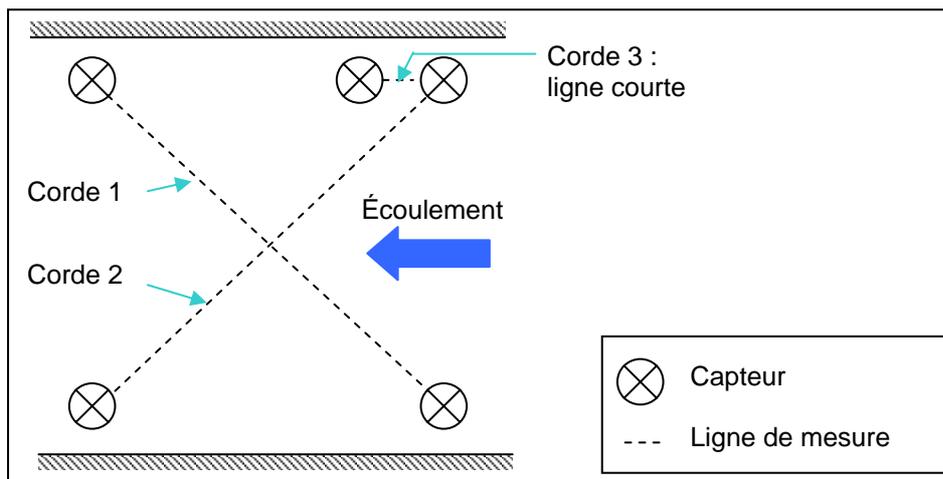
La CNR possède cinq stations à ultrasons sur son réseau de mesures (Savières, Perrache, Chusclan, Arles et Fourques). Ces stations sont composées d'une station limnimétrique et d'au moins deux capteurs ultrasonores : un émetteur et un récepteur. Le principe de mesure est de déterminer le temps de transit nécessaire à l'onde émise par le premier capteur pour arriver au second, placé plus en aval de l'écoulement. Soit les capteurs sont placés sur la même rive et on a une corde de mesure dite réfléchi. Soit les capteurs sont placés sur chaque rive. La corde de mesure est alors dite directe. Le temps de transit permet alors de déterminer la direction et la vitesse de l'écoulement au droit de la station sur cette corde de mesure.

Par une étude préalable, et des jaugeages réguliers de contrôle, il est possible d'accéder à la vitesse moyenne de l'écoulement à partir de la vitesse sur une ligne de mesure. La connaissance de la section mouillée déterminée à partir d'un niveau limnimétrique permet d'accéder au débit. Le débit est donc fonction du niveau et des vitesses mesurées. Cette relation est paramétrée dans l'appareil qui restitue ainsi le débit.

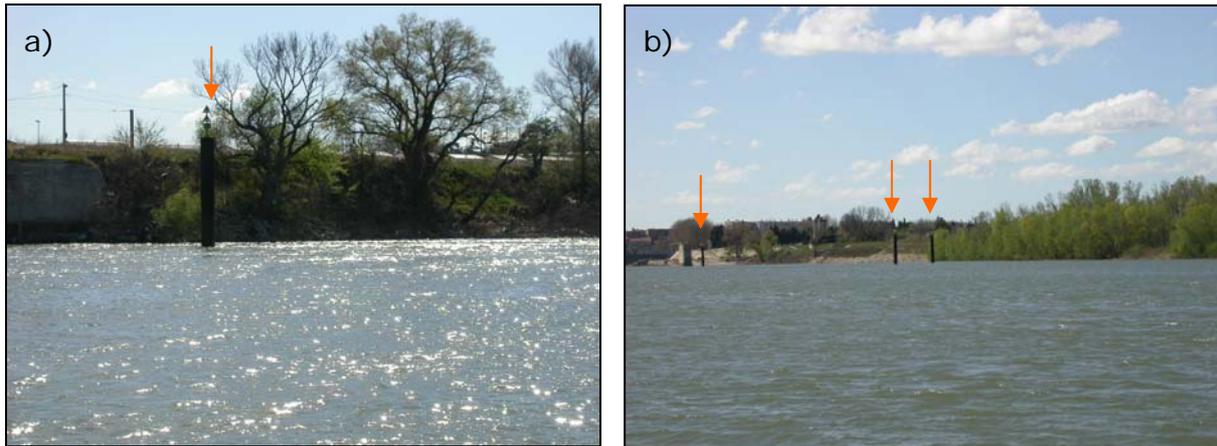
Des jaugeages à l'ADCP ou au moulinet sont effectués régulièrement au droit de ces stations afin de valider les mesures affichées par la station.

*Exemple de la station ultrasons d'Arles :*

Pour cette station, il y a six capteurs. Ceci permet de faire deux mesures en travers de l'écoulement (cordes 1 et 2). Pour le cas où ces traversées ne fonctionnent pas, une troisième corde est installée parallèlement à une des berges (cf. Figure 2). Cette corde est appelée ligne courte. Elle permet de réaliser une mesure de vitesse moyenne en bord, qui est ensuite extrapolée à la section de mesure. Cette ligne courte n'est utilisée qu'en cas de défaillance des cordes 1 et 2. C'est le cas, par exemple, si le taux de matière en suspension est trop important pour que les mesures sur les cordes 1 et 2 soient possibles.



**Figure 2 : Principe de la station ultrasons d'Arles**



**Figure 3 : Station ultrasons d'Arles (PK 281.700) – Illustration**  
 a) Rive gauche : un poteau support d'un capteur (le deuxième étant immergé)  
 b) Rive droite : trois poteaux chacun support d'un capteur

### **1.3.3 Mesure de débit ponctuel : jaugeages**

Des opérations de jaugeages sont régulièrement réalisées pour établir et vérifier les courbes de transformation hauteur-débit au niveau d'une station. Dans la mesure du possible, les jaugeages sont réalisés pour toutes les gammes de débits du Rhône et de ses affluents. La plage des débits jaugés va des faibles débits en étiage aux plus forts débits de crue sur des évènements hydrologiques intenses. L'objectif est d'avoir des courbes de transformation hauteur-débit valides sur toute la gamme de débit du cours d'eau.

Un jaugeage consiste à mesurer, chaque fois que cela est possible, le champ de vitesses dans une section en travers du fleuve. Ainsi, les vitesses élémentaires associées aux sections correspondantes permettent d'obtenir les débits élémentaires dont la somme produit le débit total. Actuellement, la CNR utilise deux types d'appareils pour mesurer les champs vitesses : le moulinet et l'ADCP (profileur de courant à effet Doppler).

Les équipes CNR dédiées à l'hydrométrie réalisent entre 200 et 300 jaugeages par an, toutes méthodes confondues, sur l'ensemble du bassin du Rhône.

#### **1.3.3.1 Le moulinet**

Le moulinet est fixé sur une perche ou à l'extrémité d'un saumon afin d'être stabilisé. Selon les conditions d'écoulement, trois types de moulinets sont utilisés actuellement à la CNR :

- C31 OTT monté sur saumon et déplacé avec un treuil depuis une barque, un téléphérique ou une cyclopotence ;
- Micro-moulinet C2 OTT monté sur une perche tenue à la main ;
- Courantomètre Nautilus C2000 Moulinet électromagnétique monté sur une perche tenue à la main.

Le micro-moulinet C2 OTT et le courantomètre Nautilus sont utilisés quand les vitesses d'écoulement sont faibles (<1 m/s). Le courantomètre Nautilus est notamment utilisé pour de très faibles vitesses (quelques mm/s) ou en présence de beaucoup d'algues. Ces dernières peuvent en effet fausser la mesure au micro-moulinet en gênant sa rotation. Ceci peut arriver dans les contre-canaux et certains affluents. L'inconvénient du courantomètre Nautilus est l'impossibilité de l'utiliser à proximité d'un milieu ferreux (palplanches ou béton armé par exemple). Qu'il s'agisse du micro-moulinet ou du Nautilus, ils sont fixés au bout d'une perche, que l'on tient debout dans l'eau en pantalon de pêche ou à partir d'une embarcation.

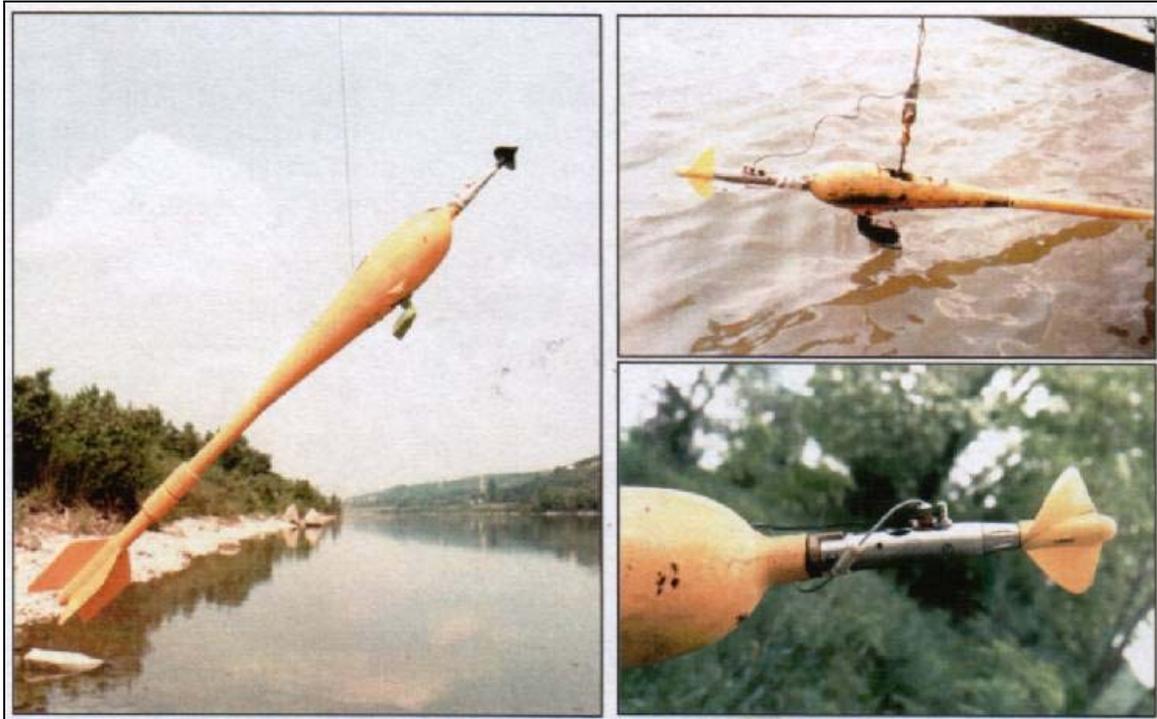
Pour des grandes vitesses et des grandes sections, un moulinet C31 OTT est utilisé monté sur un saumon dont le poids varie de 20kg à 130kg en fonction des vitesses mesurées. Il existe quatre techniques de jaugeage avec moulinet et saumon :

- La cyclo-potence à partir d'un pont ;
- La station téléphérique ;
- Le bateau stabilisé avec une traîlle ;
- Le bateau stabilisé au moteur, mais cette technique n'est à utiliser que si les autres sont impossibles.

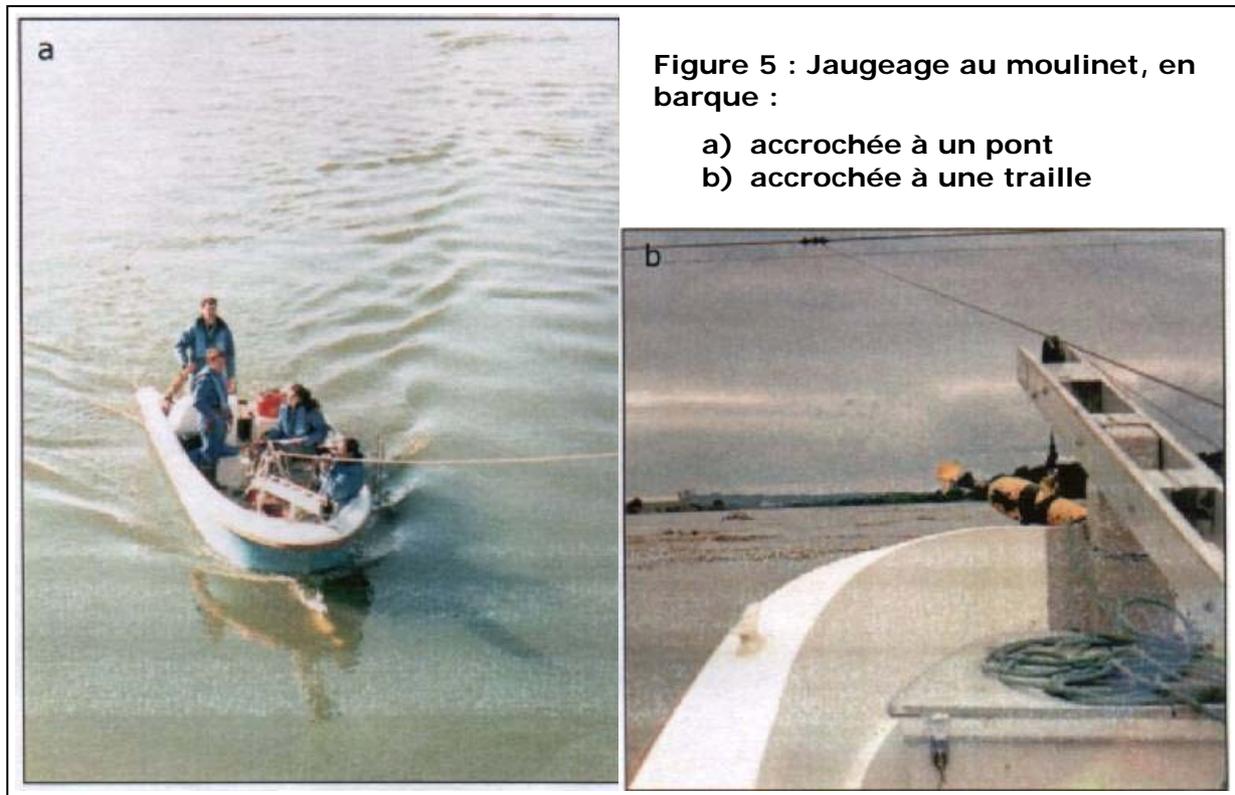
Ces diverses techniques de jaugeage sont illustrées sur la Figure 4 et la Figure 5.

Les moulinets à hélices ou électromagnétiques possèdent leur fiche d'étalonnage propre. Une campagne générale d'étalonnage de tous les moulinets a été réalisée en octobre 2003. Chaque instrument a une fiche de vie et un certificat d'étalonnage, les fiches de vie indiquant la date des étalonnages et la durée de validité. Les hélices plastiques sont détruites après la période de validité de leur étalonnage (soit 3 ans). Les hélices métalliques sont renvoyées chez le fournisseur pour re-étalonnage après 20 jaugeages ou après un choc ayant engendré un défaut visible par le jaugeur. Les moulinets électromagnétiques sont vérifiés par comparaison avec des mesures réalisées avec un micro-moulinet récemment étalonné.

Les hauteurs et longueurs des treuils des stations de jaugeages sont vérifiées tous les cinq ans par les équipes topographiques de la CNR.



**Figure 4 : Moulinet C31 monté sur saumon**



**Figure 5 : Jaugeage au moulinet, en barque :**

- a) accrochée à un pont
- b) accrochée à une traille

### **1.3.3.2 L'ADCP**

L'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) permet d'obtenir directement une valeur de débit à partir de mesures basées sur l'effet Doppler (cf. Contribution CNR ANNEXE II). Des ondes acoustiques sont émises par l'intermédiaire de quatre transducteurs. Elles permettent de mesurer la vitesse – par effet Doppler – des éléments en suspension (zooplancton, particules) qui se déplacent à la même vitesse que l'eau.

Le principe de la mesure du débit avec l'ADCP peut se comparer à celui de la mesure avec un moulinet : la section du cours d'eau est décomposée en profils verticaux de vitesses, pour lesquelles un débit élémentaire est calculé. L'ADCP est fixé sur une embarcation qui effectue une traversée complète d'une berge à l'autre (cf. Figure 6). Lors de cette traversée, de nombreuses verticales (une verticale est composée de plusieurs mesures de vitesses) sont réalisées. Le débit total est alors la somme des débits élémentaires.

La détermination du débit dans une section est la moyenne d'au moins quatre mesures distinctes à l'ADCP. Chaque mesure fournit une valeur de débit. Si ces valeurs sont homogènes, elles sont validées et permettent de calculer le débit moyen pendant la durée du jaugeage. Les critères de validité portent sur :

- Le pourcentage de débit mesuré par rapport à l'ensemble de la section ;
- Le pourcentage de verticales validées ;
- Le déplacement du fond ;
- L'écart entre les débits mesurés à chaque traversée.

Ainsi, une mesure de débit nécessite près d'une heure à partir du moment où la mesure est initiée.

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

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



**Figure 6 : ADCP Broadband 600 kHz monté sur barque**

Tous les ADCP nécessitent d'être fixés sur une embarcation pour réaliser un jaugeage. Les ADCP Broadband sont fixés sur un bateau ou un zodiac. Le choix dépend des conditions de jaugeage (notamment des vitesses d'écoulement). Celui à 600kHz est préféré en cas de grande profondeur et grande vitesse, et celui à 1200kHz va être préféré pour des situations intermédiaires.

Le Workhorse ou le StreamPro peuvent être fixés sur des embarcations type modèle réduit ou flotteur. Ceci permet une manipulation depuis les berges ou un pont, donc sans présence humaine sur l'eau.

Le StreamPro est utilisé dans les mêmes conditions de jaugeage que le micro-moulinet, quand la section et les vitesses ont faibles : affluents, vieux Rhône et contre-canaux.

L'intérêt de l'ADCP est double :

- Au niveau de la sécurité, il ne nécessite pas d'être relié à une installation fixe par un câble (station téléphérique ou traille). En effet, en crue, les corps flottants peuvent être évités par une embarcation mobile, chose impossible avec une traille ou une station téléphérique ;
- Il permet une mesure rapide ; on peut alors observer des régimes transitoires impossibles à analyser avec les méthodes classiques au moulinet.

Ainsi depuis 1994, la CNR a réalisé plus de 1500 jaugeages avec ces appareils, soit en moyenne 150 jaugeages/an. Pour chacun de ces jaugeages, la CNR effectue au minima 4 traversées d'une berge à l'autre pour valider la mesure de débit. Ce chiffre est en général supérieur ou égal à 6. Ainsi, en 10 ans, la CNR a accumulé plus de 10 000 profils de vitesses sur le Rhône et ses affluents permettant de déterminer le débit.

Ce nombre important de mesures permet à la CNR d'avoir une expérience maîtrisée de l'utilisation de l'ADCP.

La CNR assure en permanence une veille technologique pour améliorer la qualité et la précision de la mesure par le choix d'appareils de mesure les mieux adaptés à la gestion de son réseau de stations hydrométriques. De plus, elle travaille en collaboration avec des sociétés spécialisées dans la mesure pour évaluer en permanence la précision de ces appareils de mesures (cf. chapitre 2).

Pour les jaugeages embarqués, la CNR dispose de six embarcations :

- 3 petites barques utilisées pour les petites rivières ;
- 1 Neptune (bateau à coque rigide, atout pour les crues) ;
- 1 Aigoual (bateau à coque rigide, atout pour les crues) ;
- 1 Zodiac, utilisé uniquement pour l'ADCP.

## 1.4 Les équipes et leurs méthodes de travail

Pour réaliser le suivi du réseau de mesure et effectuer les opérations de jaugeages, la CNR a une équipe hydrométrie composée d'une dizaine de personnes. Le détail de l'activité Hydrométrie de la CNR est présenté en ANNEXE C.

L'équipe de jaugeage proprement dite est constituée de cinq personnes, dont un responsable d'équipe. Ce nombre peut être porté à 7 ou 8 en sollicitant les techniciens qui sont habituellement sédentaires.

Les autres techniciens restent au bureau pour la surveillance du réseau de mesure et le traitement des données.

Lors d'interventions sur le terrain, les jaugeurs sont en contact téléphonique régulier avec les personnes restées au bureau qui surveillent le débit en temps réel grâce au réseau de surveillance Thalie. Ceci permet de déterminer les sites à privilégier pour la mesure. Ces sites à privilégier sont différents selon les conditions :

**Hors crue** : un planning de jaugeage est défini, de sorte qu'un à deux jaugeage(s) par an soit effectué sur chaque station du réseau ayant une courbe de transformation hauteur-débit à suivre.

Hors crue, tous les membres de l'équipe sont polyvalents pour effectuer les jaugeages.

Les sites privilégiés peuvent être ceux pour lesquels le débit du jour affiché par Thalie est un débit manquant sur la courbe, c'est-à-dire un débit pour lequel il n'y a pas de jaugeage justifiant la portion de courbe correspondante. Ils peuvent également être choisis pour l'importance stratégique qu'ils ont par rapport à la précision souhaitée sur la portion de courbe concernée.

**En période de crue** : tous les effectifs et moyens de jaugeage sont concentrés sur la zone de crue afin de mesurer (tant que faire se peut) les pics de crue aux différentes stations hydrométriques. Les jaugeages dans cette zone sont prioritaires.

En période de crue, un chef d'équipe expérimenté dirige les opérations sur site et est responsable de la mesure. A ce titre, il est responsable de la sécurité des techniciens intervenant sur les jaugeages, à la fois ceux qui évoluent en bateau et ceux restant à terre, ainsi que de tout ce qui a trait à la réalisation du jaugeage.

En période de crue (par exemple en septembre 2002 à Remoulins), lorsqu'il est beaucoup trop dangereux de mettre un bateau à l'eau, la priorité est alors donnée aux observations de terrain pour avoir un ordre de grandeur du débit. Une estimation de la vitesse moyenne de surface peut être faite par la méthode des corps flottants. On repère un corps flottant et on mesure le temps qu'il met pour parcourir une distance connue. On a ainsi une estimation de la vitesse moyenne de surface. Connaissant la section, on obtient alors un débit de surface,

dont on déduit un débit total par application des coefficients de surface déterminés par des campagnes précédentes.

Il est important de noter que l'équipe de jaugeage de la CNR est entièrement consacrée à cette activité. Elle réalise entre 200 et 300 jaugeages par an sur l'ensemble du bassin du Rhône et des affluents. Par conséquent, elle est très professionnelle dans ce domaine. Il s'agit de jaugeurs à part entière. Ils contrôlent les débits, les courbes de transformation hauteur-débit, approfondissent la connaissance de leurs appareils. Ils connaissent parfaitement les sites tant en crue qu'en basses eaux. Ceci leur permet de s'adapter en temps réel pour effectuer de bonnes mesures. Le responsable d'équipe a 25 ans d'expérience et fait suite à des personnes qui ont consacré leur vie professionnelle à l'hydrométrie. L'équipe entière suit continuellement l'évolution des technologies de jaugeages. Ainsi la CNR a été une des premières entreprises françaises à s'équiper de l'ADCP. Elle est même citée en référence par le constructeur de l'ADCP lors de formations pour d'autres utilisateurs.

La gestion des données hydrologiques CNR fait l'objet d'une procédure.

La traçabilité des interventions de vérification ou de maintenance des sites d'équipement de mesure est assurée par la base de données informatique développée par la CNR, *MAINTENANCE*.

## **1.5 Expérience de la CNR auprès de clients externes**

La CNR effectue des jaugeages sur le Rhône et ses affluents pour son propre compte. Elle valorise son savoir faire en réalisant des jaugeages pour le compte de clients externes. Ci-après se trouvent quelques-unes de ces principales études.

Courant 2003 et 2004, la CNR a effectué des jaugeages et des prélèvements sur la Durance à Saint-Auban pour le compte d'ANTEA. Le but était de connaître l'écoulement au droit de la station dénommée « Le Goulet ». Les débits mesurés étaient de faibles débits, compris entre 3.6 m<sup>3</sup>/s et 5.2 m<sup>3</sup>/s, avec une vitesse moyenne de 0.1 m/s. Ils ont été mesurés à l'aide d'un micro-moulinet. Afin de connaître au mieux l'écoulement, les jaugeages ont été effectués avec un maximum de verticales, et plusieurs points par verticale. Un prélèvement d'eau par point de mesure de vitesse au moulinet a été réalisé pour étudier la qualité de l'eau.

Le même type d'étude a été mené sur la Seine aval, juste en amont de la première écluse (commune de Poses). L'agence de l'eau Seine Normandie a demandé à la CNR plusieurs mesures de débit afin de quantifier la quantité de polluants transitant au niveau de la section de jaugeage. Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un contrôle de la pollution en aval de Paris, avant le rejet à la mer.

Le CEREGE a demandé à la CNR des mesures de vitesses dans le delta du Rhône pour étudier les processus sédimentaires. Ces mesures ont été effectuées en 2001 avec un ADCP. Les résultats de mesure étaient bien corrélés aux mesures de flux sédimentaires effectuées par d'autres méthodes. Les mesures de vitesses correspondaient à des débits de 1 200 m<sup>3</sup>/s, ainsi qu'à des débits supérieurs à 2 000-2 500 m<sup>3</sup>/s. Le CEREGE a aussi utilisé des données issues de jaugeages aux stations d'Arles, Fourques et Beaucaire. Le CEREGE s'est appuyé sur ces données ADCP pour faire un poster lors du colloque "Scientifique et décideurs : agir ensemble pour une gestion durable des systèmes fluviaux" qui s'est tenu à Lyon les 6,7 et 8 juin 2001. Suite à ces mesures, la CNR a participé en mars 2005 à une campagne de mesure et de prélèvement sur le Petit Rhône dans le cadre d'une thèse CEREGE – CNRS.

La CNR a également effectué des jaugeages pour le compte de la DDE 07 entre 1994 et 1999, sur l'Ardèche, les affluents de la Haute-Ardèche (la Baume, le Chassezac et la Volane), la Cance, le Doux et l'Eyrieux. Le but était de connaître les débits de l'étiage à la crue sur ces cours d'eau. Des débits faibles, moyens et forts ont été mesurés (de 0.03 m<sup>3</sup>/s au minimum sur la Cance à Annonay à 230 m<sup>3</sup>/s sur l'Ardèche au Pont de la Baume en montée de crue). Plusieurs débits en montée de crue ont pu être jaugés sur plusieurs de ces cours d'eau. La CNR a utilisé l'ADCP autant que possible, ainsi que le moulinet en cyclo-potence dans certains cas.

La DIREN de la région Picardie souhaitait installer un réseau de stations de mesures de débit à ultrasons sur différentes rivières et canaux de navigation ayant de très faibles vitesses d'écoulement. La CNR a réalisé deux campagnes de quinze jours chacune afin d'étudier la répartition des vitesses et identifier les sections les plus adaptées. Elle a mesuré de faibles débits au micro-moulinet et au moulinet électromagnétique, ainsi que quelques débits de crue avec un ADCP.

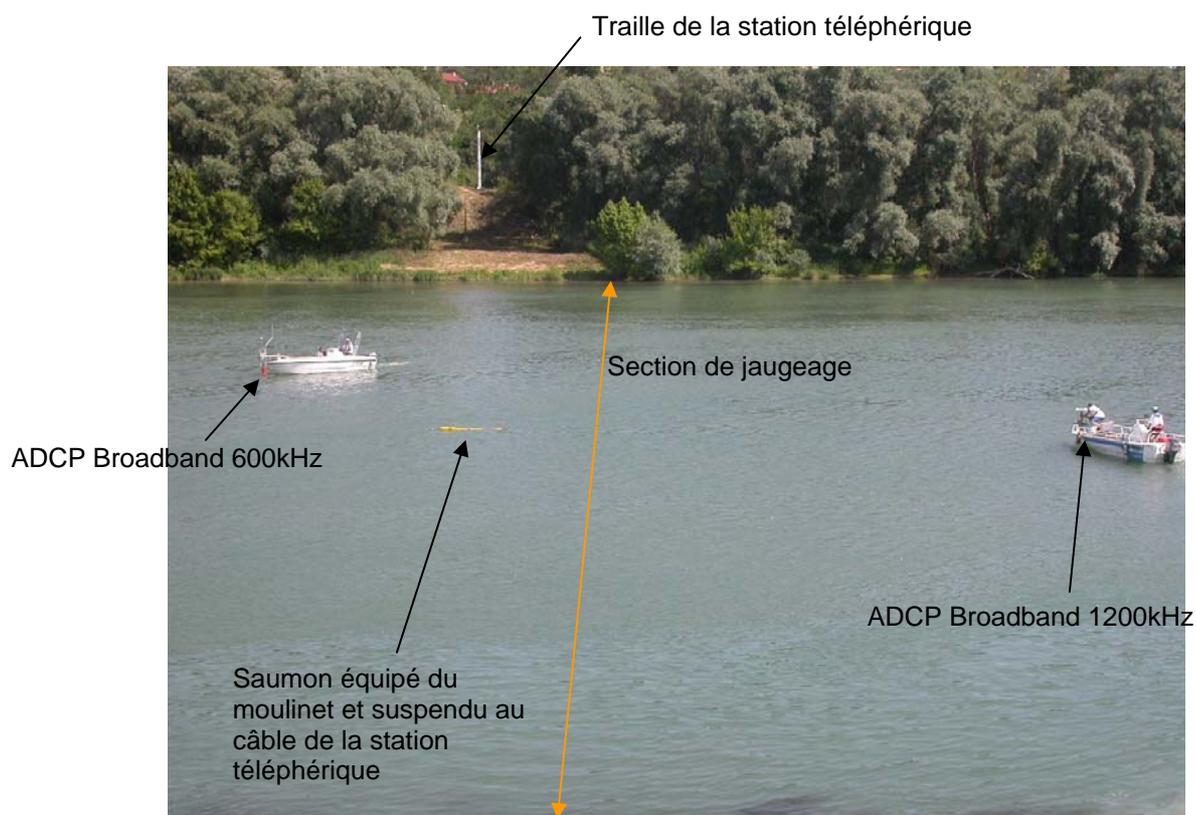
Une station de mesure de débit à ultrasons se trouve au niveau de la centrale nucléaire de Cattenom. EDF a demandé à la CNR d'effectuer des jaugeages au droit de la station à ultrasons afin d'établir des comparaisons de mesure pour valider le fonctionnement de la station à ultrasons.

Enfin, la CNR a également effectué des études pour le ministère des travaux publics du Paraguay. L'objet d'une première étude était l'installation d'un réseau de mesure sur le fleuve Paraguay. Les débits à mesurer allaient de l'étiage aux crues. Le réseau a été défini en 1998 et installé en 2000. Il a été nécessaire de réaliser une vérification par jaugeages. Pour ceci, en 1999, un ingénieur de la CNR a formé les paraguayens à l'utilisation de l'ADCP. La CNR a aussi pris part à la mise en place de 20 stations sur le Haut-Paraguay pour l'observatoire des ressources hydriques. Ces stations sont dédiées à la mesure de la qualité de l'eau.

## 2 Incertitudes sur les mesures

La CNR réalise actuellement 90% des mesures de débits à l'aide des ADCP. Le reste est réalisé à l'aide de moulinets. Néanmoins, le moulinet reste la référence pour les mesures de débits. Une norme lui est consacrée, la norme NF EN ISO 748. Aucune norme n'existe concernant l'ADCP. Régulièrement, depuis 10 ans, les équipes de jaugeage conduisent des mesures comparatives au moulinet et à l'ADCP. Dix-neuf de ces campagnes ont permis d'estimer l'incertitude de mesure d'un des ADCP de la CNR, l'ADCP Broadband 1 200 Hz. L'estimation de cette incertitude est issue d'une analyse statistique des mesures réalisées simultanément à l'ADCP et au moulinet (analyse réalisée par le C.E.T.I.A.T. pour le compte de la CNR, cf. Contribution CNR ANNEXE IV). Par ailleurs, la CNR effectue régulièrement des campagnes de mesures comparatives d'ADCP entre eux. Les résultats de ces campagnes permettent à la CNR d'appliquer le même type d'analyse pour estimer l'incertitude des ADCP autres que l'ADCP Broadband 1200kHz.

**N.B. :** On ne fait pas simultanément une mesure ADCP et un jaugeage complet au moulinet sur un seul et même bateau. En revanche on peut faire simultanément sur un même bateau une mesure à l'ADCP et un jaugeage de surface au moulinet.



**Figure 7 : Mesure comparative entre le moulinet, l'ADCP Broadband 1200 kHz et l'ADCP Broadband 600 kHz sur le Rhône à Ternay**

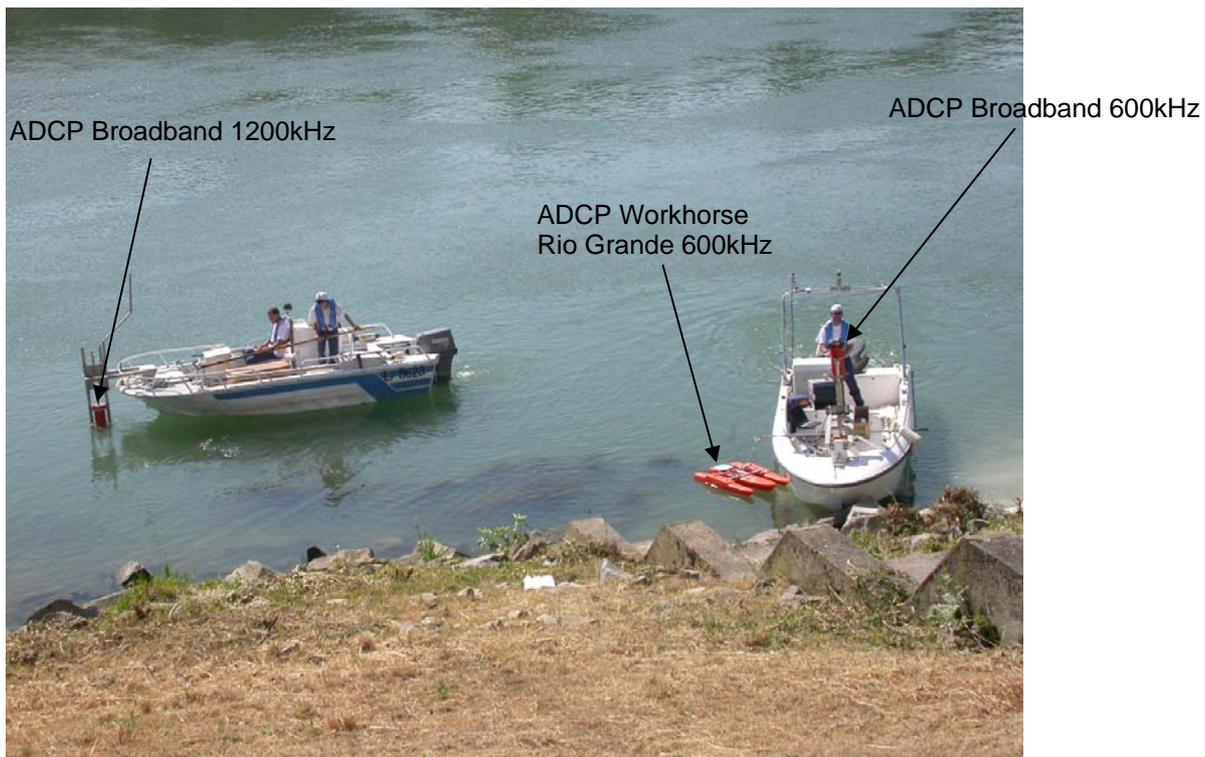


Figure 8 : Mesure comparative ADCP entre eux

## 2.1 Les méthodes de jaugeage

Afin de mieux comprendre sur quelle mesure porte la valeur d'incertitude, ci-après se trouve une brève description des méthodes de jaugeage utilisées par la CNR.

Un jaugeage est constitué d'une mesure du niveau du plan d'eau et d'une mesure de débit.

### 2.1.1 La mesure du niveau du plan d'eau

Lors d'un jaugeage, le niveau du plan d'eau est systématiquement relevé sur une échelle limnimétrique située sur la berge. **C'est cette lecture d'échelle qui permet ensuite de placer le jaugeage sur la courbe de transformation hauteur-débit, et non une mesure issue d'un limnimètre.**

Quelque soit la méthode utilisée, un jaugeage au moulinet peut durer deux, voire trois heures pour un jaugeage complet à Beaucaire par exemple. Un jaugeage ADCP peut durer une heure. Pour s'assurer que l'on associe au jaugeage une cote à l'échelle pertinente, plusieurs relevés d'échelle sont effectués pendant la durée du jaugeage (début, fin et pendant). La cote associée finalement au jaugeage dépendra de la variation de la cote au cours du jaugeage et de la répartition des débits dans la section de jaugeage. La CNR n'utilise pas de

méthode de pondération. Elle se base sur la variation de la cote durant le jaugeage :

- Soit cette variation est mineure (c'est-à-dire inférieure à 10 cm) et la cote moyenne est retenue ;
- Soit elle est importante et elle porte la marque d'un régime transitoire. Dans ce cas, le jaugeage sera déclaré douteux voir rejeté. Si l'on sait *a priori* que la variation de la cote pendant le jaugeage risque d'être élevée (en crue par exemple), on choisit de faire une mesure rapide : le jaugeage de surface au moulinet ou un jaugeage à l'ADCP seront préférés au jaugeage toutes profondeurs au moulinet.

### **2.1.2 La mesure de débit au moulinet**

La norme NF EN ISO 748 fournit un cadre pour les mesures de débit au moulinet. Comme on l'a déjà vu dans le paragraphe 1.3.3.1, la CNR utilise plusieurs techniques pour jauger au moulinet. Néanmoins, la méthodologie est toujours la même. Une section en travers de l'écoulement est choisie pour son homogénéité et ses possibilités techniques de mesure. Selon les conditions hydrauliques, les équipes de mesure choisissent un jaugeage complet ou un jaugeage de surface.

#### **2.1.2.1 Le jaugeage complet**

Si les conditions le permettent, on effectuera un jaugeage complet (appelé toute profondeur). Un jaugeage complet est constitué de plusieurs verticales de mesure, choisies de façon à ce que le débit soit réparti le plus équitablement possible entre deux verticales. Pour chaque verticale, on mesure la vitesse en six points (cf. pages 12 et 50 de la Contribution CNR ANNEXE IV). Cette répartition des points de mesure sur une verticale est conforme à la norme NF EN ISO 748.

#### **2.1.2.2 Le jaugeage de surface**

Effectuer un jaugeage de surface consiste à mesurer la vitesse à 20 cm sous la surface de l'eau pour chaque verticale, puis à multiplier cette vitesse par la section de la verticale associée pour obtenir le débit élémentaire sur une verticale. En sommant ces valeurs, on obtient un débit que l'on appelle débit  $Q_2$ . On lui associe un coefficient de surface  $C_2$  qui permet de calculer le débit total de la façon suivante :

$$Q_{total\_calculé} = C_2 * Q_2$$

*Calcul du coefficient de surface  $C_2$  :*

Lors d'un jaugeage complet, on mesure un débit total  $Q_{mesuré}$ , qui, par définition, intègre aussi les mesures à 20 cm sous la surface. A partir de ces seules valeurs à 20 cm sous la surface, on calcul le débit  $Q_{2\_mes\_TP}$  ( $Q_2$  mesuré à partir des vitesses de surface réalisée lors du jaugeage toutes profondeurs). On en déduit ensuite le coefficient de surface  $C_2$  du jour :

$$C_2 = \frac{Q_{mesuré}}{Q_{2\_mes\_TP}} = \frac{Q_{total\_calculé\_à\_partir\_de\_toutes\_les\_valeurs\_du\_profil}}{Q_{2\_calculé\_à\_partir\_des\_valeurs\_à\_20cm\_sous\_la\_surface}}$$

### *Utilisation du coefficient de surface $C_2$ :*

Ce coefficient de surface alimente une base de données de la CNR regroupant l'ensemble des coefficients de surface. La CNR dispose actuellement de plus 600 valeurs de coefficients de surface sur l'ensemble de ses sites de jaugeage. Elles lui permettent de cerner les incertitudes liées à l'utilisation de ce paramètre lors du dépouillement des mesures (ceci fait l'objet du paragraphe 2.5 de la Contribution CNR ANNEXE IV).

Cette base de données est utilisée lorsque l'on effectue des jaugeages de surface seuls : on utilise alors le  $C_2$  du jaugeage complet le plus récent et le plus proche en débit, calculé sur le même lieu. Par conséquent, si l'on effectue un jaugeage de surface à la suite d'un jaugeage complet, le coefficient de surface calculé à partir du jaugeage complet est réutilisé immédiatement pour le jaugeage de surface.

Le jaugeage de surface peut être utilisé dans deux situations différentes.

- D'une part, il est utilisé lorsque les conditions de jaugeage sont critiques : variation rapide du débit (ex : crue) ou critères de sécurité empêchant de faire un jaugeage complet ;
- D'autre part, lorsque l'opérateur ne peut pas réaliser sur site un deuxième jaugeage complet (toutes profondeurs) (par manque de temps par exemple), il réalise alors un jaugeage de surface. Il applique à ce jaugeage de surface le coefficient  $C_2$  calculé à partir du jaugeage complet effectué juste avant. Il obtient alors une deuxième valeur du débit total, qui est comparé à la valeur issue du premier jaugeage (complet).

Que ce soit pour un jaugeage complet ou de surface, il faut repérer la position du moulinet dans la section et mesurer la section.

La position des verticales est déterminée soit à partir des informations du treuil des stations téléphériques, soit à partir d'une caméra laser embarquée avec repère fixe en berge ou de tout autre moyen permettant d'estimer la distance de la berge au point de mesure. La position du moulinet sur la verticale est déterminée par le compteur du treuil permettant de descendre le saumon dans l'eau. La distance est comptée à partir du zéro réalisé à la surface pour chaque verticale. Pour un jaugeage à la perche, la profondeur est mesurée directement sur la perche qui supporte le moulinet. La profondeur du fond est détectée par un signal lumineux ou sonore activé lorsque le saumon touche physiquement le fond de la rivière. En période de crue, c'est cette mesure du fond qui est la plus délicate. Il se peut qu'il y ait un biais du fait que le câble n'est pas vertical à cause des vitesses qui tirent le saumon vers l'aval. Dans ce cas, la mesure du fond peut être sur-estimée de quelques pourcents. Le risque de casse du matériel est aussi présent en cas de rocher ou troncs d'arbres immergés se déplaçant sur le fond de la rivière. Par sécurité, le jaugeur aura alors tendance à s'arrêter un peu avant le fond : la profondeur risque d'être sous-estimée de quelques dizaines de centimètres. Ainsi, en forte crue, l'estimation du fond peut-être issue d'une mesure faite avec un sondeur ultrasonore soit pendant la crue, soit immédiatement après pour limiter les incertitudes sur la mesure faite avec le saumon.

### 2.1.3 La mesure de débit à l'ADCP

L'ADCP réalise des mesures en discrétisant la section de mesure à la manière d'un moulinet. Toutefois il mesure plus de verticales et plus de points par verticale, et la mesure est plus rapide. La mesure de débit par l'ADCP est détaillée dans la Contribution CNR ANNEXE II.

Les jaugeurs de la CNR effectuent au moins quatre traversées du cours d'eau avec un ADCP. Chaque traversée fournit une valeur de débit. Pour être validées, elles doivent converger vers une même valeur. Les jaugeurs calculent alors la valeur moyenne de ces débits et obtiennent ainsi le débit total moyen sur la durée de ces quatre traversées (quatre étant un nombre minimal). Ceci constitue la mesure ADCP classique, que l'on appelle aussi mesure en mode autonome. Des comparaisons ADCP/Moulinet effectuées depuis l'achat du premier appareil par la CNR en 1994, ainsi qu'une étude d'incertitude (cf. 2.3.2) ont montré que la mesure ADCP est fiable.

A l'inverse des moulinets, l'ADCP n'a pas besoin d'instruments de mesure autres que lui-même pour effectuer ses mesures dans l'espace (position des vitesses, topographie de la rivière).

L'ADCP est muni d'un compas magnétique interne qui lui permet de se repérer par rapport au fond du cours d'eau pour déterminer le profil de la section et ses mesures de vitesse :

- Il mesure la vitesse de l'ADCP par rapport au fond ;
- Il mesure la vitesse de l'eau par rapport à lui-même ;
- Il déduit de ces deux mesures la vitesse de l'eau par rapport au fond.

Par conséquent, si le fond du cours d'eau se déplace, la valeur de vitesse par rapport au fond n'est pas la vitesse par rapport à un point qui reste fixe durant la mesure : le débit est bien souvent sous-estimé<sup>1</sup> (cf. les travaux de J. Callède sur l'Amazone (journal des Sciences Hydrologiques 45 (6), décembre 2000)). L'incidence d'un fond mobile sur la mesure et sa prise en compte lors du dépouillement sont détaillées dans la Contribution CNR ANNEXE III.

Avant 2001, la CNR n'a pas constaté de remise en cause de la mesure ADCP par comparaison avec les mesures moulinet lors des reports sur les courbes de transformation hauteur-débit. Lors des crues récentes de 2002 et 2003, les écarts constatés étaient dus en partie à l'influence d'un fond mobile. Des écarts avaient déjà été observés en 2001, ce qui avait motivé l'achat d'un DGPS (Differential Global Positioning System) pour vérifier l'influence des fonds sur la mesure ADCP.

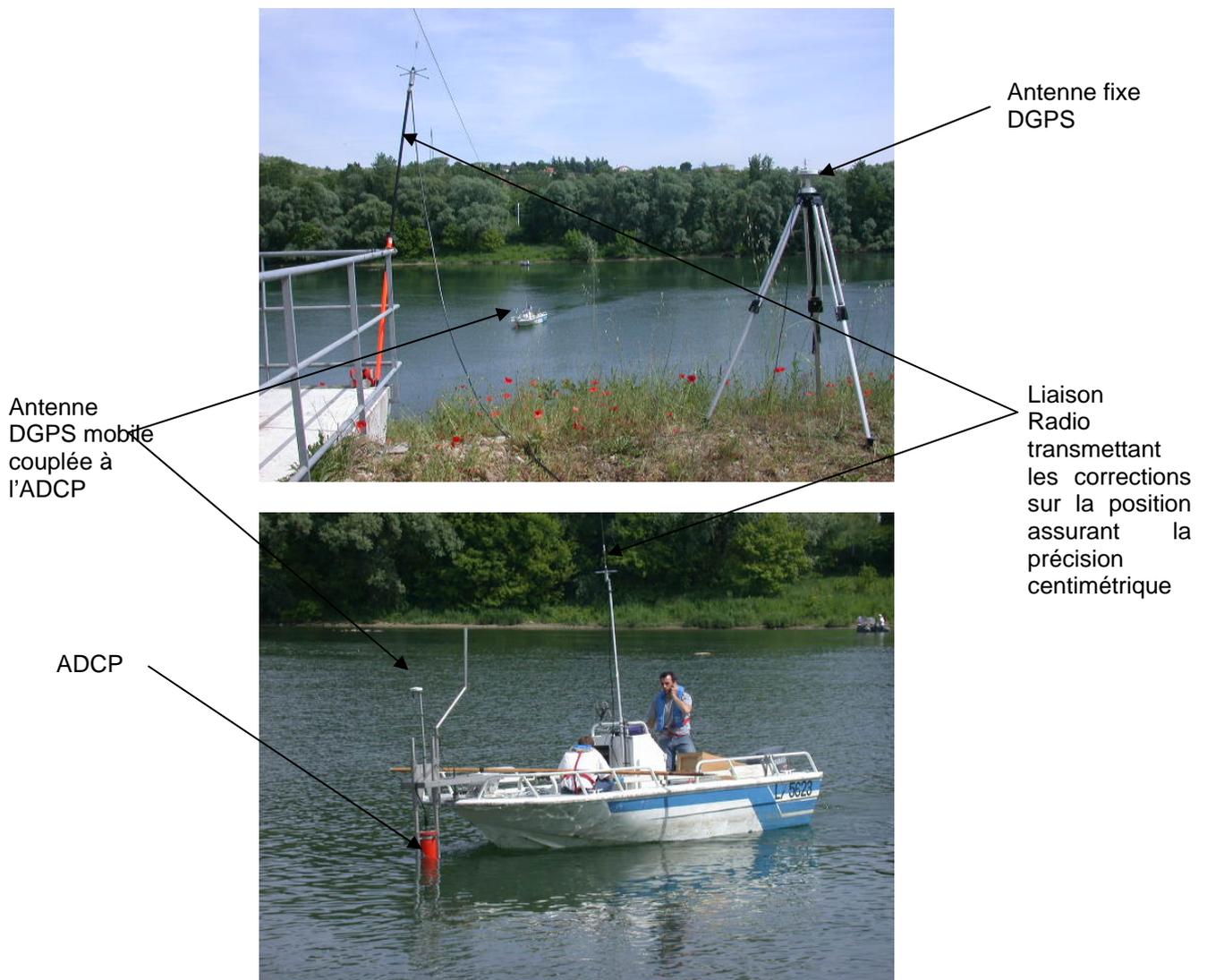
La CNR a mis en place une méthodologie visant à déterminer si le fond est stable et, si ce n'est pas le cas, à dépouiller le jaugeage ADCP en prenant en compte l'incidence d'un fond mobile sur la mesure de débit. Cette méthodologie s'applique en mode autonome. Toutefois, la CNR a couplé l'ADCP au système de positionnement par satellite DGPS qui donne la position exacte de l'appareil et de ce fait permet de s'affranchir de l'impact des mouvements de fond qui pourraient

---

<sup>1</sup> Pour les cas hors flux et reflux, l'ADCP risque de sous estimer les débits en cas de déplacement du fond vers l'aval. Pour les estuaires à marée montante, on a pu observer une surestimation du débit, certainement due à un déplacement du fond vers l'amont.

se produire en crue au droit de la section de mesure. En effet, dans ce cas l'ADCP se repère grâce au DGPS et non plus par rapport au fond. Néanmoins, le DGPS peut dégrader l'information relative au débit si il y a perte du signal (cf. page 7 de la Contribution CNR ANNEXE III). C'est pour cette raison que la CNR lui préfère la méthodologie qu'elle a élaborée (cf. page 8 de la Contribution CNR ANNEXE III). Cette dernière a fait l'objet d'une présentation à d'autres utilisateurs de l'ADCP à un congrès sur cet appareil qui s'est tenu à Nice en juin 2004. Cette méthode est proche de celle appliquée par l'IRD (cf. paragraphe 2.3.2.2).

N.B. : des essais de mesures réalisés à l'ADCP couplé avec le GPS ont montré que l'ADCP utilisant la fréquence 600 KHz est moins sensible à l'influence des mouvements de fonds que l'ADCP 1200 KHz. Les mesures au 600kHz seront donc privilégiées en cas de forte crue où le fond est susceptible de se déplacer.



**Figure 9 : Utilisation du GPS différentiel couplé avec un ADCP**

## 2.2 Incertitude sur les mesures de niveaux

Lors d'un jaugeage, le niveau du plan d'eau est relevé sur une échelle limnimétrique située sur la berge. C'est cette mesure qui permet ensuite de placer le jaugeage sur la courbe de transformation hauteur-débit, et non une mesure issue du limnimètre. Par conséquent, les incertitudes sur les mesures de niveau d'eau lors d'un jaugeage sont directement liées aux échelles limnimétriques installées en berge.

Ces échelles font partie intégrante des dispositifs de mesures et de surveillance (DMS). Elles sont rattachées au système de nivellement de référence (système orthométrique pour la CNR) par les équipes topographiques de la CNR. Elles servent de référence pour le calage des limnimètres. L'incertitude de lecture de l'échelle est inférieure à 5 cm en temps normal. En période de crue, le batillage peut générer une incertitude plus importante.

Toutes les analyses (CNR et CETIAT, cf. paragraphe 4.3 de la Contribution CNR ANNEXE V) et observations situent l'incertitude de mesures sur les niveaux à moins de 10 cm.

Il se peut que le signal enregistré par le limnimètre soit « haché ». Ceci indique que la sonde est peut-être envasée ou bien qu'elle est soumise à des turbulences. Dans ce cas, il sera nécessaire de la nettoyer. Toutes les interventions de suivi et de maintenance sont consignées dans la base de données Maintenance de la CNR.

## 2.3 Incertitude sur les mesures de débit

Afin de confronter son expérience dans ce domaine, la CNR travaille en relation avec des métrologues français et étrangers et en collaboration avec des laboratoires de mesures de référence notamment :

- **L'O.F.E.G. (Office Fédéral de l'Eau et de la Géologie de Bern)**, accrédité pour étalonner la plupart des capteurs en hydrométrie : la CNR a échangé des documents de travail avec cet office par courrier et lors de deux visites dans les locaux de l'O.F.E.G. (2001 et 2004) ; l'OFEG est l'un des organismes qui étalonne les moulinets utilisés par la CNR.
- **Le C.E.T.I.A.T (Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques)** spécialisé en métrologie : une démarche a été initiée fin 2002 pour que le C.E.T.I.A.T. réalise une étude d'incertitude de mesure pour la CNR ; un premier état des lieux a été effectué en mars 2003 (étude de faisabilité) ; des premiers résultats d'incertitudes (sur l'ADCP et le moulinet) estimées selon les normes en vigueur ont été fournis en mai 2004.

Ainsi, des études ont été conduites indépendamment les unes des autres par l'OFEG, le CETIAT et la CNR pour évaluer les incertitudes sur les appareils de mesures de débits. Les conclusions de ces études convergent vers les mêmes

résultats. Ces derniers sont présentés dans les paragraphes qui suivent et correspondent à des mesures réalisées dans de bonnes conditions hydrauliques en respectant des modes opératoires bien précis notamment celui défini par la norme NF EN ISO 748 (Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts).

### **2.3.1 Incertitude des mesures au moulinet**

La norme NF EN ISO 748 (Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts) permet d'estimer l'incertitude de mesure des débits mesurés au moulinet. La CNR la met en application. Le CETIAT a mené une étude pour la CNR à ce sujet (étude présentée dans la Contribution CNR ANNEXE IV). Elle a eu pour objet l'estimation de l'incertitude de mesure des débits au moulinet par application de la norme NF EN ISO 748 mais aussi de la norme NF ENV 13005 (norme métrologique générale). Bien qu'imparfaites et critiquables, ces deux normes permettent d'estimer les incertitudes minimales de mesure. L'ensemble des jaugeages au moulinet de la CNR compris entre 1984 et 2003 a été étudié.

Les principales conclusions de l'étude présentée dans la Contribution CNR ANNEXE IV sont les suivantes :

- Les paramètres importants pour estimer l'incertitude de mesure sont la précision intrinsèque du moulinet, le nombre de points par verticale et le nombre de verticales (bien que d'autres paramètres soient aussi à prendre en compte) ;
- Pour un nombre suffisant de verticales, les deux normes convergent vers les mêmes résultats d'incertitude, sans qu'il soit possible de distinguer laquelle des deux est la plus pertinente ;
- L'incertitude minimale pour un **jaugeage complet** au moulinet réalisé dans **d'excellentes** conditions est de l'ordre de  $\pm 5 \%$ <sup>(\*)</sup> ;
- Pour le site où l'incertitude sur  $C_2$  est la plus faible (l'Isère), l'incertitude minimale pour un jaugeage de surface est de  $\pm 8 \%$  ;
- D'une manière générale, l'incertitude minimale pour un **jaugeage de surface** est de  $\pm 10 \%$  pour un site dont le coefficient de surface est connu ;
- L'incertitude minimale pour un jaugeage de surface est supérieure à  $\pm 14 \%$  pour un site totalement inconnu, ce qui est rarement le cas sur les sites jaugés par la CNR.

***(\*) Compte tenu de l'expérience de terrain, une incertitude plus réaliste de  $\pm 7 \%$  est retenue pour les jaugeages effectués au moulinet.***

Ces valeurs d'incertitude sont certainement supérieures pour un jaugeage effectué en crue (en crue, le jaugeage de surface est privilégié). Toutefois, nous ne savons actuellement pas quantifier cette incertitude maximale. Elle doit tout de même être proche des valeurs d'incertitude retenues par la suite, dans la mesure où la norme sur les débits (NF EN ISO 748) fait intervenir les incertitudes sur des vitesses d'écoulement élevées.

### 2.3.2 Incertitude des mesures à l'ADCP

Le constructeur de l'ADCP fournit les caractéristiques intrinsèques de l'appareil concernant les mesures effectuées par l'ADCP : incertitude sur la mesure de profondeur, sur les mesure de vitesse... Néanmoins, il ne fournit aucune incertitude sur la mesure de débit avec ses appareils. Actuellement il n'y a pas de méthode définie pour déterminer cette incertitude. Une comparaison en débit avec un appareil de référence permet de la déterminer de façon rigoureuse.

#### 2.3.2.1 Incertitude sur la mesure en cas de fond stable

Dans la grande majorité des cas, le fond du cours d'eau est stable quand on effectue un jaugeage à l'ADCP. Cette stabilité est vérifiée en suivant la méthode décrite dans la Contribution CNR ANNEXE III. On peut alors estimer l'incertitude des mesures à l'ADCP par comparaison avec les mesures au moulinet. Il s'agit d'une analyse statistique selon les normes de la série 5725. De même que pour le moulinet, cette étude a été menée par le CETIAT (cf. Contribution CNR ANNEXE IV) pour le compte de la CNR. Un résumé de la méthode suivie et des résultats obtenus est présenté ci-après.

Les valeurs d'incertitude issues de cette étude concernent l'ADCP Broadband 1200kHz. Elles ont été obtenues après analyse de 19 jaugeages comparatifs réalisés sur 15 sites, pour des débits allant de 11 à 3 500 m<sup>3</sup>/s, des vitesses variant de 0,1 à 2,5 m/s et des hauteurs supérieures à 2 m, sur une période de près de 10 années. Ces valeurs d'incertitude s'appliquent au débit issu d'un jaugeage réalisé selon le protocole CNR, c'est-à-dire sur la moyenne d'au moins quatre mesures effectuées avec l'ADCP. Notons que sur ces 19 mesures comparatives, ***l'écart entre le débit au moulinet et le débit à l'ADCP n'excède pas ±7.5%***.

L'incertitude résultant de la comparaison ADCP/moulinet est due à la combinaison des erreurs de mesure des deux méthodes de mesure. En effet, le moulinet sert de référence mais n'a pas une incertitude négligeable devant celle de l'ADCP (cf. page 43 de la Contribution CNR ANNEXE IV). L'incertitude résultante est donc la somme quadratique des composantes d'incertitude de chacune des deux méthodes, soit :

$$U_{résultante} = 2 \sqrt{\left(\frac{U_{ADCP}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{Moulinet}}{2}\right)^2}$$

avec :

- $U_{ADCP}$  l'incertitude élargie relative du débit ADCP ;
- $U_{Moulinet}$  l'incertitude élargie relative du débit Moulinet.

***Cette incertitude résultante est calculée à partir des écarts entre les débits Moulinet et ADCP :***

$$U_{résultante} = E_{moy} + 2\sigma_{écarts} = 0.5\% + 2 * 3.7\% = 7.9\%$$

où :

- $Ecart = (Q_{ADCP} - Q_{Moulinet}) / Q_{Moulinet}$  ;
- $E_{moy}$  = moyenne des écarts (soit 0.5% pour l'échantillon considéré) ;
- $\sigma_{Ecart}$  = écart-type des écarts (soit 3.7% pour l'échantillon considéré).

Par conséquent :  $2\sqrt{\left(\frac{U_{ADCP}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{Moulinet}}{2}\right)^2} = 7,9\%$

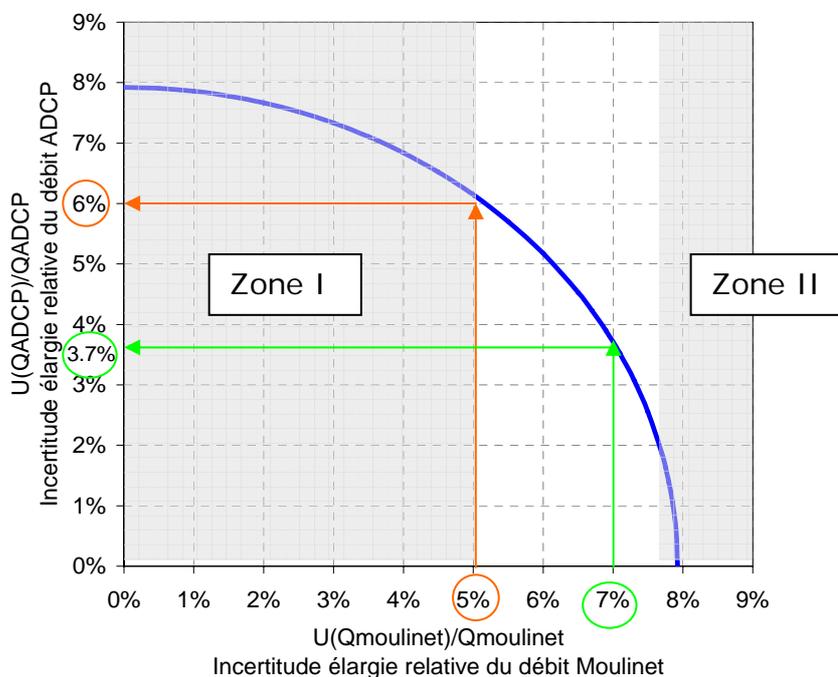
$$U_{ADCP} = \sqrt{\left(\frac{7,9}{100}\right)^2 - U_{Moulinet}^2}$$

d'où

La Figure 10 représente la composante d'incertitude de la méthode ADCP en fonction de la composante d'incertitude de la méthode moulinet de manière à ce que la somme quadratique des incertitudes-types de ces deux composantes corresponde à une incertitude élargie constante à  $\pm 7,9\%$  ( $k = 2$  correspondant à un niveau de confiance de 95%). La courbe est donc tracée de façon à respecter l'équation ci-dessous :

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

**Attention** : les valeurs d'incertitude portent sur la méthode ADCP en général, et non sur un jaugeage en particulier. La zone I correspond à des valeurs d'incertitude peu probables pour les jaugeages au moulinet, la zone II correspond à des valeurs d'incertitude irréalistes pour l'ADCP.



**Figure 10 : Combinaison des composantes de l'ADCP BB 1200 kHz et du moulinet : en orange,  $\pm 5\%$  d'incertitude minimale pour un le moulinet ; en vert,  $\pm 7\%$  d'incertitude réaliste pour le moulinet.**

L'analyse de la Figure 10 permet de conclure que l'incertitude de mesure de la méthode ADCP, pour l'appareil utilisé lors de cette étude (ADCP 1200 kHz), est nécessairement inférieure à la valeur de  $\pm 7.9 \%$  ( $\pm 7.9 \%$  correspondant à une incertitude de  $\pm 0 \%$  pour un jaugeage au moulinet, incertitudes fournies avec un niveau de confiance de 95%).

Les incertitudes moyennes des jaugeages au moulinet sont supérieures à  $\pm 5 \%$  (vu dans le paragraphe précédent). Ceci permet de conclure que l'incertitude de mesure de la méthode ADCP (ADCP 1200 kHz) est très certainement inférieure à  $\pm 6 \%$ .

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

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

Cette valeur d'incertitude pourra être affinée en répétant les essais selon le même protocole, pour l'ADCP Broadband 1200 kHz de la CNR.

Le C.E.T.I.A.T. conclut que cette méthodologie pourra être appliquée aux autres ADCP qu'utilise la CNR.

La CNR a donc utilisé les résultats de ses mesures comparatives d'ADCP entre eux pour appliquer la même méthodologie.

Quinze mesures comparatives sont répertoriées pour la comparaison de l'ADCP Broadband 1200kHz et l'ADCP Broadband 600kHz. Des débits de 330 m<sup>3</sup>/s à 4 630 m<sup>3</sup>/s ont été mesurés, ce qui correspond à des vitesses de 0.40 m/s à 2.1 m/s compte tenu des sections mesurées. Les résultats figurent dans le tableau ci-dessous :

LIEU	DATE	Débit ADCP BB 600kHz (m3/s)	Débit ADCP BB 1200kHz (m3/s)	Ecart (600- 1200)/1200
Aval barrage VA	01/09/1999	446	443	0.7%
Aval usine CE	26/10/2004	340	333	2.1%
Beaucaire (PK 269.600)	24/02/1999	4 630	4 630	0.0%
Couzon	01/03/1999	1 992	2 015	-1.1%
Couzon	01/03/1999	2 011	2 010	0.0%
Perrache	18/03/2004	642	634	1.3%
Perrache	18/03/2004	653	640	2.0%
Perrache	18/03/2004	666	664	0.3%
Pougnny	06/03/2001	605	623	-2.9%
SB restitution	19/06/2001	1 146	1 145	0.1%
Ternay	25/04/2004	477	474	0.6%
Ternay	25/04/2004	499	485	2.9%
Ternay	25/04/2004	504	472	6.8%
Ternay	10/06/2004	736	734	0.3%
Ternay	10/06/2004	767	763	0.5%
<b>Moyenne</b>				<b>0.9%</b>
<b>Ecart-type</b>				<b>2.1%</b>
<b>Incertitude composée élargie</b>				<b>5.2%</b>

La méthodologie indiquée par le CETIAT mène à une incertitude résultante des deux méthodes (ADCP BB 1200 kHz et 600 kHz) de  $\pm 5.2\%$ , soit :

$$2\sqrt{\left(\frac{U_{ADCP\_BB\_1200kHz}}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{ADCP\_BB\_600kHz}}{2}\right)^2} = 5,2\%$$

Cette incertitude est l'incertitude composée élargie. C'est la somme de la moyenne des écarts et de deux fois l'écart-type des écarts (cf. valeurs dans le tableau précédent).

Ceci indique que l'incertitude élargie de l'ADCP Broadband 600kHz est au maximum de  $\pm 5.2\%$ . Les résultats présentés précédemment indiquaient que l'incertitude maximale de l'ADCP Broadband 1200kHz était probablement de  $\pm 4\%$ . Ces deux ADCP sont donc certainement du même ordre de grandeur d'incertitude, soit  $\pm 3.8\%$  :

$$U_{ADCP\_BB\_1200kHz} = U_{ADCP\_BB\_600kHz} \quad \text{et} \quad U_{ADCP\_BB\_1200kHz}^2 + U_{ADCP\_BB\_600kHz}^2 = (5.2\%)^2$$

$$\Rightarrow U_{ADCP\_BB\_1200kHz} = U_{ADCP\_BB\_600kHz} = 3.8\%$$

La valeur retenue de  $\pm 5\%$  est donc tout à fait réaliste.

A l'issue de cette analyse, les incertitudes des mesures obtenues par l'ADCP et par jaugeage complet au moulinet semblent proches. Cependant, dans le cas d'un régime transitoire, la rapidité de mise en œuvre de l'ADCP permet de réduire l'influence de la variation du débit, ce qui limite l'incertitude due à ce phénomène. De plus, **en crue**, où les jaugeages au moulinet sont réalisés par des mesures de surface, **l'ADCP permet de scruter toute la section et son incertitude associée est alors bien meilleure que le moulinet.**

### **2.3.2.2 Incertitude sur la mesure en cas de fond mobile**

L'incidence d'un fond mobile sur la mesure ADCP est exposée dans la Contribution CNR ANNEXE III. L'incertitude résultante sur la mesure dépouillée en prenant en compte le déplacement du fond n'a pas été rigoureusement étudiée.

Ce phénomène peut être rencontré en période de crue. L'analyse des mesures permet de constater que l'ADCP Broadband 600 kHz est moins sensible à ce phénomène alors que l'ADCP Broadband 1 200 kHz y est très sensible. Toutefois, en cas de déplacement du fond de la rivière, on observe une bonne cohérence entre les mesures effectuées à l'ADCP 600 kHz et celles effectuées à l'ADCP 1 200 kHz en tenant compte de l'impact du fond mobile : les écarts entre les valeurs de débits sont alors inférieurs à  $\pm 5\%$ . Ces résultats sont présentés dans la Contribution CNR ANNEXE III.

Cette bonne cohérence ( $\pm 5\%$ ) est confirmée par l'utilisation du DGPS en situation de crue. Ainsi nous considérons que l'incertitude de  $\pm 5\%$  pour les mesures ADCP reste valide même pour les situations de crue.

**N.B.** : la Contribution CNR ANNEXE III présente le constat fait avec les mesures de la CNR. Le phénomène de fond mobile a été observé par d'autres utilisateurs de l'ADCP :

- Jacques Callède (ORSTOM, actuel IRD) : il propose une méthode proche de celle de la CNR pour prendre en compte l'impact d'un fond mobile sur la mesure ADCP (cf. ses travaux sur l'Amazone (journal des Sciences Hydrologiques 45 (6), décembre 2000)) ;
- DIREN : Mesure dans les estuaires avec flux et reflux où l'application de la méthode CNR converge vers les valeurs de débit attendues par ailleurs.

### **2.3.3 Bilan sur les incertitudes de mesure de débit**

L'ADCP Broadband 1200 kHz et l'ADCP Broadband 600 kHz ont une incertitude inférieure à celle du moulinet. Toutefois, compte tenu des méthodologies appliquées, ces incertitudes restent comparables.

On peut légitimement retenir que **dans de bonnes conditions hydrauliques** :

- L'ADCP converge vers une incertitude de l'ordre de  $\pm 5 \%$  ;
- Le moulinet converge vers une incertitude de l'ordre de  $\pm 7 \%$  (jaugeage complet toutes profondeurs).

### **2.3.4 Incertitude des débits issus des courbes hauteur – débit**

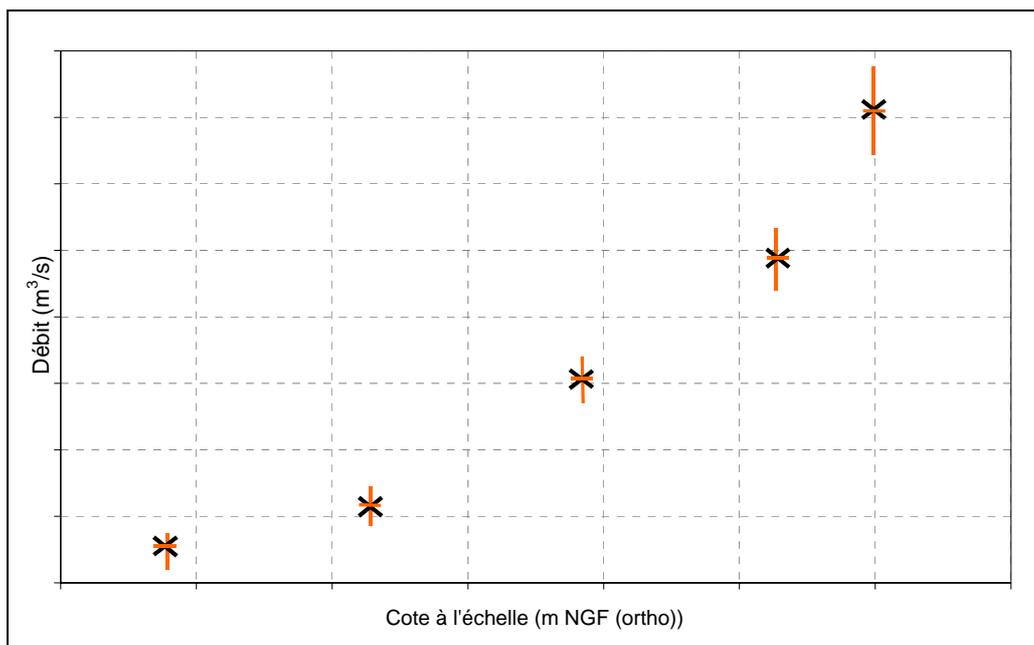
Les résultats énoncés ci-après proviennent de l'étude effectuée par le CETIAT pour la CNR, qui figure dans la Contribution CNR ANNEXE V. L'incertitude des débits issus des courbes de transformation hauteur-débit est la combinaison de trois composantes d'incertitude :

*Première composante - L'incertitude sur les valeurs qui servent à la construction des courbes.*

Dans le cas des courbes de transformation hauteur-débit, les valeurs de référence qui servent à la construction des courbes sont les jaugeages au moulinet ou à l'ADCP. Les incertitudes minimales sur ces valeurs jaugées sont présentées dans le paragraphe précédent. Elles sont comprises entre  $\pm 5\%$  et  $\pm 10\%$  selon la nature du jaugeage. Ces valeurs correspondent à des incertitudes élargies (niveau de confiance de 95%). La valeur utile pour le calcul présenté ci-après est l'incertitude-type d'un jaugeage, soit :

$$u(Q_i) = \frac{U_{\text{élargie}}(Q_i)}{2}$$

Il existe également une incertitude de mesure associée à la cote à l'échelle. Celle-ci est négligeable devant l'incertitude associée au débit.



**Figure 11 : Composante d'incertitude des valeurs de référence**

*Deuxième composante - L'incertitude associée au choix de la loi d'interpolation.*

Pour déterminer cette loi, il faut considérer les écarts entre les valeurs de référence (ici les jaugeages) et la courbe. Ces écarts sont appelés résidus.

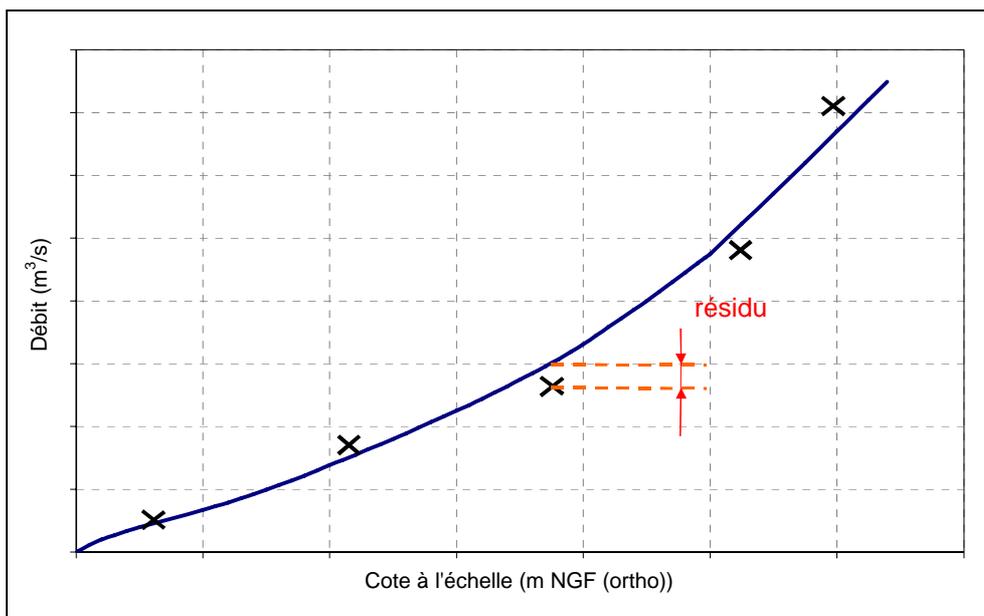
Selon le nombre de résidus disponibles, l'incertitude associée au choix de la loi d'interpolation sera calculée différemment :

- Si le nombre de résidus est inférieur à 10, cette incertitude dépend du maximum des résidus, auquel on associe une loi de distribution rectangulaire :

$$u_{\text{interpolation}} = \frac{\max(\text{résidus})}{\sqrt{3}}$$

- Si le nombre de résidus est supérieur à 10, cette incertitude est égale à l'écart-type des résidus :

$$u_{\text{interpolation}} = \sigma_{\text{résidus}}$$

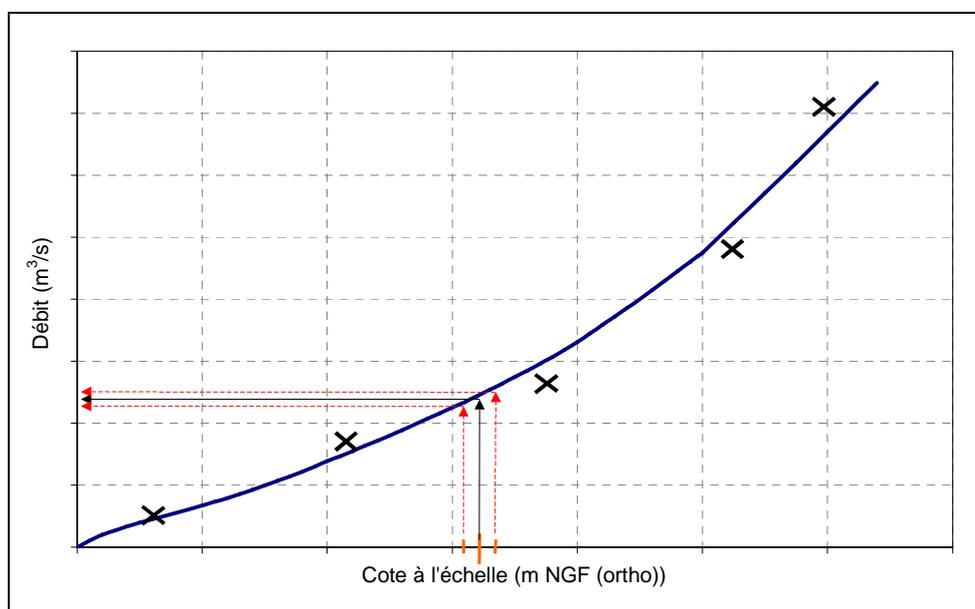


**Figure 12 : Composante d'incertitude liée à la qualité de l'interpolation (choix de la loi)**

*Troisième composante - L'incertitude due à la lecture de la courbe.*

Elle dépend de la pente locale de la courbe d'interpolation et de l'incertitude des valeurs lues en abscisse (c'est-à-dire l'incertitude sur les mesures du limnimètre notée  $u(h)$ ) :

$$u_{lecture\_courbe} = \frac{\partial Q}{\partial h} u(h)$$



**Figure 13 : Composante d'incertitude liée à la lecture de la courbe**

La combinaison des trois composantes d'incertitude fournit l'incertitude sur le débit lu sur la courbe à partir d'une mesure limnimétrique. Le calcul réalisé est le suivant :

$$u^2(Q_{lu}) = u^2(Q_i) + u^2_{interpolation} + u^2_{lecture\_courbe}$$

Pour certaines applications, il peut être intéressant de découper le domaine en sous-domaines sur lesquels on considère que l'incertitude est constante.

La Contribution CNR ANNEXE V donne le détail du calcul statistique appliqué à la courbe du PK 269.600 (Station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon). Le paragraphe 5.6 du présent rapport conclut sur l'incertitude retenue par la CNR d'un point de vue hydrométrique.

## 3 Critique et analyse des données

Grâce à son réseau de stations hydrométriques et à ses jaugeages, la CNR dispose de nombreuses données. Il convient de les traiter, les valider, les critiquer et les analyser.

### 3.1 Traitement de la donnée Thalie

Rappelons que THALIE est l'outil informatique développé par la CNR pour :

- L'acquisition et la collecte de l'ensemble des données : cotes, débits, jaugeages, courbes hauteur-débit par exemple ;
- Le stockage de ces informations dans une base de données assurant leur intégrité ;
- Le traitement en temps réel ou différé des données de la base ;
- La diffusion de l'information ;
- L'interrogation des capteurs sur site et le rapatriement des données sont effectués en automatique via des protocoles de communication sécurisés intégrés à l'appliquatif THALIE.

La mémoire des capteurs sur site a une capacité moyenne de stockage supérieure à 15 jours. Par conséquent, un arrêt momentané de l'acquisition des DONNEES n'entraîne pas de perte de mesures.

Plusieurs traitements sont réalisés en automatique sur les données brutes acquises de façon instantanée, notamment la recherche d'anomalies dans une série chronologique. Lors de la détection d'une anomalie, le gestionnaire du réseau est informé par l'apparition d'une alarme. Des actions sont menées en conséquence. Mensuellement un rapport est établi à partir des alarmes étant apparues sur l'ensemble de la chaîne d'acquisition des données. Ce rapport permet de faire un bilan sur l'état du réseau et de programmer des opérations de maintenance.

Les traitements automatiques qui suivent la téléacquisition sont les suivants :

- Transformation des mesures de niveau en débit par l'intermédiaire des courbes hauteurs-débits ;
- Calculs de valeurs moyennes ;
- Calculs de valeurs minimales et maximales.

Sur site, les mesures sont effectuées au pas de temps instantané, et échantillonnées toutes les 30 secondes. Les valeurs moyennes horaires sont calculées à partir de ces mesures au pas de temps instantané : les valeurs instantanées de l'heure H-1 à H permettent de calculer la moyenne qui sera affectée à l'heure H. Ensuite, les valeurs horaires du jour J de 1h00 à 24h00 permettent de calculer la valeur moyenne du jour J.

Notons que les mesures instantanées de niveau permettent le calcul des débits instantanés (par utilisation de la courbe hauteur/débit). Les débits horaires (puis journaliers) sont calculés à partir de ces débits instantanés.

Les algorithmes de ces traitements sont précisés dans la documentation de l'appliquatif THALIE (« Dossier de spécification et de conception système Thalie »). Le suivi des mises à jour de ce dossier est géré par l'administrateur THALIE.

### **3.2 Gestion des stations hydrométriques et validation des données actuelles**

Après un traitement automatique par le logiciel THALIE qui permet de détecter les erreurs flagrantes, les données sont analysées comme suit :

***Au pas de temps journalier*** : Un technicien supervise quotidiennement le réseau et contrôle la cohérence des principales stations du Rhône et des affluents (stations de catégorie 1 et 2). Cette critique est basée sur la vérification de la cohérence amont-aval des débits. Elle fait l'objet de la diffusion d'un bulletin hydrologique journalier. En cas de doute, ou d'aberration sur une mesure, le technicien initie une demande de vérification de niveaux sur site par comparaison de la cote enregistrée avec celle relevée à l'échelle limnimétrique de référence.

**N.B.** : Sans demande particulière, un contrôle préventif de la cote enregistrée par le capteur et de son échelle limnimétrique associée est fait une fois par trimestre.

***Au pas de temps mensuel*** : D'une manière automatique, à chaque début de mois, le système calcule les débits moyens mensuels. Si un débit instantané ou journalier est modifié par la suite, le système recalcule le débit moyen mensuel automatiquement. Un bilan de cohérence mensuel est alors édité pour les stations principales du Rhône. La cohérence observée est comprise entre  $\pm 10\%$  sauf cas exceptionnel. Il s'agit à ce stade de déceler les anomalies flagrantes.

***Au pas de temps annuel*** : En fin d'année le système calcule automatiquement les débits moyens annuels. Cette étape fait l'objet d'un dossier (pour les stations principales) validant les débits moyens journaliers, mensuels et annuels, ainsi que les débits maximaux mensuels observés durant l'année. Ces informations sont regroupées dans l'annuaire hydrologique annuel que CNR réalise depuis 1958.

#### ***Validation des courbes de transformation hauteur-débit :***

Le suivi des courbes de transformation hauteur-débit se fait par l'intermédiaire de jaugeages effectués au droit des stations : ces courbes sont construites expérimentalement à partir des jaugeages pour des gammes variées de débit, depuis les basses eaux jusqu'aux crues exceptionnelles. Elles sont contrôlées régulièrement tout au long de l'année.

Cette courbe est spécifique à chaque station. Elle est modifiée au cours du temps suite aux crues qui modifient la section mouillée du fleuve. C'est pourquoi il faut l'actualiser régulièrement. Pour chaque jaugeage, on relève le niveau d'eau à la station et on mesure le débit. Si le point débit/niveau se trouve sur la courbe (à l'incertitude de mesure près), alors elle n'est pas modifiée. Si ce n'est pas le cas, la courbe n'est pas modifiée immédiatement et des jaugeages complémentaires

sont réalisés afin de vérifier si la courbe a effectivement changé ou s'il s'agissait d'une imprécision inhérente à la méthode de jaugeage. Toute modification de courbe n'est réalisée qu'après mise en évidence d'une tendance au creusement ou à l'exhaussement de la courbe. Généralement, plusieurs jaugeages sont nécessaires.

Il convient de noter que toute modification de courbe, même à une date antérieure à la date de modification se répercute sur **toutes** les données contenues dans la base Thalie et affectées par cette modification (débit instantané, horaire et journalier par exemple).

### 3.3 Analyse critique des données historiques

En plus des procédures d'analyse régulière pour la critique des données réalisées dans le cadre des bulletins hydrologiques journaliers et des rapports annuels, la CNR est amenée à appliquer sur ses données des méthodes statistiques classiques en hydrologie (tests statistiques, double cumuls, cumuls des résidus, ellipses de Bois, ...). Elle a également testé la mise au point de procédures automatiques. De plus, au travers de conventions ou de contrats de collaboration, la CNR met ses données à disposition de bureaux d'études ou d'organismes de recherche pour la réalisation de toute étude hydrologique sur le Rhône et ses affluents en échange de leurs observations et critiques sur ces séries. Suivent quelques travaux récents réalisés avec des universitaires, des organismes de recherche ou des bureaux d'études externes à la CNR.

#### 3.3.1 Etude globale

Suite aux crues de 1993 et 1994, l'Institution Interdépartementale des bassins Rhône Saône (IRS) a **engagé en 1999** l'Etude Globale pour une Stratégie de Réduction des Risques des Crues du Rhône. Cette étude s'organise autour de quatre grands thèmes : hydrologie, dynamique fluviale, transport solide et occupation des sols.

Le volet 1 « hydrologie » a été confié aux bureaux d'études SAFEGE et SAFEGE CETIIS. Les objectifs du volet hydrologique de l'étude globale sont les suivants :

- Analyse de la genèse et de la propagation des crues ;
- Caractérisation du régime hydrologique du Rhône par tronçons homogènes ;
- Définition de scénarii, incluant le calcul des hydrogrammes de crues sur les principaux affluents du Rhône ;
- Actualisation des connaissances utiles à l'amélioration des systèmes d'annonce de crues.

Ce volet comprend une « critique des données hydrométriques disponibles sur le fleuve et ses affluents » : interrogation des gestionnaires des stations, analyse des séries par cumuls des résidus et analyse en composantes principales.

**Dix stations ont été étudiées** sur le Rhône : Pougny, Bognes, Seyssel, Brens, Pont de Lagnieu, Perrache, Ternay, Valence, Viviers, **Beaucaire**. Elles ont servi à la simulation de la propagation de la crue.

### 3.3.2 Etudes diverses

Parmi les diverses études qui ont analysé et critiqué les données CNR, en voici deux en particulier :

- Communication en collaboration avec le CEMAGREF au colloque du CGBF (Comité des Grands Barrages Français) en **novembre 2003** : "Examen de la stationnarité des écoulements du Rhône en lien avec la variabilité climatique et les actions humaines". Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un Projet National de Recherche en Hydrologie mené par le CEMAGREF en collaboration avec Météo France, LTHE et l'UMR HydroSciences de Montpellier. **Huit stations ont été étudiées** sur le Rhône : Pougny, Bognes, Pont de Lagnieu, Perrache, Ternay, Valence, Viviers, **Beaucaire**. Les résultats obtenus ne montrent aucune tendance de dérive du à un éventuel changement climatique. On observe seulement quelques ruptures au droit de Bognes, Pont de Lagnieu, Perrache qui sont liées soit à la mise en place d'ouvrages, soit à l'absence de crues majeures durant la période 1940-1980.
- Etude des étiages du Rhône, dans le cadre du projet d'aqueduc Lanquedoc-Roussillon-Catalogne (Etude à la demande du Comité de bassin RMC). Cette étude réalisée par un groupement EDF/DTG-CEMAGREF-CNR comportait **un chapitre sur l'analyse critique des résultats hydrométriques à Beaucaire sur la période 1874-1998**. Dans le cadre de cette analyse, EDF/DTG a expertisé la qualité de l'étalonnage de la station hydrométrique de **Beaucaire** à l'aide du logiciel Moryciel qu'elle a mis au point. Ce traitement a été réalisé sur 376 jaugeages effectués par la CNR entre 1960 et 1997. Il montre "un bon suivi de l'étalonnage de la station avec une remarquable stationnarité de la courbe de transformation hauteur-débit depuis 1976". Cette dernière courbe élaborée à l'aide de Moryciel est reportée ci-après.

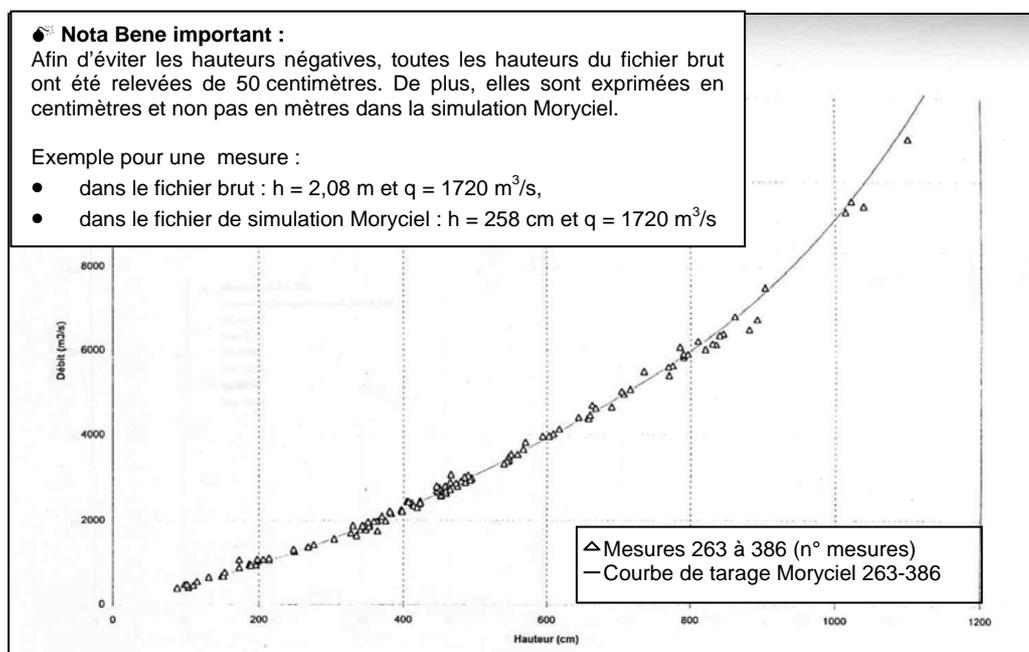
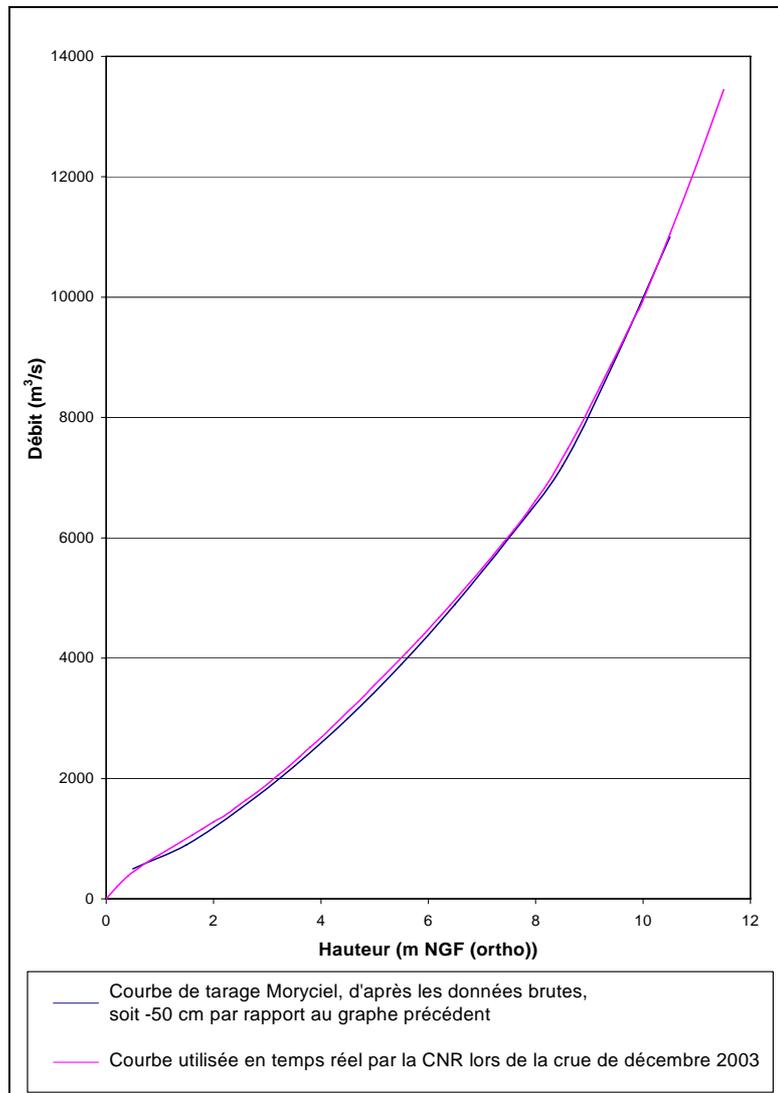


Figure 14 : Courbe de tarage Moryciel à la station de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600)

La figure ci-dessous permet de comparer la courbe de tarage Moryciel au PK 269.600, et la courbe utilisée par la CNR en temps réel. On constate une bonne adéquation entre ces deux courbes.



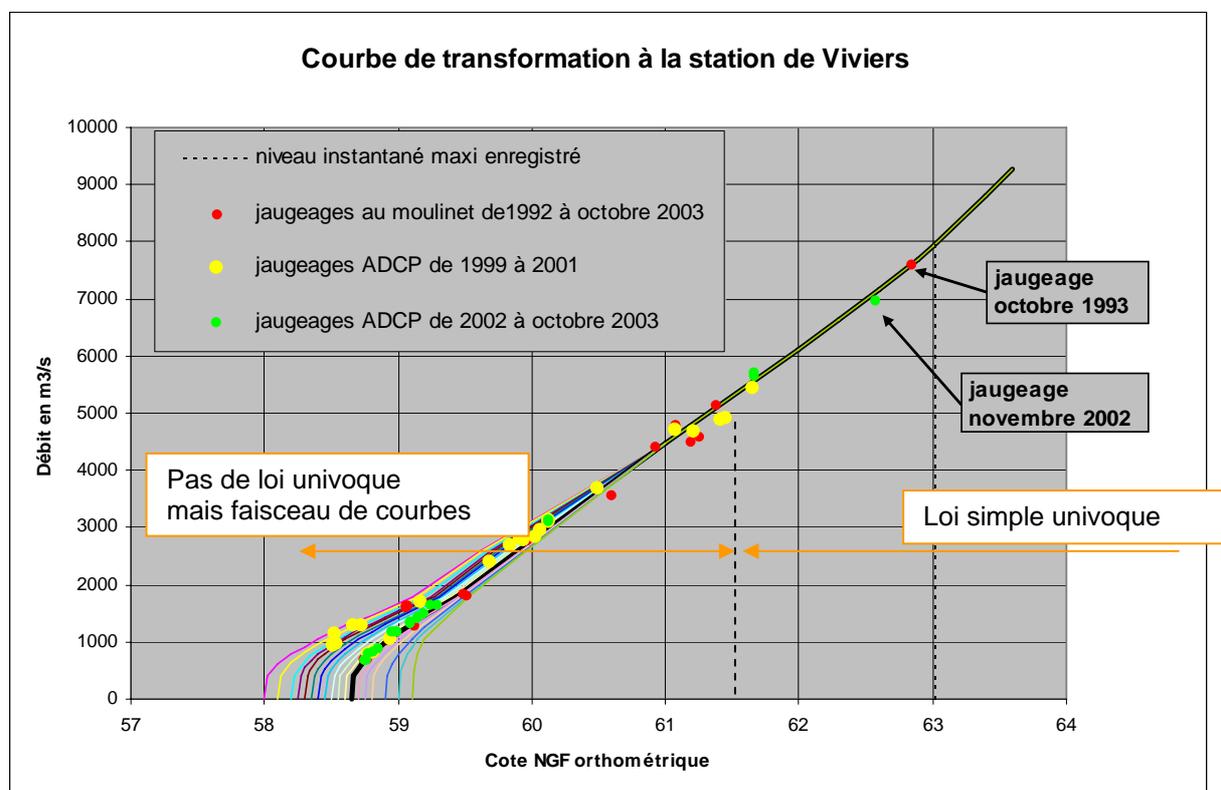
**Figure 15 : Comparaison de la courbe Moryciel et de la courbe CNR utilisée pendant la crue**

## 4 Analyse et évolution de la courbe de transformation hauteur-débit de Viviers

La courbe de transformation hauteur-débit de Viviers (PK 166.500) ne fait pas l'objet de discussion suite à la crue de décembre 2003. Elle est présentée ici car la station de Viviers est la première station en amont de Beaucaire où l'on jauge le Rhône total.

L'historique de la station de Viviers figure en ANNEXE B.

La courbe actuelle de transformation hauteur-débit de la station de Viviers a été examinée récemment suite aux jaugeages réalisés lors des dernières crues du Rhône pour des gammes de débits proches de celle de décembre 2003. En effet, ce secteur de la courbe a été exploré par jaugeages au moulinet en octobre 93 (7 600 m<sup>3</sup>/s) et à l'ADCP en novembre 2002 (6 950 m<sup>3</sup>/s). Ces jaugeages cohérents entre eux ont permis de valider la courbe utilisée pour la gamme des forts débits. Cette courbe est présentée sur le graphe ci-après.



### Remarques :

Cette courbe a la particularité de présenter un faisceau de courbes pour les débits inférieurs à 5 000 m<sup>3</sup>/s. En effet, en dessous de cette valeur de débit, la seule connaissance du niveau à Viviers ne permet pas de calculer le débit par une relation univoque hauteur/débit. Ce tronçon de courbe se situe sous l'influence de la retenue de Donzère-Mondragon. La connaissance du niveau au droit du point de réglage de la retenue (au PK 174.500, pont double SNCF)

s'impose pour connaître le débit. Au-delà de 5 000 m<sup>3</sup>/s, la retenue de Donzère n'influence plus le régime hydraulique et une loi simple est construite.

Ainsi, la CNR a élaboré des courbes à double entrée : pour un niveau donné au pont SNCF – PK 174.500 (point de réglage de la retenue de Donzère-Mondragon) correspond une courbe univoque hauteur (pont de Viviers) / débit (pont de Viviers).

#### *Intervention à Viviers pendant la crue de décembre 2003*

A la station hydrométrique de Viviers (PK 166.500), le niveau maximal enregistré était de 63,03 m NGF (ortho). Le 3 décembre 2003 les équipes de terrain n'ont pas pu réaliser de jaugeage ou vérifier la cote à l'échelle limnimétrique. Cependant après le maximum de la crue les équipes de terrain ont pu valider avec le responsable du port de Viviers que la crue de décembre 2003 était, en niveau, plus forte d'une vingtaine de centimètres que celle d'octobre 93 qui affichait alors 62,90 m NGF (ortho) le 9/10/1993, portant ainsi celle de décembre 2003 à 63,10 m NGF (ortho).

De même, la Direction Régionale d'Avignon a levé la laisse de crue 5,05 m à l'échelle du PK 166.500, soit 63,12 m NGF (ortho).

Le niveau du limnigraphe peut donc être considéré comme fiable à 10 cm près.

Un tel niveau (63,03 m NGF (ortho)) conduit à un débit d'environ 8 000 m<sup>3</sup>/s à partir de la relation hauteur- débit de Viviers.

## 5 Analyse et évolution de la courbe de transformation hauteur-débit de Beaucaire

L'objet de ce chapitre est d'analyser l'évolution de la courbe de transformation hauteur-débit pour la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600).

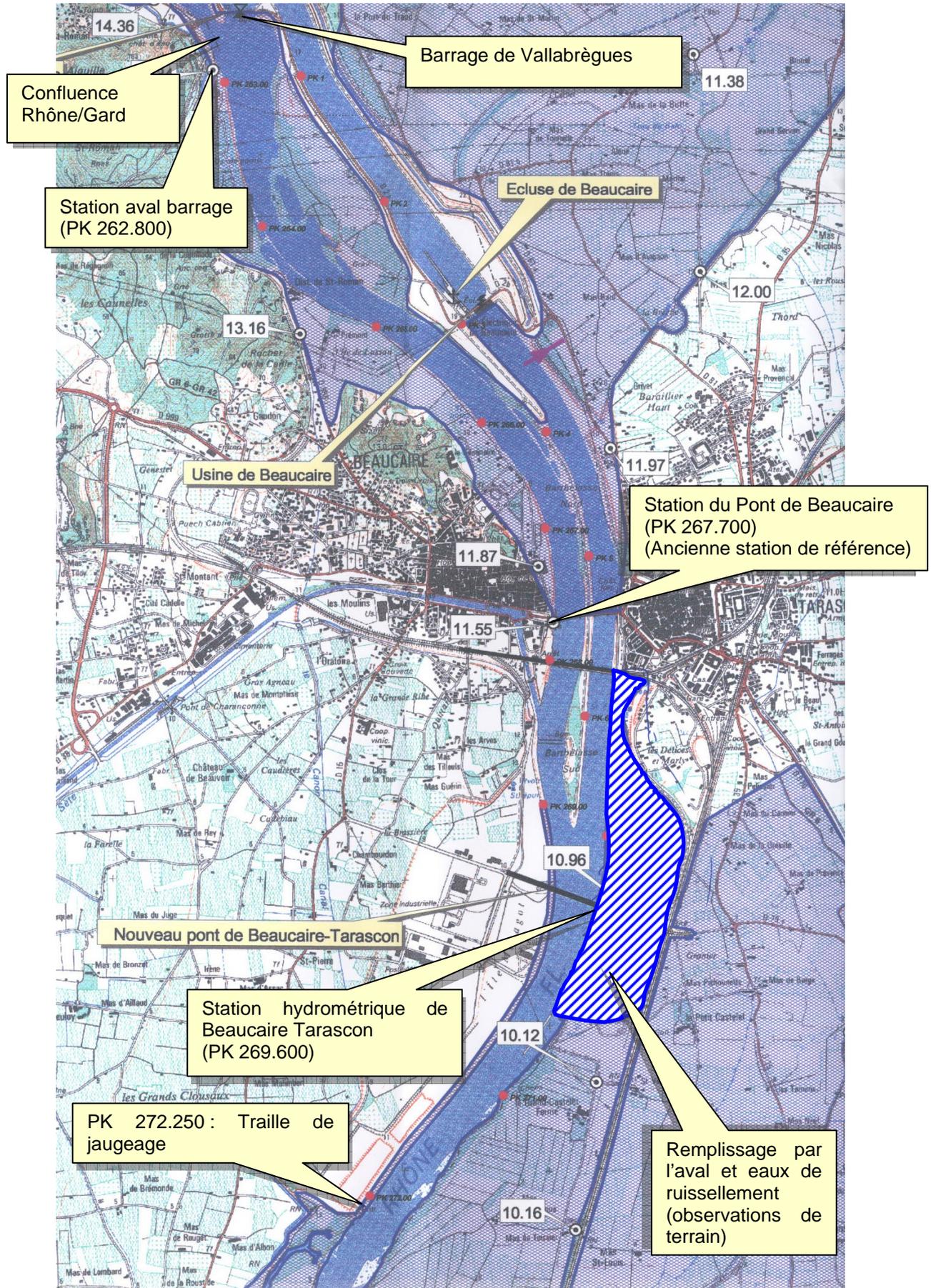
L'historique de la station ainsi que la configuration du Rhône à Beaucaire et à l'aval de cette ville seront rappelés, en dehors du contexte de la crue. Ceci permettra de comprendre l'impact de la morphologie du Rhône sur la courbe de transformation hauteur/débit à Beaucaire, ainsi que la construction et la validité de l'instance utilisée pendant la crue de décembre 2003.

Lors de la crue de décembre 2003, des jaugeages ont été effectués. Après analyse, il a été constaté qu'ils remettaient en cause la partie haute de la courbe correspondant aux débits supérieurs à 7 300 m<sup>3</sup>/s. Après la crue, il s'est donc avéré nécessaire de construire une nouvelle courbe de transformation hauteur-débit à la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600). Pour cela, deux analyses distinctes ont été conduites dans ce chapitre :

- L'une à caractère purement **hydrométrique**, réalisée par la CNR. Cette analyse est basée sur l'exploitation des mesures effectuées par la CNR, notamment celles réalisées pendant la crue de décembre 2003 ;
- L'autre conduite à la demande de la CNR par le CETIAT. Elle est basée sur l'analyse **statistique** des jaugeages réalisés par la CNR depuis 1992.

A partir de ces analyses, la CNR propose une nouvelle courbe de transformation hauteur-débit à la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600). Nous verrons que cette courbe ne se suffit pas à elle-même pour estimer le débit maximal de la crue de décembre 2003. En effet, pour le déterminer, il convient aussi de tenir compte des modifications des conditions hydrauliques avales pendant la crue, qui sont présentées en fin de chapitre.

Un plan d'ensemble présenté sur la page suivante permet de situer les principaux lieux mentionnés dans ce chapitre.



## **5.1 Historique de la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600)**

L'historique de la station de Beaucaire se trouve en ANNEXE B, ainsi que le plan de situation. Ci-après est présentée la méthode pour déterminer les débits de 1920 à nos jours au niveau de cette station.

De 1920 à 1961, les débits ont été calculés à partir de la moyenne arithmétique de trois débits correspondant aux trois cotes journalières relevées à heures fixes, à l'échelle historique du Pont de Beaucaire au PK 267.700. Ce travail fut réalisé par le service navigation.

De 1962 à 1969, le débit était toujours calculé au Pont de Beaucaire (PK 267.700), mais il était issu d'enregistrements en continu à partir d'un limnigraphe à flotteur associé à une courbe hauteur/débit.

La réalisation de l'aménagement de Vallabrègues, mis en service le 14/01/1970, ne permit plus d'établir une courbe de transformation hauteur-débit au même PK. Le limnigraphe du Pont de Beaucaire se situait dans le Rhône court-circuité et n'enregistrait donc qu'une fraction du débit du Rhône.

Ainsi, depuis le 02/11/1970, est installé un télélignigraphe à la restitution de Beaucaire au PK269.600 en rive gauche afin de suivre la totalité des débits sortants de l'aménagement de Vallabrègues, Gard inclus.

Notons pour mémoire que la confluence Rhône/Gard se trouve entre les PK 262.500 et 262.800. Les débits de Beaucaire (Ancienne station du Pont de Beaucaire au PK 267.700 et actuelle station de Beaucaire-Tarascon au PK 269.600) intègrent donc le Gard.

## **5.2 Configuration du Rhône à l'aval de la station hydrométrique de Beaucaire – Tarascon (PK 269.600)**

Les questions soulevées lors de la construction d'une courbe de transformation hauteur-débit ne peuvent être résolues sans une connaissance du terrain. Le paragraphe qui suit présente la morphologie du Rhône à l'aval de Beaucaire et au droit des stations de jaugeages. Il indique les effets hydrauliques attendus au droit du PK 269.600 résultant de l'environnement de cette station :

- Evolution des fonds et des endiguements à l'aval de Beaucaire ;
- Profils du Rhône au droit des stations de jaugeage de Beaucaire ;
- Recherche d'un éventuel effet raquette ;
- Impact du nouveau pont de Beaucaire (PK 269.600).

### 5.2.1 Profils du Rhône au droit des stations de jaugeage de Beaucaire

L'examen des sections au droit des stations de jaugeage de Beaucaire (PK 269.600 et 272.250) permet de construire une courbe de transformation hauteur-débit au PK 269.600 prenant en compte d'éventuelles discontinuités des profils.

Des jaugeages au moulinet ont été effectués jusqu'en 1995 à l'ancienne traيلة de Beaucaire (PK 272.250). Toutefois, la section au droit de cette traيلة présente une discontinuité du profil en travers en rive gauche autour de 8 m NGF (ortho) (cf. Figure 23). Cette discontinuité marque la transition entre lit mineur et lit majeur.

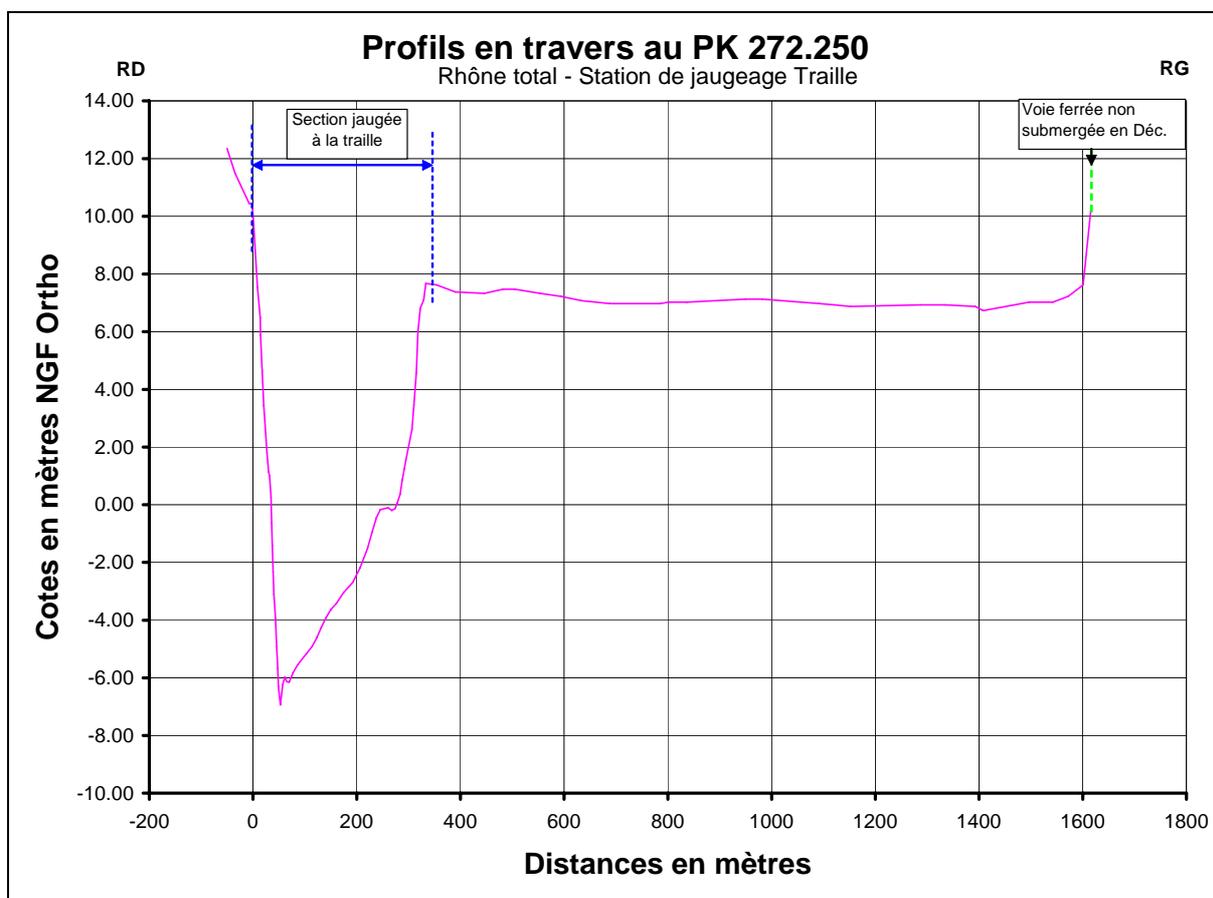


Figure 23 : Profil en travers au PK 272.250 (traيلة de jaugeage)

Ainsi, au-delà de 8 m NGF (ortho) en rive gauche au PK 272.250, le Rhône s'écoule non seulement dans le lit mineur mais aussi sur le lit majeur, beaucoup plus large. Lorsqu'il y a des débordements, un jaugeage à la traيلة ne mesure donc plus l'ensemble du débit. Il faut alors estimer le débit non jaugé, qui s'écoule dans la zone de débordements.

Afin de mesurer l'ensemble du débit écoulé, quelque soit sa valeur, la CNR effectue désormais ses jaugeages entre le PK 269.500 et le PK 269.600. A ces PK, la cote maximale du lit mineur est de 12 m NGF (ortho) (cf. Figure 24), supérieure à la cote maximale enregistrée pendant la crue de décembre 2003, qui était de 11,30 m NGF (ortho) (cf. Figure 25). Il n'y a pas eu de débordements entre le PK 269.500 et le PK 269.600 pendant la crue de décembre 2003, donc l'ensemble du débit écoulé a été mesuré.

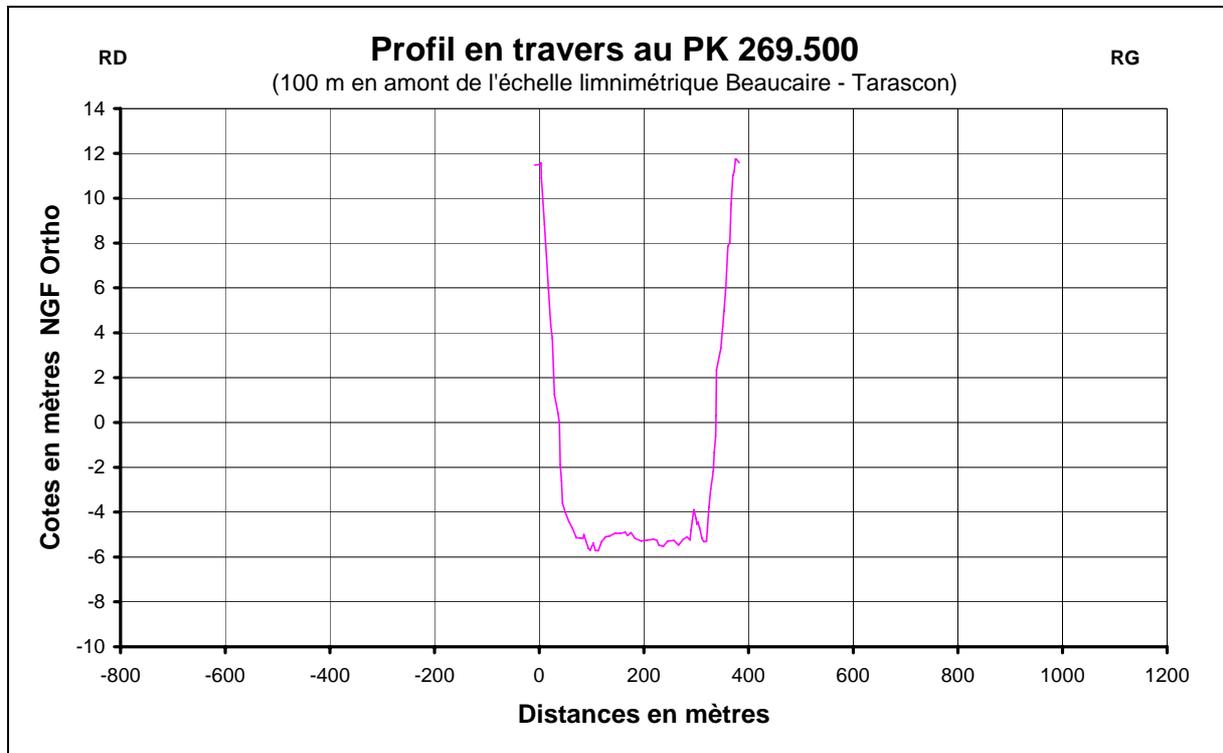


Figure 24 : Profil en travers au PK 269.500



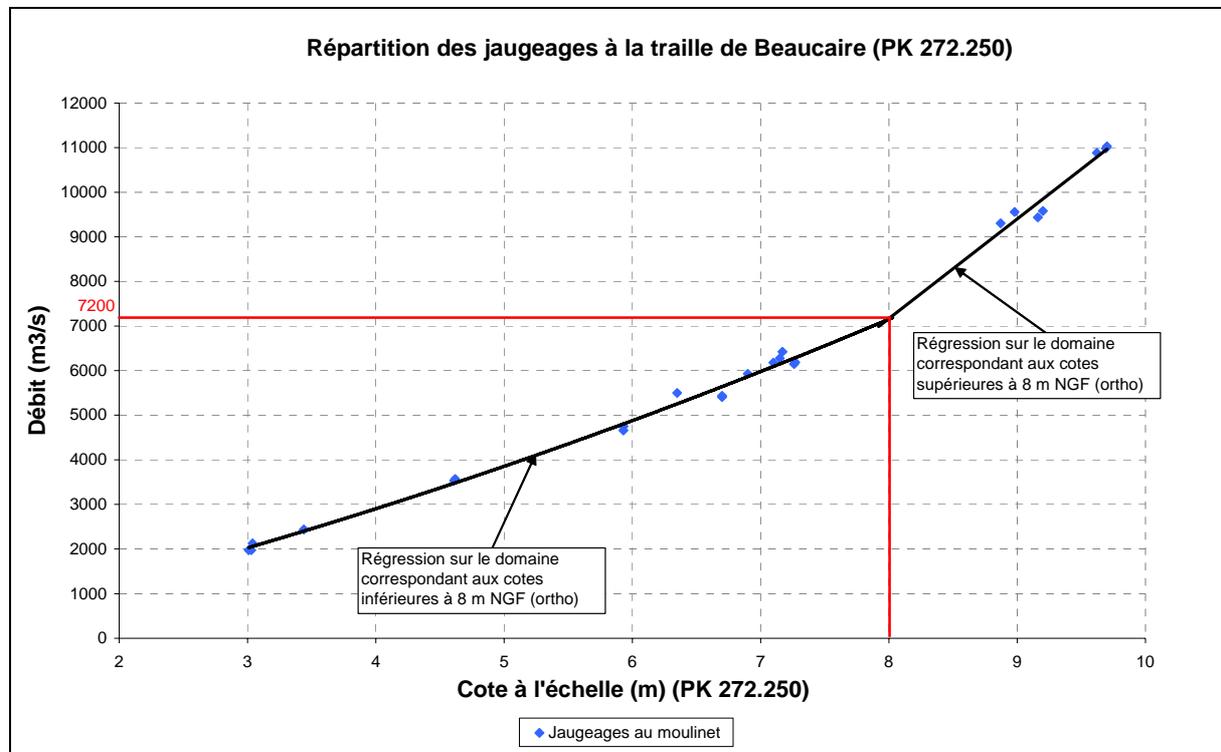
Niveau maximal enregistré pendant la crue, soit 11,30 m NGF (ortho) à 3h le 04/12/2003

Niveau lu, soit 11,10 m NGF (ortho) à 12h15 le 03/12/2005

Figure 25 : échelle limnimétrique du PK 269.600 le 3 décembre 2005 vers 12h15

En revanche, pendant la crue de décembre 2003, il y a eu des débordements à l'aval du PK 269.600. Bien que l'on ait présenté ces débordements au droit de la traîlle de jaugeage qui se trouve au PK 272.250 (cf. Figure 23), ils débutent en fait environ 200 m à l'aval du PK 269.600. Ils ont une influence sur la courbe de transformation hauteur-débit de la station hydrométrique de BeaucaireTarascon (PK 269.600).

En effet, la discontinuité des profils en rive gauche à l'aval du PK 269.600 entraîne une modification de l'évolution du débit en fonction du niveau. La largeur de la section mouillée augmentant fortement au-delà de 8 m NGF (ortho) au PK 272.250, l'évolution des niveaux est donc moins rapide, toutes choses égales par ailleurs. Ceci a une incidence sur la relation hauteur-débit au PK 269.600. On s'attend donc à observer une augmentation de la pente de la courbe hauteur-débit de Beaucaire Restitution (PK 269.600) pour des débits correspondant à des cotes supérieures à 8 m NGF (ortho) à la traîlle de Beaucaire (PK 272.250).



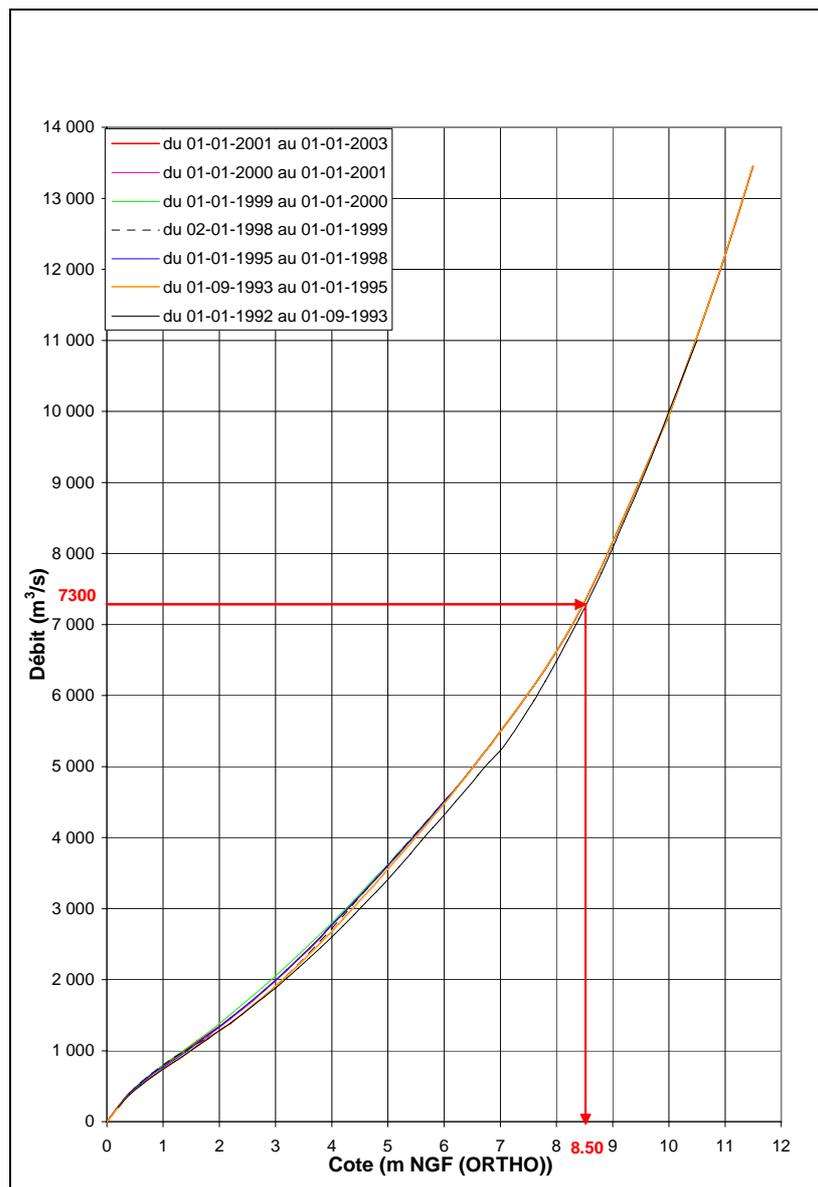
**Figure 26 : Répartition des jaugeages à l'ancienne traîlle de Beaucaire (PK 272.250)**

L'étude de la répartition des jaugeages au moulinet au PK 272.250 (cf. Figure 26) indique :

- Un changement de pente à 8 m NGF (ortho). En effet, une interpolation des jaugeages a été effectuée sur deux domaines : en-dessous et au-dessus de 8 m NGF (ortho), cote correspondant à la discontinuité du profil. On observe bien que l'intersection de ces interpolations se trouve à 8 m NGF (ortho) ;
- La cote de 8 m NGF (ortho) correspond à un débit proche de 7 200 m<sup>3</sup>/s. Il peut être augmenté à 7 300 m<sup>3</sup>/s en lissant l'intersection des deux courbes d'interpolation.

L'analyse des instances de la courbe de transformation hauteur-débit du PK 269.600 indique que le débit de 7 300 m<sup>3</sup>/s correspond à une cote de 8,50 m NGF (ortho) au PK 269.600 (cf. Figure 27). Ainsi, le changement de pente induit par les discontinuités de profil à l'aval du PK 269.600 conduit à distinguer deux domaines (hydrauliquement parlant) pour la courbe de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600) :

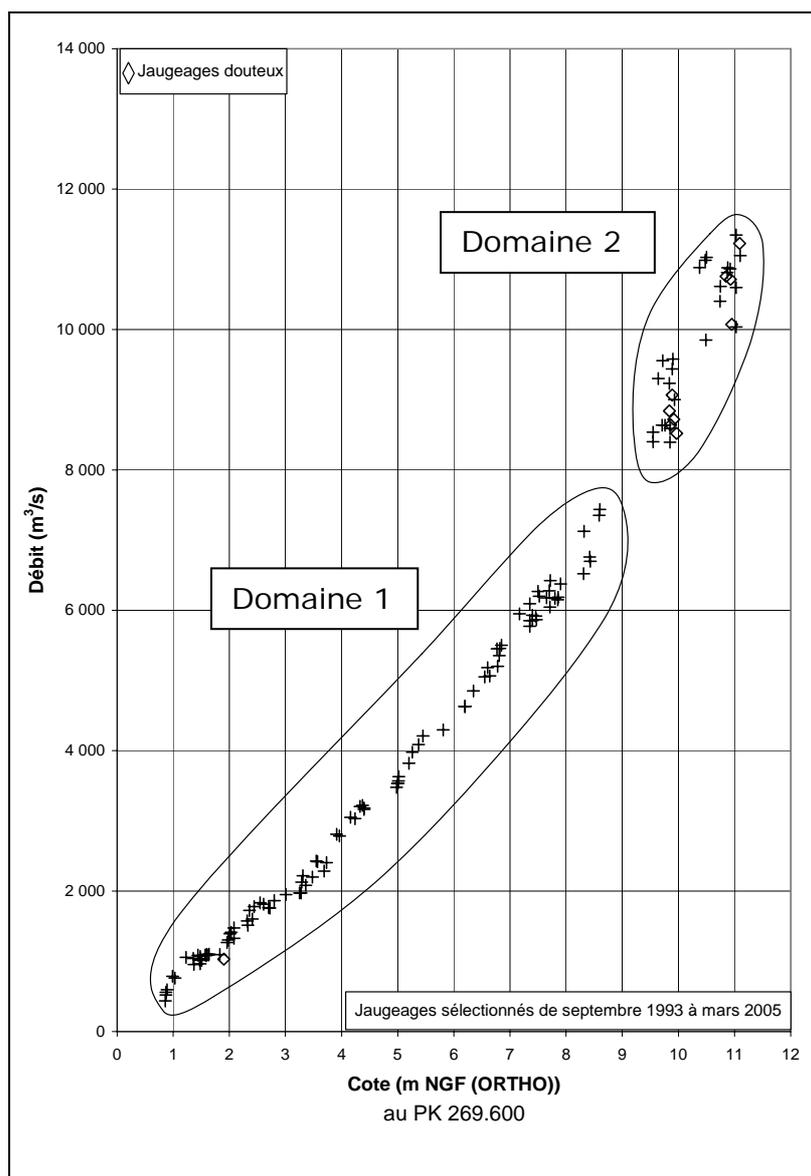
- Cotes inférieures à 8.50m NGF (ortho) ;
- Cotes supérieures à 8.50m NGF (ortho).



**Figure 27 : courbe de transformation hauteur-débit à la station de Beaucaire – Tarascon (PK 269.600)**

Sur la Figure 28 se trouvent **tous** les jaugeages effectués à Beaucaire depuis le 24 septembre 1993, que ce soit au moulinet ou à l'ADCP. On peut avoir l'impression d'une dispersion plus faible pour les débits inférieurs à 7 300 m<sup>3</sup>/s (malgré le léger creusement mis en évidence dans le paragraphe ci-après en 5.2.2), et une dispersion plus forte pour les débits supérieurs à 7 300 m<sup>3</sup>/s. Ceci est une conséquence directe de la nature des incertitudes, qui sont proportionnelles au débit.

En revanche, on observe une tendance au changement de pente entre les deux domaines, qui peut être liée à la discontinuité constatée sur les profils à l'aval du PK 296.600.



**Figure 28 : Ensemble des jaugeages effectués à Beaucaire depuis le 24 septembre 1993 (ADCP et moulinet)**

## 5.2.2 Evolution des fonds et des endiguements à l'aval de Beaucaire

### 5.2.2.1 Présentation de l'évolution des fonds et des endiguements à l'aval de Beaucaire

L'aménagement prolongeant celui de Vallabrègues à l'aval de Beaucaire est l'aménagement du Palier d'Arles. Il a été mis en eau en 1973. L'historique de cet aménagement est présenté dans la Contribution CNR ANNEXE VI.

Avant l'aménagement du palier d'Arles, trois types d'ouvrages existaient déjà :

- Les digues, épis et casiers destinés à fixer le lit mineur du fleuve ;
- Les digues situées en bordure ou dans le lit majeur, destinées à la protection des plaines contre certaines submersions ;
- L'écluse de Beaucaire.

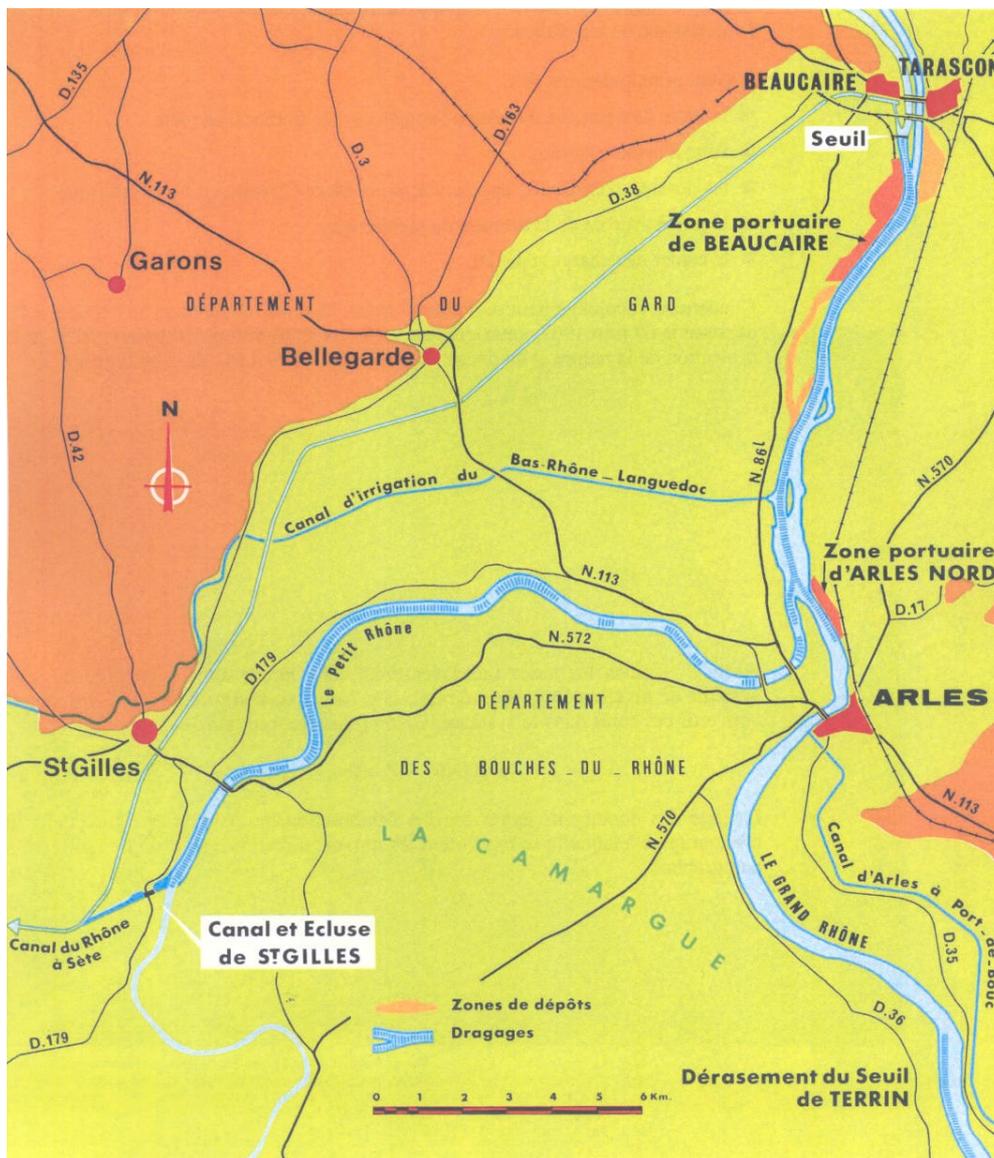


Figure 29 : Aménagement du palier d'Arles  
(plan issu de la Contribution CNR ANNEXE VI)

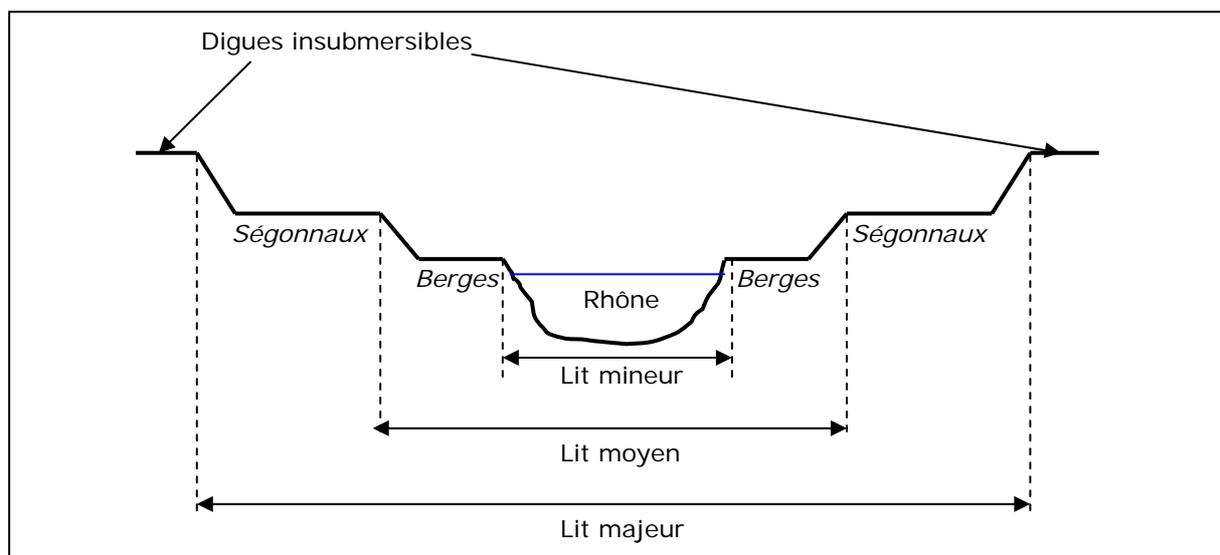
Les travaux réalisés lors de l'aménagement du palier d'Arles sont :

- Les dragages dans le lit mineur du Rhône entre le PK 268.6 et le PK 280.8, mais effectués de sorte que les digues et épis pré-existants ne soient pas détruits ;
- Le déroctage du seuil de Terrin sur le Grand Rhône ;
- Le rétablissement de la voie fluviale entre le Rhône et le canal du Rhône à Sète par le Petit Rhône (PK 279.2 au PK 300) par un dragage de ce dernier et la réalisation du canal de navigation et d'une écluse (l'écluse de Saint-Gilles) entre le PK 300 du Petit Rhône et le KM 29 du canal du Rhône à Sète ;
- Un seuil au PK 268.5 sur le Vieux Rhône à Vallabrègues, (seuil de Beaucaire) ;
- Deux plateformes portuaires, à Arles et à Beaucaire, construites à l'aide des matériaux issus des dragages.

Depuis sa mise en eau en 1973, des dragages ont été réalisés pour maintenir le chenal navigable ou pour rendre l'impact de certains ouvrages (tels le nouveau pont de Beaucaire au PK 269.600) nul sur les lignes d'eau. L'examen de ces volumes dragués depuis 1973 permet d'étudier l'évolution de la morphologie du Rhône à l'aval de Beaucaire. Cette étude basée sur l'exploitation de données bathymétriques entre 1974 et 1999 constitue la Contribution CNR ANNEXE VII.

Elle fait apparaître un dégravement global du tronçon de Rhône entre Beaucaire et Arles (lit mineur et berges) de 385 000 m<sup>3</sup> entre 1974 et 1999. Cette tendance semble s'accélérer entre 1998 et 2002 : le dégravement est de 380 000 m<sup>3</sup> durant cette période. ***Un examen plus détaillé de ces données indique que le lit mineur s'est globalement dégravé de 800 000 m<sup>3</sup> environ entre 1974 et 1999 alors que le sommet des berges (au-delà de 8 m NGF (ortho)) a fait l'objet d'un remblai de l'ordre de 400 000 m<sup>3</sup> pendant la même période.***

La figure ci-dessous permet de définir les termes utilisés dans ce paragraphe ainsi que dans la suite de ce rapport<sup>2</sup> :



**Figure 30 : Vue en coupe schématique de la zone intra-digues**

<sup>2</sup> Le terme « lit majeur moyen » parfois employé, notamment dans la Contribution CNR ANNEXE V, correspond à la différence entre lit mineur et lit majeur.

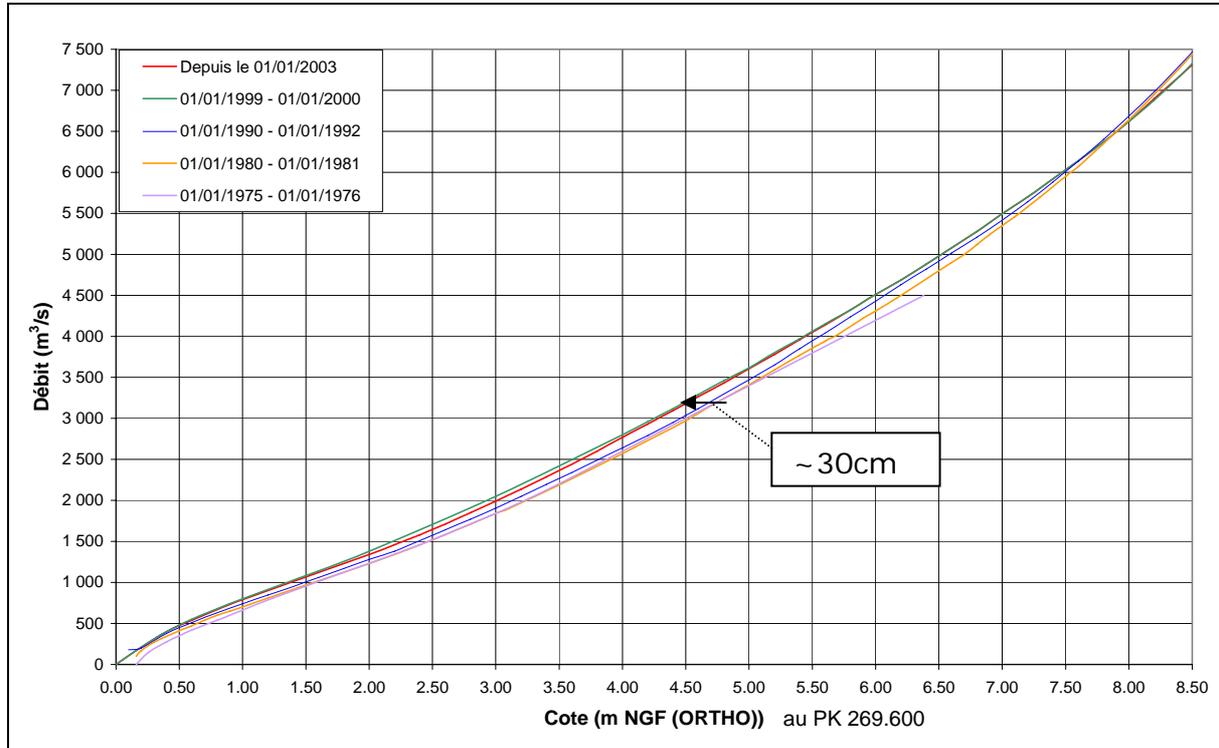
Cette étude est confortée par celles menées par le CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement) :

- D'une part par C. Antonelli, M. Provansal, J. Fleury et G. Pichard « Analyse de l'évolution séculaire du lit du Rhône à Arles à partir de l'analyse d'image. Implications géomorphologiques et paléohydrologiques », 2004 :
  - Cette étude indique que tout au long du siècle dernier, le lit mineur du Rhône, dans la traversée de la ville d'Arles, s'est incisé. On observe une incision inégale du plancher alluvial, et peu d'érosion latérale. Les dépôts de sédiments sont favorisés entre le défluent et la ville d'Arles. Toutefois, cette zone est régulièrement draguée, ce qui empêche l'engravement.
- D'autre part par L. Sabatier « Dynamique des berges du Rhône entre Beaucaire et Arles (2002-2003) », rapport de maîtrise, 2004 (maîtrise dirigée par M. Provansal) :
  - Cette étude (ainsi qu'une thèse en cours au CEREGE) indique que le lit majeur du Rhône à l'aval de Beaucaire s'est ensablé et qu'une végétation arbustive s'y est développée suite aux crues successives.
- Enfin, par M. Provansal et A. Romac « Du chenal à la côte : flux sédimentaires et gestion des digues dans le bas Rhône », 10 juin 2005 :
  - Cette étude mentionne une incision moyenne du lit mineur de 1,5 cm/an depuis 1950 entre Beaucaire et Arles. Par ailleurs, elle fait état d'une « *sédimentation dans les casiers et les ségonnaux, qui progradent et s'exhausent* », aussi bien à l'échelle séculaire (plusieurs mètres de sédiments dans les îles) qu'à l'échelle des dix dernières années (exhaussement d'environ 10 cm/an sur le site de Barruol à l'aval d'Arles). Selon cet article, la sédimentation qui a lieu dans le lit moyen et les ségonnaux à l'aval de Beaucaire favorise le développement de la végétation et retarde ainsi la propagation des crues mais en surélève les lignes d'eau.

***Globalement, les relevés concernant la morphologie du Rhône indiquent une incision du lit mineur à l'aval de Beaucaire et un engravement des berges jusqu'aux ségonnaux.***

### 5.2.2.2 Impact sur la courbe de transformation hauteur-débit du PK 269.600

D'après ce qui a été présenté dans le paragraphe 5.2.1, seul le lit mineur est sollicité pour des débits inférieurs à environ  $7\,300\text{ m}^3/\text{s}$  à l'aval de Beaucaire. Comme on observe une incision globale du lit mineur depuis au moins 1974, on peut s'attendre à observer un léger creusement de la courbe au cours du temps : à débit constant, le niveau aurait tendance à baisser.



**Figure 31 : Evolution de la courbe hauteur-débit au PK 269.600 pour les bas et moyens débits de 1975 à 2003**

La figure ci-dessus présente les instances validées et utilisées successivement entre 1975 et 2003. On observe un creusement de 25 à 30 cm pour les débits sollicitant le lit mineur, entre la courbe en vigueur en 1975 et celle établie depuis le 01/12/2003 (qui est la courbe en cours d'étude pour les hauts débits). Ce creusement est donc certainement lié à l'incision du lit mineur du Rhône à l'aval de Beaucaire, entre les PK 269.000 et 282.000. Cette incision ne s'observe que sur les débits inférieurs à  $6\,500\text{ m}^3/\text{s}$ . Elle disparaît au-delà de cette valeur.

L'étude en cours dans ce rapport semble même indiquer un exhaussement de la courbe dans les hauts débits : à débit constant, le niveau est désormais plus élevé. Ceci serait confirmé par l'élévation globale des berges et du lit majeur qui sont sollicités pour des débits supérieurs à  $7\,300\text{ m}^3/\text{s}$ .

Toutefois, le bilan global de ces modifications fait encore l'objet de réflexions au travers d'une thèse conduite par le CEREGE.

### 5.2.3 Recherche d'un éventuel effet raquette à partir des jaugeages

D'après des études hydrauliques, un effet raquette est attendu au niveau de la station de Beaucaire. La question s'est posée, de savoir si on observait un tel effet avec les jaugeages effectués à cette station. Pour y répondre, nous avons répertorié les jaugeages effectués au droit de la station. Nous avons conservé uniquement ceux pour lesquels le débit est inférieur à  $7\,300\text{ m}^3/\text{s}$  car ils correspondent à la partie fiable de la courbe, non remise en cause. Nous avons ensuite indiqué si ils étaient effectués pendant une montée de niveau, une descente, ou pendant un niveau stable.

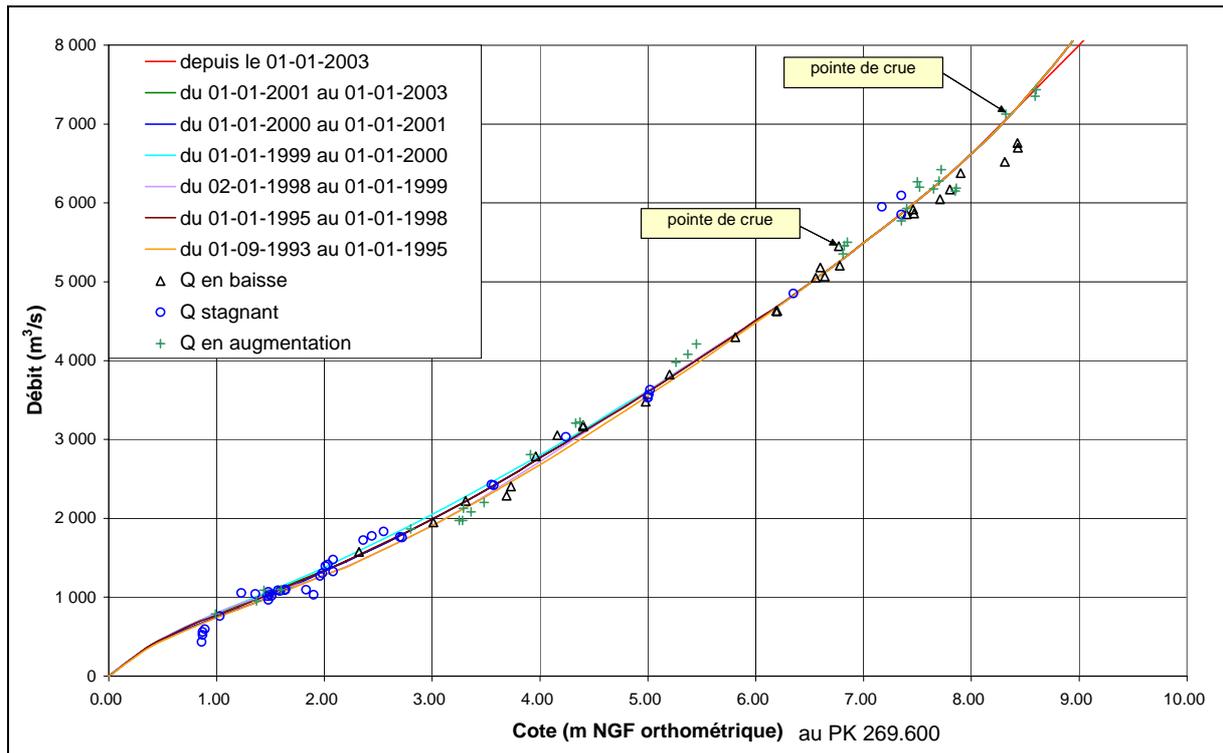
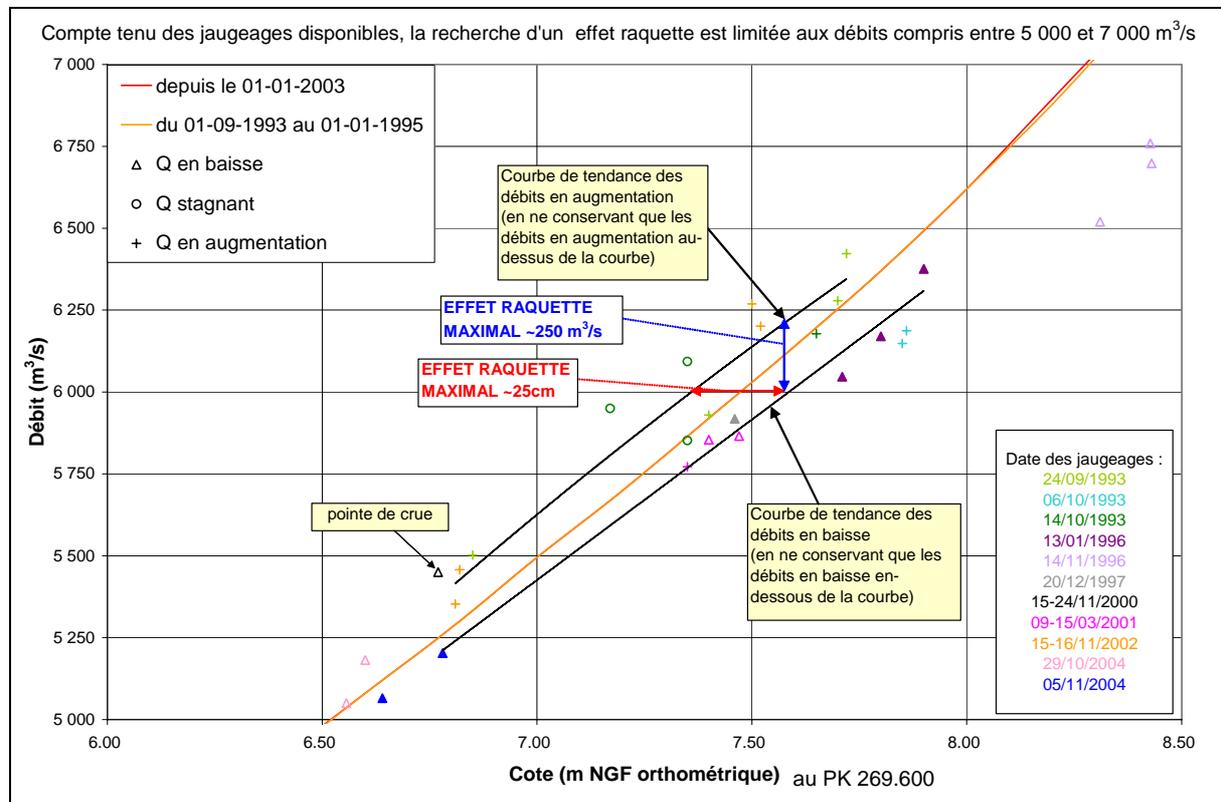


Figure 32 : Jaugeages et instances à la station de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600) depuis 1993.

Sur la Figure 32, on n'observe pas particulièrement d'effet raquette pour les débits compris entre 0 et  $7\,300\text{ m}^3/\text{s}$ . Les débits mesurés pendant une baisse de niveau ne se situent pas en majorité d'un côté de la courbe, et les débits en hausse de l'autre. On pourrait toutefois s'interroger sur la partie située entre  $5\,000$  et  $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ . Le graphe de la Figure 33 est centré sur cette gamme de débits. Il indique que les jaugeages en montée ne correspondent pas au même évènement que ceux en descente (dates différentes).

Toutefois, on peut s'intéresser aux jaugeages toutes dates confondues. Dans ce cas, on trace les courbes de tendance suivantes :

- La courbe de tendance des jaugeages en montée en ne prenant en compte que les jaugeages situés au-dessus de la courbe : on a ainsi l'éventuel effet raquette maximal pour la montée ;
- La courbe de tendance des jaugeages en descente en ne prenant en compte que les jaugeages situés en-dessous de la courbe : on a ainsi l'éventuel effet raquette maximal pour la descente.



**Figure 33 : Jaugeages et instances à la station de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600) depuis 1993 - ZOOM.**

Ces deux courbes sont tracées sur la Figure 33. Elles font apparaître un effet raquette potentiel et maximal. D'après ces jaugeages disponibles, l'effet raquette est au maximum de 25 cm pour un débit donné. Cette valeur est à comparer au 25 à 30 cm de creusement de la courbe du à l'incision du lit mineur (cf. 5.2.2).

A cote constante, l'écart de débit maximal du à l'éventuel effet raquette est inférieur à 250 m<sup>3</sup>/s (cf. Figure 33).

Par ailleurs, si l'on considère une incertitude de  $\pm 5\%$  pour un jaugeage ADCP (cf. paragraphe 2.3.2.1), alors l'incertitude de jaugeage est de 250 à 350 m<sup>3</sup>/s pour des débits compris entre 5 000 et 7 000 m<sup>3</sup>/s.

Ainsi, l'effet raquette maximal est inférieur à l'incertitude de mesure d'un jaugeage.

***Par conséquent, la dispersion des jaugeages peut être due à un effet raquette mais aussi au creusement de la courbe pour les débits faibles à moyens et aux incertitudes de mesure. Seul un modèle mathématique permettrait de quantifier la part de l'effet raquette dans la dispersion des mesures, indépendamment des incertitudes et du creusement de la courbe ces vingt-cinq dernières années pour les débits faibles à moyens.***

#### **5.2.4 Impact du nouveau pont routier sur la courbe de Beaucaire**

Un nouveau pont routier entre Beaucaire et Tarascon a été mis en service en 1999 au PK 269.600.

Pendant la phase de conception, la CNR a mené une étude hydraulique pour le compte du Conseil Général des Bouches-du-Rhône. Cette étude portait sur l'impact de ce nouveau pont sur les niveaux du Rhône aussi bien en phases travaux qu'une fois mis en service.

Il ressort de cette étude que pendant la phase de travaux, l'impact hydraulique était inférieur à 5 cm au regard de la crue centennale. Afin que l'impact de l'ouvrage en service soit nul au regard de la crue centennale, des dragages compensatoires ont été effectués entre 1997 et 1998 entre le PK 269.650 et le PK 270.000. Après ces dragages, l'étude indique que « les pertes de charges induites par [la solution retenue pour ce pont], en considérant que l'écoulement fait en moyenne un angle de 3° par rapport à la normale à l'ouvrage, sont de 1.2 cm pour la crue centennale ». Cette valeur de 1.2 cm après dragages est inférieure à l'incertitude sur la mesure de niveau par les limnimètres.

Par conséquent, l'impact du nouveau pont routier sur la courbe de Beaucaire est négligeable. Des photos prises le 3 décembre 2003 en fin de matinée par l'équipe de jaugeage de la CNR (cf. ANNEXE E) confirment ceci : les photos n'indiquent pas de modification notable du niveau vers les piles du pont.

#### **5.2.5 Bilan**

Dans l'ensemble de ce paragraphe, l'impact de la configuration du Rhône dans le secteur de la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600) a été étudié. Il en résulte :

- Une incision globale du lit mineur à l'aval de Beaucaire. L'étude des courbes entre 1975 et 1999 indique que l'impact de cette incision sur les niveaux est au maximum de 30 cm sur près de 27 ans ;
- Un engravement des berges jusqu'aux ségonnaux depuis 1974. L'impact de cet engravement ainsi que de l'évolution de l'ensemble du champ d'expansion sur les niveaux à la station de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600) n'a pas encore été étudié de façon approfondie ;
- L'existence de deux domaines de fonctionnement sur la courbe de transformation hauteur-débit de Beaucaire-Tarascon : en dessous de 8.50 m NGF (ortho) et au dessus ;
- Il n'est pas évident de mettre en évidence un effet raquette en s'appuyant uniquement sur les jaugeages ;
- Des dragages compensatoires effectués entre 1997 et 1998 après les travaux du nouveau pont de Beaucaire (PK 269.600) ont fait en sorte que l'impact de ce pont soit nul sur les niveaux au droit de la station de Beaucaire-Tarascon.

### 5.3 Construction et validité de la courbe avant la crue de décembre 2003

Les instances de courbe ainsi que les jaugeages utilisés pour les construire sont regroupés sur la Figure 34 (cf. page suivante).

Les instances successives de la courbe de transformation hauteur-débit à la station de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600) ont été construites à partir de nombreux jaugeages :

- Jusqu'en 1994 : exclusivement au moulinet ;
- Depuis 1994 (mais après la forte crue de janvier) à plus de 95% via l'ADCP embarqué.

Il est important de noter que la grande majorité des jaugeages au moulinet a été réalisée à la traille de Beaucaire (PK 272.250). Ils ont ensuite été reportés à la restitution de Beaucaire au PK 269.600 d'après la lecture à l'échelle faite à cette station. Ce report doit prendre en compte d'éventuels débordements en amont de la traille de jaugeage (PK 272.250) pour des débits supérieurs à 7 300 m<sup>3</sup>/s. Ces débordements au niveau de la traille à partir d'environ 7 300 m<sup>3</sup>/s, ainsi que les méthodes de jaugeage actuelles (ADCP) conduisent les équipes CNR à réaliser les opérations de jaugeages au niveau de la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon, à savoir au PK 269.600.

Chronologiquement, la courbe de la station située au PK 269.600 a été construite sur deux domaines :

- L'un correspondant aux débits inférieurs à 7 300 m<sup>3</sup>/s, gamme pour laquelle on a le plus de jaugeages. Cette portion de courbe a subi un léger creusement de 30 cm au maximum ces 27 dernières années pour les débits inférieurs à 7 300 m<sup>3</sup>/s (cf. paragraphe 5.2.2). Dans cette gamme, la totalité du débit est mesurée car il s'écoule dans le lit mineur.
- L'autre portion de courbe a été déterminée à partir des crues de 1993 et 1994 qui ont permis de jauger des débits supérieurs à 7 300 m<sup>3</sup>/s. La courbe a alors été prolongée jusqu'à près de 11 000 m<sup>3</sup>/s par interpolation (courbe orange sur la Figure 34). Il est important de noter que ce tronçon de courbe a été déterminé avant les crues de novembre 2002 et décembre 2003, à partir des jaugeages réalisés lors des crues d'octobre 1993 et de janvier 1994. Ces jaugeages ont été réalisés au moulinet. Ceux de 1993 sont des jaugeages complets (en six points par verticale) et des jaugeages de surface, pour lesquels les débordements ont été pris en compte. Ceux de 1994 sont réalisés uniquement à partir de mesures de surface. La façon dont ont été effectués ces jaugeages est présentée plus en détail ci-après.

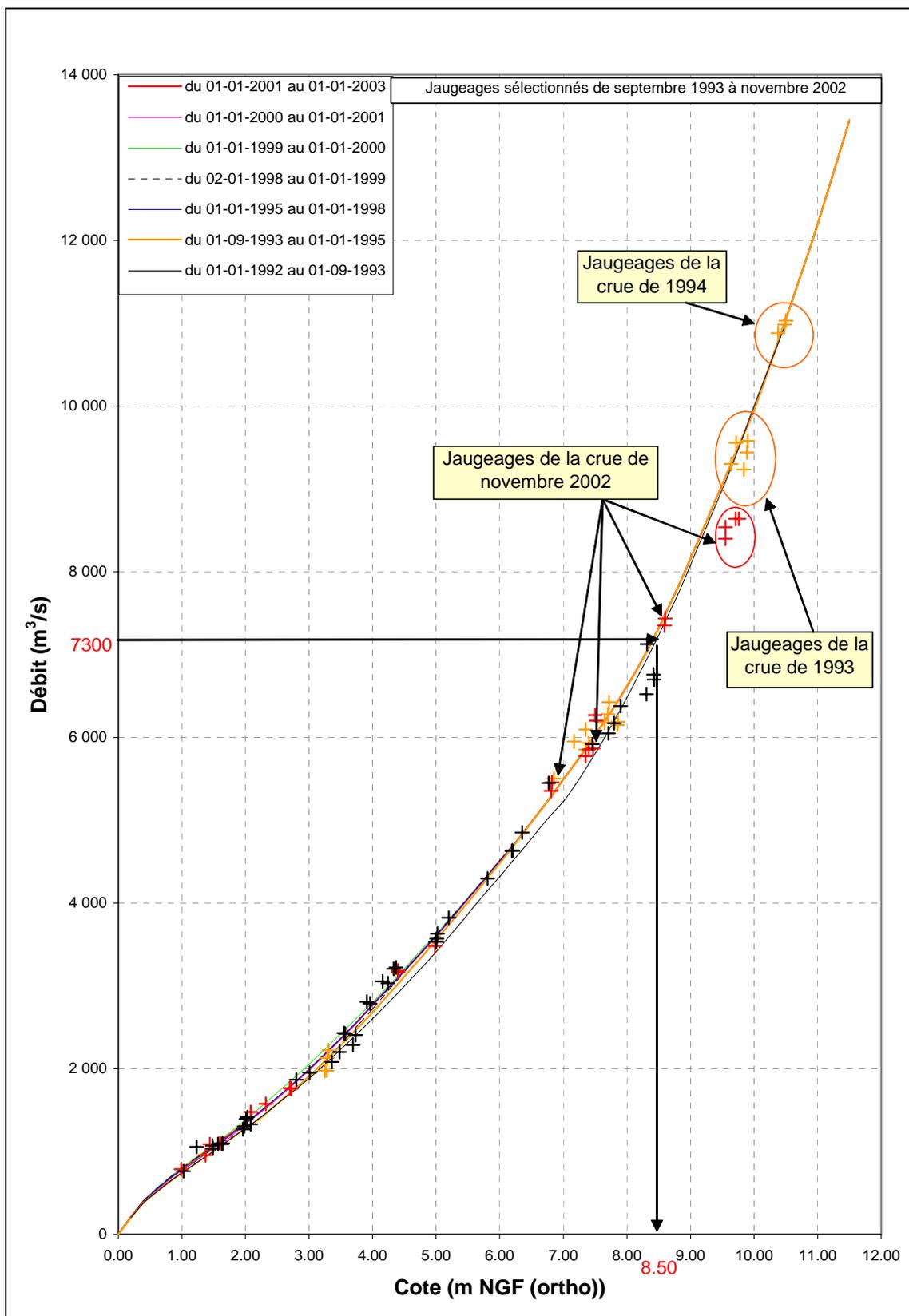


Figure 34 : Instances de la courbe de transformation hauteur-débit en vigueur à la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600) avant la crue de décembre 2003.

En octobre 1993, la CNR a effectué des jaugeages à la fois à la traille (PK 272.250) et à la restitution (PK 269.600). Ces jaugeages comptaient de 24 à 34 verticales.

Les jaugeages effectués à la traille comportent une incertitude liée à l'estimation des débits de débordement. Il y a débordement au niveau de la traille à partir de 8 m NGF (ortho) en rive gauche (cf. 5.2.1), ce qui correspond à environ 7 300 m<sup>3</sup>/s. Lors des jaugeages d'octobre 1993, le niveau au droit de la traille (PK 272.250) était de l'ordre de 9 m NGF (ortho). La part de débit débordant sur plus de 1 500 m en amont de la traille a été estimée par les opérateurs de terrain à environ 600 à 750 m<sup>3</sup>/s en fonction des vitesses observées et des sections débordantes. Ainsi, les débits totaux mesurés pour cette crue (débit jaugé à la traille + débordements) ont été proches de 9 300 m<sup>3</sup>/s à 9 600 m<sup>3</sup>/s pour une hauteur d'eau relevée à la station du PK 269.600 comprise entre 9.6 et 9.9 m NGF (ortho).

A la restitution (PK 269.600), l'équipe de jaugeage a effectué deux jaugeages de surface et un jaugeage toutes profondeurs. Ce jaugeage toutes profondeurs a permis de calculer un coefficient de surface au droit du PK 269.600 :  $C_2^3 = 0.91$  pour un débit total de 6 093 m<sup>3</sup>/s.

En janvier 1994, compte tenu de l'ampleur des débits, la CNR a effectué uniquement des jaugeages de surface (avec 43 verticales) au droit de la station de Beaucaire Restitution (PK 269.600). En effet, pour des raisons techniques et de sécurité un jaugeage complet n'était pas envisageable. Le coefficient de surface utilisé pour déduire de ces mesures de surface le débit total a été le  $C_2$  déterminé lors de la crue d'octobre 1993 au PK 269.600 :  $C_2 = 0.91$ . Des débits de l'ordre de 11 000 m<sup>3</sup>/s ont ainsi été jaugés. L'écoulement était entièrement contenu entre les berges à cet endroit. On remarquera la différence entre la valeur de débit ayant permis de quantifier le coefficient (~6 100 m<sup>3</sup>/s) et le débit calculé à partir de mesures de surface et du  $C_2$  de 0.91 (~11 000 m<sup>3</sup>/s). Toutefois, afin de mieux apprécier le coefficient de surface, une mesure de vitesse en six points sur une seule verticale (représentative de l'écoulement) a été réalisée lors de la mesure à 11 000 m<sup>3</sup>/s en janvier 1994. La valeur de 0.91 du jaugeage complet de 1993 à plus faible débit a été retrouvée.

La Contribution CNR ANNEXE IV montre qu'il est **important de mesurer le coefficient de surface de chaque site de jaugeage**. Si l'on ne dispose pas de jaugeage complet sur le site considéré, alors il est conseillé d'utiliser une valeur de  $C_2$  égale à  $0.880 \pm 2 \cdot 0.041$  (cf. 2.5.5 cas A de la Contribution CNR ANNEXE IV). Ceci veut dire que  $C_2$  a 95% de chances de se trouver entre 0.80 et 0.96. La valeur de 0.91 est bien comprise dans cet intervalle d'incertitude.

L'incertitude sur les débits totaux calculés suite à ces jaugeages de surface est au minimum de  $\pm 10\%$  (cf. 2.3.1).

Après ces jaugeages de 1993 et 1994 et compte tenu du faible nombre de jaugeages pour les forts débits, il a été décidé de faire passer la courbe de transformation hauteur-débit par ces points de l'ordre de 11 000 m<sup>3</sup>/s, calculés avec ce coefficient de surface de 0.91.

---

<sup>3</sup> La définition du coefficient de surface  $C_2$  fait l'objet du paragraphe 2.1.2.2 (jaugeage de surface au moulinet)

La courbe ainsi construite a été celle utilisée dans les hauts débits lors de la crue de décembre 2003. Elle conduisait à un débit de 13 000 m<sup>3</sup>/s pour une cote à l'échelle de 11,30 m NGF (ortho).

*Remarque 1 :*

Lors de la crue de novembre 2002 les jaugeages ont été réalisés à l'ADCP embarqué. Des débits compris entre 5 000 m<sup>3</sup>/s et 9 000 m<sup>3</sup>/s ont été jaugés.

Les plus hauts débits (croix rouges cerclées de rouge sur la Figure 34) correspondent au même évènement. Ils se situent sous la courbe. Or, lors de la mesure, un couplage avec le GPS a été réalisé pour s'affranchir d'une éventuelle mobilité des fonds qui aurait pu conduire à une sous-estimation du débit mesuré à l'ADCP. Les valeurs sont donc issues d'un dépouillement prenant en compte un éventuel déplacement des fonds. Ainsi, ce jaugeage doit être considéré comme tout à fait valide car aucune anomalie n'a été relevée lors du dépouillement. En attente de jaugeages complémentaires, la courbe n'a pas été modifiée.

La seule réserve est qu'au moment du jaugeage l'écoulement était en phase transitoire (décru) et que la hauteur d'eau se situait quasiment à la limite lit mineur/lit majeur. Or le tracé de la courbe H/Q est fait en supposant un régime permanent établi. On peut donc raisonnablement penser que le niveau associé au débit est sans doute légèrement surestimé mais sans pouvoir le quantifier. Toutefois, ces jaugeages sont tout à fait cohérents avec ceux effectués au moulinet en octobre 1993.

*Remarque 2 :*

Les très bas débits (<1000 m<sup>3</sup>/s) sont sans aucun doute influencés par le vent et les sur-cotes marines.

## 5.4 Analyse hydrométrique de la partie haute de la courbe après décembre 2003

L'objet de ce paragraphe est d'analyser d'un point de vue purement **hydrométrique** les données de la crue de 2003. Par la suite (paragraphe 5.5), la même analyse sera conduite mais dans une démarche purement statistique.

### 5.4.1 Estimation d'un débit de pointe à partir des jaugeages et de la courbe préexistante

Le 3 décembre 2003, entre 12h14 et 12h49, l'équipe de jaugeage de la CNR a effectué une mesure à l'ADCP de 11 051 m<sup>3</sup>/s, pour une cote à l'échelle de 11,10 m NGF (ortho) au PK 269.600. La mesure ADCP a été réalisée dans de bonnes conditions (régime relativement stable, variation de niveau inférieure à 3 cm pendant la durée de la mesure). Elle est donc jugée de bonne qualité. **Ainsi, on peut considérer sans grand risque d'erreur que le maximum de la crue est sans doute supérieur à 11 051 m<sup>3</sup>/s, les niveaux ayant continué à augmenter pendant près de 12 h après ce jaugeage.**

Une valeur du débit de pointe peut être estimée à partir de ce jaugeage et de la variation de niveau entre le jaugeage et le maximum de la crue. Ceci fait l'objet de l'analyse qui suit. Pour cela, il est utile de tracer une courbe de tendance de la partie haute de la courbe utilisée en temps réel (cf. Figure 35).

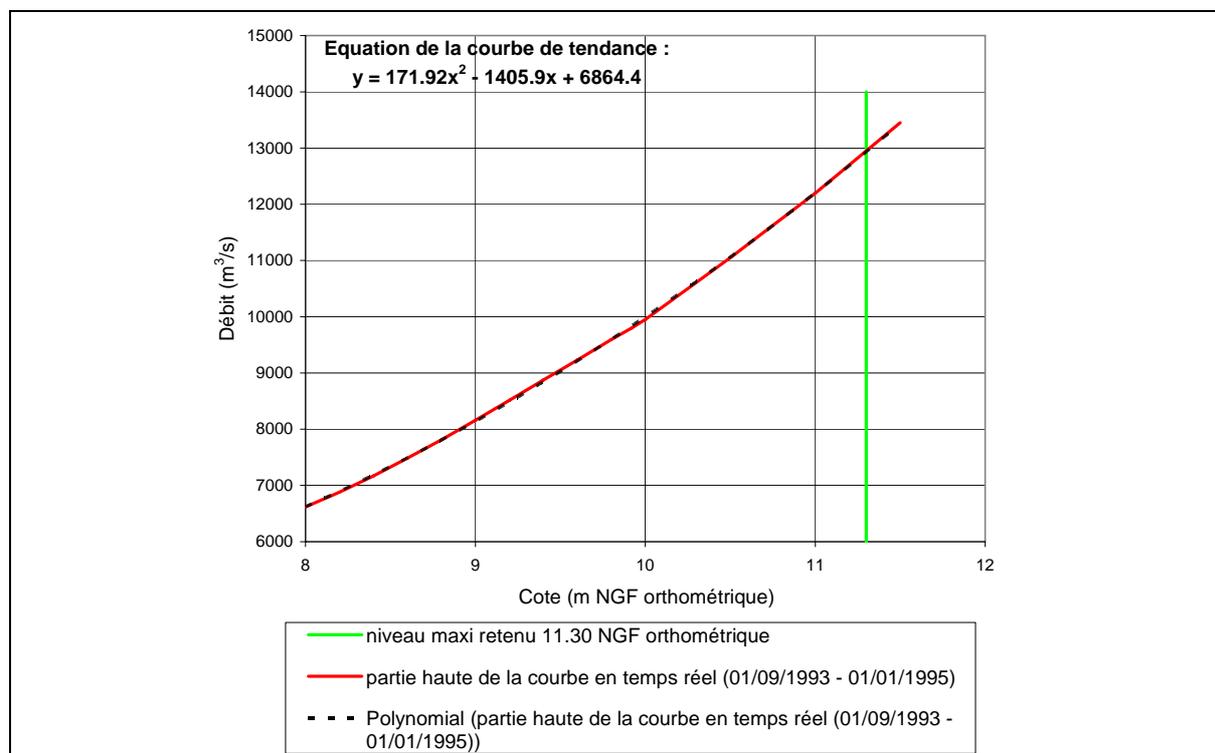


Figure 35 : Partie haute de la courbe utilisée à Beaucaire en temps réel

La pente de cette courbe de tendance (courbe  $y$  dont l'équation est écrite sur la Figure 35) est  $343.84h - 1405.9$ ,  $h$  étant la cote en mètres NGF (ortho).

A 11,10 m, cette pente vaut  $2\,411\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , soit  $241\text{ m}^3/\text{s}$  pour 10 cm.

La cote maximale à Beaucaire est 11,30 m NGF (ortho), soit 20 cm de plus que la cote à l'échelle lue lors du jaugeage précédemment cité. Ainsi, le débit extrapolé à 11,30 m NGF (ortho) vaut :

$$(\text{pente} \text{ à } h_{\text{jaugeage}}) * (0.2\text{m}) + Q_{\text{jaugeage}} \text{ soit } 2411 * 0.2 + 11051 = 11533\text{m}^3/\text{s}$$

Une estimation du débit à 11,30 m NGF (ortho) par cette méthode mène à la valeur de  $11\,533\text{ m}^3/\text{s}$ , hors effets hydrauliques qui auraient artificiellement stabilisé le niveau (cette stabilisation est présentée dans le paragraphe concernant les mesures effectuées pendant la crue de décembre 2003, le paragraphe 5.2.4), alors que le débit continuait à augmenter.

#### *Remarque 1*

En suivant la même méthode, une estimation du débit à 11,30 m NGF (ortho) peut être faite à partir de la variation affichée par le limnigramme entre 12h30 (heure du jaugeage) et le maximum de la crue. D'après la Figure 36, à 12h30, la cote du limnigramme retenu est proche de 11 m NGF (ortho). La variation jusqu'au maximum de la crue est donc de 30 cm. Ainsi :

- A 11 m NGF (ortho), la pente de la courbe est estimée à  $343.84 * 11 - 1405.9 = 2376\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$
- Le débit à 11,30 m NGF (ortho) estimé par extrapolation du débit jaugé et de la variation de cote du limnigramme vaut alors :

$$(\text{pente} \text{ à } h_{\text{limni}_{12h30}}) * (0.3\text{m}) + Q_{\text{jaugeage}} = 2376 * 0.3 + 11051 = 11764\text{m}^3/\text{s}$$

#### *Remarque 2*

Quelque soit la courbe utilisée (celle proposée par la CNR après la crue, qui fait l'objet du paragraphe 5.6, ou bien celles issues d'analyses statistiques présentées dans le paragraphe 5.5), si l'on fait une extrapolation à 11,30 m NGF (ortho) à partir du débit jaugé et d'une variation de cote, on obtient un débit compris entre  $11\,400\text{ m}^3/\text{s}$  et  $11\,800\text{ m}^3/\text{s}$  (en arrondissant à la centaine de  $\text{m}^3/\text{s}$  près), hors effets hydrauliques signalés ci-avant.

***On retiendra que l'extrapolation à partir du débit maximal jaugé indique que le débit de pointe de la crue est nécessairement supérieur à  $11\,600\text{ m}^3/\text{s}$  (en arrondissant à la centaine de  $\text{m}^3/\text{s}$  près). Cette valeur ne tient pas compte de l'effet de modifications des conditions hydrauliques avals.***

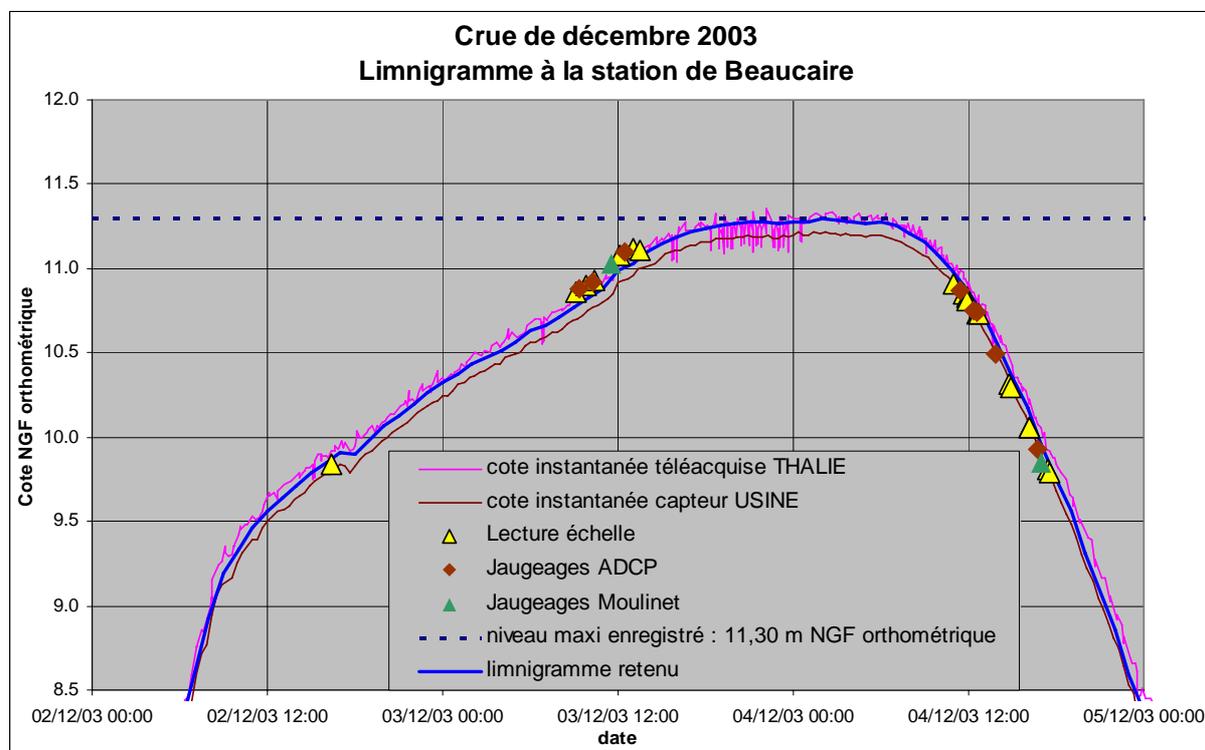
### 5.4.2 Analyse des mesures hydrométriques de décembre 2003

- **Analyse du limnigramme : estimation de la cote maximale au PK 269.600 (cf. Figure 36)**

Au PK 269.600, la CNR dispose de deux capteurs indépendants. L'un est utilisé pour le réseau de surveillance Thalie. L'autre est dédié à l'usine : il donne des indications sur le niveau à la restitution Canal de fuite/Vieux Rhône. Chacun fournit un enregistrement des niveaux.

L'analyse des limnigrammes montre que ceux-ci ne présentent pas d'anomalies particulières pendant la phase de montée de la crue. On enregistre lors du maximum certaines fluctuations très rapides qui illustrent sans doute un début d'engrèvement de la sonde. Cependant la comparaison avec l'enregistrement du capteur dédié à l'usine, implanté au même PK mais avec une sonde différente et plus haute en altimétrie, montre que l'enregistrement dans la base de données Thalie, hors fluctuations erratiques est tout à fait correct. En outre les nombreuses lectures d'échelle, réalisées par les équipes de terrain lors de la phase de montée de la crue, permettent d'affirmer que, l'appareil étant bien calé, ce dernier est représentatif du phénomène à moins de 10 centimètres près.

*Remarque :* le capteur de niveau de la station de Beaucaire Restitution (PK 269.600) a été paramétré de façon à réduire le filtrage des mesures. Celui de l'usine hydroélectrique de Beaucaire effectue un filtrage plus fort ce qui explique qu'il n'y ait pas de fluctuation sur le limnigramme de l'usine.

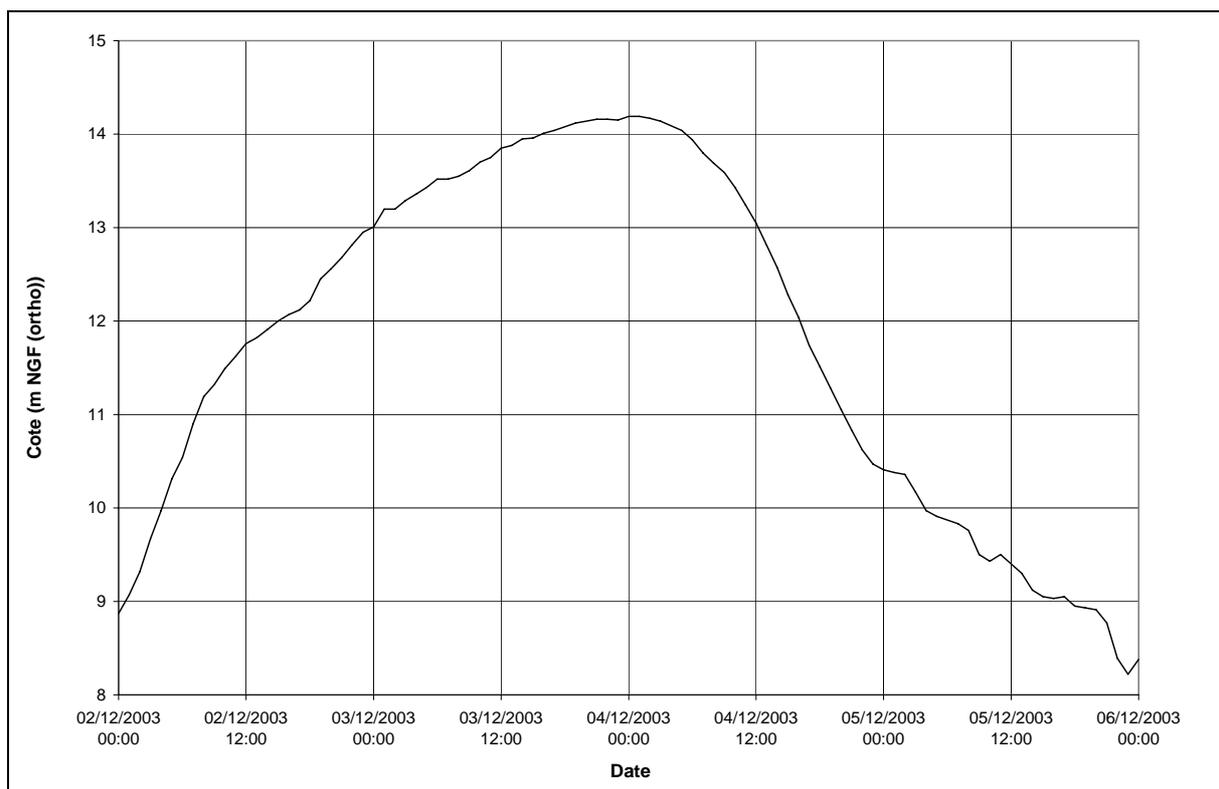


**Figure 36 : Limnigramme à la station de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600)**

Le niveau à la station limnimétrique de Beaucaire-Tarascon (PK269.600) montre un plat entre 17h00 le 03/12/2003 et 6h00 le 04/12/2003, soit sur une durée de 13h environ. Aucune crue enregistrée à Beaucaire n'a mis en évidence une telle stabilité de la pointe de crue et notamment sur une durée aussi longue.

Le 3 décembre 2003 à 12h30, la cote de 11,10 m NGF (ortho) a été relevée à l'échelle pour un jaugeage à l'ADCP. Entre le 3 décembre à 12h30 et le 4 décembre à 3h les deux capteurs de niveaux enregistreraient un exhaussement de 20 cm environ, à l'incertitude de mesure près. Ceci permet d'affirmer que le niveau maximal enregistré à Beaucaire est de 11,30 m NGF (ortho).

Parallèlement, deux éléments sont à considérer : l'augmentation du débit arrivant au PK 269.600 et la modification des conditions à l'aval de la station hydrométrique, notamment par la rupture des digues du Petit-Rhône qui sont apparues à 8h à Saint-Gilles et à 12h à Fourques le 03/12/2003 (cf. 5.7). A cause de la modification de la condition aval (rupture de digues), l'augmentation de débit arrivant par l'amont au PK 269.600 n'a pas entraîné d'augmentation significative des niveaux de la station de Beaucaire. Ce plat n'est pas observé sur le limnigramme à l'aval du barrage de Vallabrègues au PK 262.800 (qui inclut le Gard) qui a continué à monter et a présenté un maximum le 4 décembre 2003 vers 2h du matin (cf. Figure 37).



**Figure 37 : Cote moyenne horaire au PK 262.800 (aval barrage Vallabrègues, après la confluence avec le Gard) durant la crue de décembre 2003**

- **Jaugeages à l'ADCP**

Lors de la crue de décembre 2003, tous les jaugeages ont eu lieu à l'amont immédiat du nouveau pont de Beaucaire (au PK 269.500 alors que le nouveau pont de Beaucaire et le limnimètre se situent au PK 269.600) :

- Le 3/12/03 de 9 h 00 à 13h00, donc avant l'arrivée de l'impact des ruptures de digues : trois jaugeages ont été effectués pendant la phase de montée de la crue ;
- Le 4/12/03 de 11h00 à 18 h 00 : cinq jaugeages ont été réalisés en décrue.

Une attention particulière a été portée à la stabilité des fonds. On notera que lorsqu'on parle d'évolution des fonds dans le cadre des mesures ADCP, il y a lieu d'entendre un déplacement de la couche superficielle du fond et non une variation de la section mouillée lors de la phase de jaugeages. Les mesures de débit du 3/12/2003 ont été exclusivement conduites avec l'ADCP Broadband 600 kHz, moins sensible à la variation des fonds que l'ADCP Broadband 1200 kHz. Le 4/12/2003, l'ADCP Broadband 1200 kHz a également été utilisé mais s'est effectivement révélé beaucoup plus sensible à la mobilité des fonds. Pour mettre en évidence le mouvement des fonds et le quantifier, les ADCP ont été couplés avec un GPS différentiel. Ceci a permis de dépouiller les mesures ADCP en tenant compte de l'éventuel déplacement du fond.

**N.B.** : le détail de l'impact d'un déplacement des fonds sur un jaugeage, et la prise en compte dans ce dépouillement sont présentés dans la Contribution CNR ANNEXE III.

Rappelons qu'au moment des jaugeages et au droit du profil jaugé il n'y avait aucun débordement significatif sur le lit majeur. Les débordements importants et participants à l'écoulement se produisent à l'aval du nouveau pont de Beaucaire, et donc à l'aval du PK 269.600, principalement en rive gauche et en aval immédiat de la station d'épuration.

- **Jaugeages au moulinet**

Parallèlement aux jaugeages à l'ADCP, deux jaugeages de surface au moulinet ont été réalisés :

- Le premier le 3/12/03 entre 11 h et 12 h en phase de montée ;
- Le second le 4/12/03 entre 16 h 30 et 17 h 30 en phase de décrue.

Le moulinet utilisé avait été récemment étalonné par deux organismes habilités différents, l'OFEG (à Bern en Suisse) et la OTT (à Kempten en Allemagne). Les deux courbes d'étalonnage sont identiques. D'après le paragraphe 2.3.1 concernant les incertitudes d'un jaugeage de surface au moulinet, nous pouvons retenir une incertitude minimale de  $\pm 10\%$  pour ces deux jaugeages. Cette valeur minimale d'incertitude correspond à de bonnes conditions hydrauliques.

Le coefficient de surface, permettant de passer du débit de surface au débit total était historiquement de 0,91 au PK 269.600 sur les très fortes crues (cf. paragraphe 5.3). Pour la crue de décembre 2003, il a été recalculé à partir

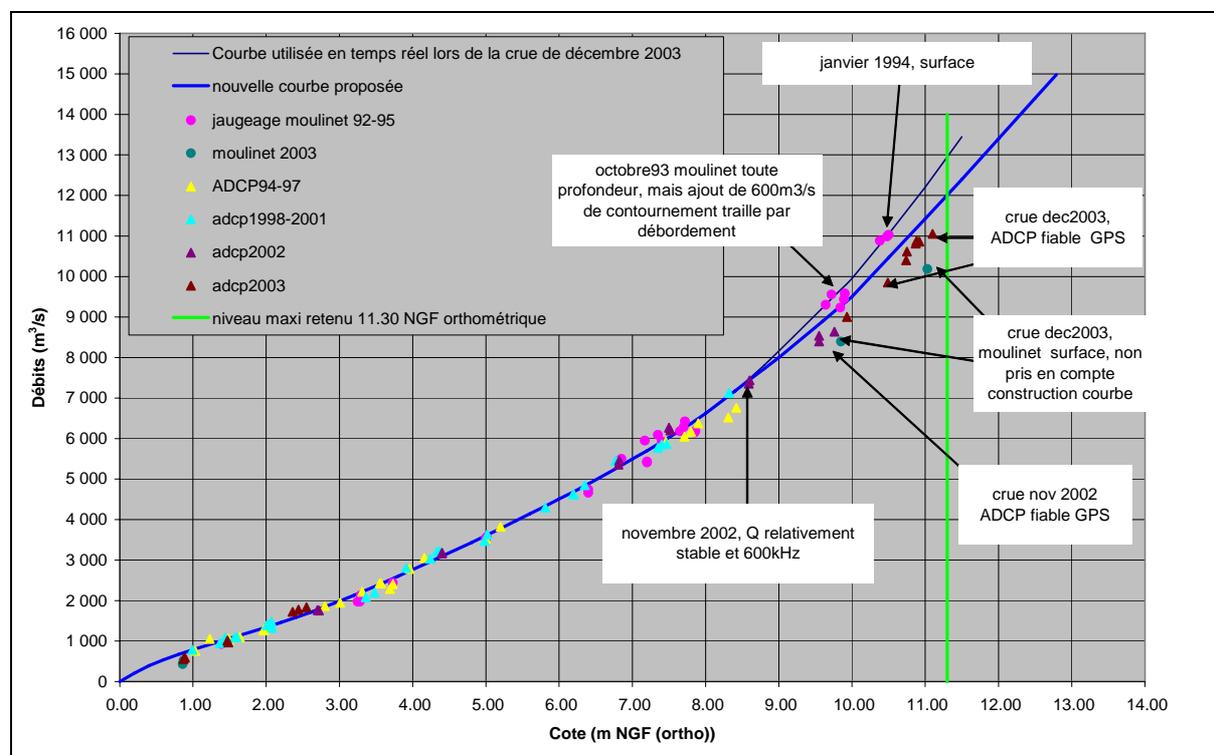
des mesures de débit à l'ADCP. Il vient alors  $C2 = 0.95$ . On a déjà vu dans le paragraphe 5.3 que le coefficient de surface à Beaucaire Restitution (PK 269.600) a 95% de chances de se trouver entre 0.80 et 0.96. Le nouveau coefficient de 0.95 se trouve dans la plage d'incertitude.

Les deux jaugeages au moulinet de décembre 2003 ont été réalisés à l'aide d'une perche (montée sur un bateau lui-même stabilisé dans l'écoulement avec son moteur) dans le seul objectif d'apprécier l'ordre de grandeur des débits écoulés. De plus, il comprennent peu de verticales (une quinzaine pour près de 300m de large). L'ADCP étant plus fiable, ces deux jaugeages ne sont pas pris en compte dans le cadre de l'élaboration du tracé de la nouvelle courbe de transformation hauteur-débit. En effet, étant entachés d'une plus grande incertitude, ils n'apporteraient pas de plus value dans le tracé de la courbe.

#### 5.4.3 Impact des jaugeages de 2003 sur la courbe : courbe proposée par la CNR immédiatement après la crue de décembre 2003

La Figure 38 représente :

- L'ensemble des jaugeages réalisés par CNR au cours des dernières années ;
- La courbe de transformation hauteur-débit utilisée durant le passage de la crue de décembre 2003 ;
- La courbe de transformation hauteur-débit issue des analyses et investigations réalisées juste après la crue et explicitées ci-après.



**Figure 38 : Courbe de transformation à la station de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600)**

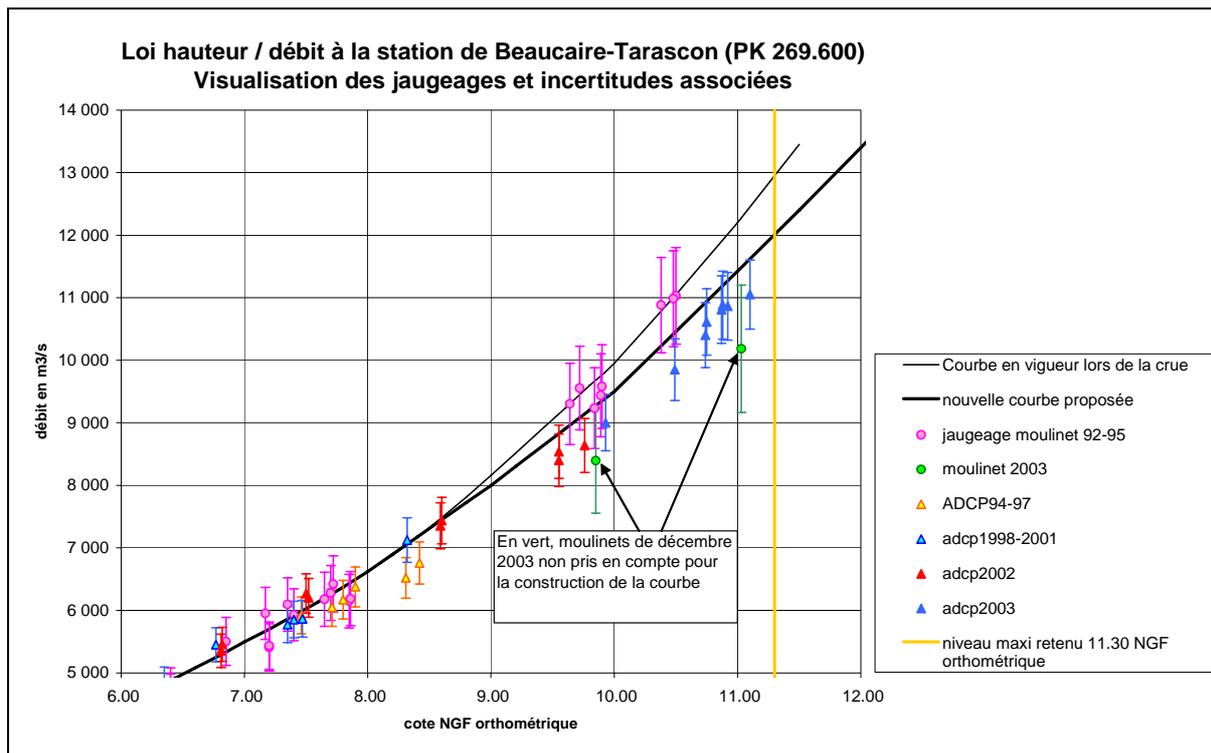
Ce graphe montre que les mesures réalisées en décembre 2003 confirment la tendance constatée lors de la crue de novembre 2002 : la courbe de transformation hauteur-débit basée sur les jaugeages de 1993 et 1994 (et valable alors pour ces deux crues) a été utilisée lors du passage de la crue de décembre 2003 mais avait tendance, pour cette crue de 2003, à légèrement surévaluer les débits pour un même niveau, au-delà de 8.50 m NGF (ortho) (débits supérieurs à 7 300 m<sup>3</sup>/s).

L'analyse des jaugeages en crue réalisés depuis 1993 a permis de les valider et de les intégrer à la courbe en leur affectant des incertitudes différentes en fonction des conditions de réalisation de la mesure. En général, suite à ce qui a été présenté dans le chapitre 2, il a été retenu une incertitude minimale de :

- $\pm 7\%$  pour les jaugeages au moulinet explorant toute la section en travers du fleuve ;
- $\pm 8\%$  pour les jaugeages au moulinet explorant toute la section en travers du fleuve et prenant en compte une estimation des débordements ;
- $\pm 5\%$  pour les jaugeages à l'ADCP ;
- $\pm 10\%$  pour les jaugeages de surface réalisés en janvier 1994 ;

*Remarque* : Les deux jaugeages au moulinet de décembre 2003 ont été réalisés à l'aide d'une perche dans le seul objectif d'apprécier l'ordre de grandeur des débits écoulés. De plus, il comprennent peu de verticales (une quinzaine pour près de 300 m de large). L'ADCP étant plus fiable, ces deux jaugeages ne sont pas pris en compte dans le cadre de l'élaboration du tracé de la nouvelle courbe de transformation hauteur-débit. En effet, étant entachés d'une plus grande incertitude, ils n'apporteraient pas de plus value dans le tracé de la courbe.

La courbe proposée par la CNR juste après la crue de décembre 2003 est tracée de façon à intégrer l'ensemble des points de jaugeage en tenant compte des incertitudes affectées à chaque mesure (exceptés les deux jaugeages au moulinet réalisés en 2003 dont l'objet est de vérifier les ordres de grandeur). Les modifications ne concernent que la partie haute de la courbe comme présentée dans le graphe ci-après.



**Figure 39 : Partie haute de la courbe de transformation hauteur-débit à la station de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600)**

L'évolution du lit moyen évoqué au paragraphe 5.2 a probablement été une des causes ayant entraîné un exhaussement de la courbe entre 1994 et 2003. Toutefois, on ne peut pas prédire le sens de cette évolution dans les années à venir. La nouvelle courbe proposée par la CNR tient compte de ceci en intégrant l'ensemble des jaugeages effectués dans les hauts débits (supérieurs à 7 300 m<sup>3</sup>/s). Comme on le verra au paragraphe 5.5, cette courbe proposée est très proche de la courbe issue de l'analyse statistique (cf. Figure 43).

En revanche, **cette courbe hauteur-débit ne permet pas de tenir compte de l'influence des brèches dans les digues du Petit-Rhône**. Pour un même débit transitant à Beaucaire, les niveaux impactés par le remous des brèches sont plus bas, par rapport à une situation sans brèches. La détermination du débit à partir de la simple lecture de la courbe de transformation hauteur-débit établie conduit à une sous-évaluation du débit. De ce fait, les valeurs de débits influencés doivent être réévaluées par un calcul de l'impact des abaissements dû aux brèches. Cette approche est réalisée à l'aide des modèles mathématiques.

## 5.5 Analyse statistique de la partie haute de la courbe

L'analyse statistique de la partie haute de la courbe de transformation hauteur-débit de la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600) fait l'objet d'une partie de la Contribution CNR ANNEXE V (Etude réalisée par le CETIAT à la demande de la CNR).

Dans cette étude, une courbe hauteur-débit à la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600) est construite à partir de plusieurs couples de valeurs débit-hauteur issus de jaugeages : 28 jaugeages au moulinet (toutes profondeurs et surface) et 80 jaugeages à l'ADCP ont été utilisés. Ils couvrent une période allant de novembre 1992 à décembre 2003 et une plage de débits comprise entre 762 m<sup>3</sup>/s et 11 051 m<sup>3</sup>/s.

Au cours de l'étude, la CNR a demandé au CETIAT l'analyse de trois échantillons en particulier :

- **Échantillon n° 1** : Il est obtenu à partir de l'échantillon complet (comportant 108 jaugeages) auquel sont enlevés les jaugeages de cote inférieure à 3 m et les jaugeages reconnus aberrants (jaugeages ADCP du 10 septembre 2002). Le rapport d'étude CETIAT n° 2360031 a montré que les jaugeages de surface ont une incertitude plus importante que les autres. Les jaugeages de surface redondants avec un jaugeage complet (jaugeage complet au moulinet ou jaugeage ADCP) sont donc supprimés. En effet, ils permettent de confirmer la mesure complète au moulinet ou à l'ADCP mais ont une incertitude plus grande. Ils n'apportent donc pas de plus value sur la qualité de l'interpolation. L'échantillon n° 1 compte alors 70 jaugeages.

Comme indiqué dans le paragraphe 5.2.2, les lits mineur et majeur à l'aval de Beaucaire ont subi une modification durant ces dix dernières années (et même au-delà). Pour rechercher un éventuel impact sur la courbe de transformation hauteur-débit de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600), les échantillons n° 2 et n° 3 ont été construits à partir de l'échantillon n° 1 :

- **Échantillon n° 2** : cet échantillon comprend tous les jaugeages contenus dans l'échantillon n° 1 jusqu'à janvier 1994 inclus (16 jaugeages) ;
- **Échantillon n° 3** : cet échantillon comprend tous les jaugeages contenus dans l'échantillon n° 1 à partir de mars 1994 inclus (54 jaugeages).

Une éventuelle évolution de la courbe depuis 1994 sera ainsi étudiée. Il ne faut toutefois pas exclure d'autres phénomènes non connus à ce jour, distincts de l'évolution des lits mineur et majeur, mais qui pourraient expliquer cette évolution. Il convient de noter que compte tenu du suivi rigoureux de la courbe de transformation hauteur-débit du PK 269.600, toute anomalie liée à un affaissement de l'échelle ou à de nouvelles méthodes de mesure n'est pas envisageable.

Plusieurs types de loi d'interpolation ont été appliqués à chacun de ces échantillons :

- **Régression linéaire**, de la forme  $Q = b \cdot h + a$  ;
- **Régression polynomiale du second degré**, de la forme  $Q = c \cdot h^2 + b \cdot h + a$  ;
- **Loi puissance**, de la forme  $Q = b \cdot h^c$  ;
- **Loi de Manning-Strickler**, de la forme  $Q = b \cdot h^{5/3} + a$ .

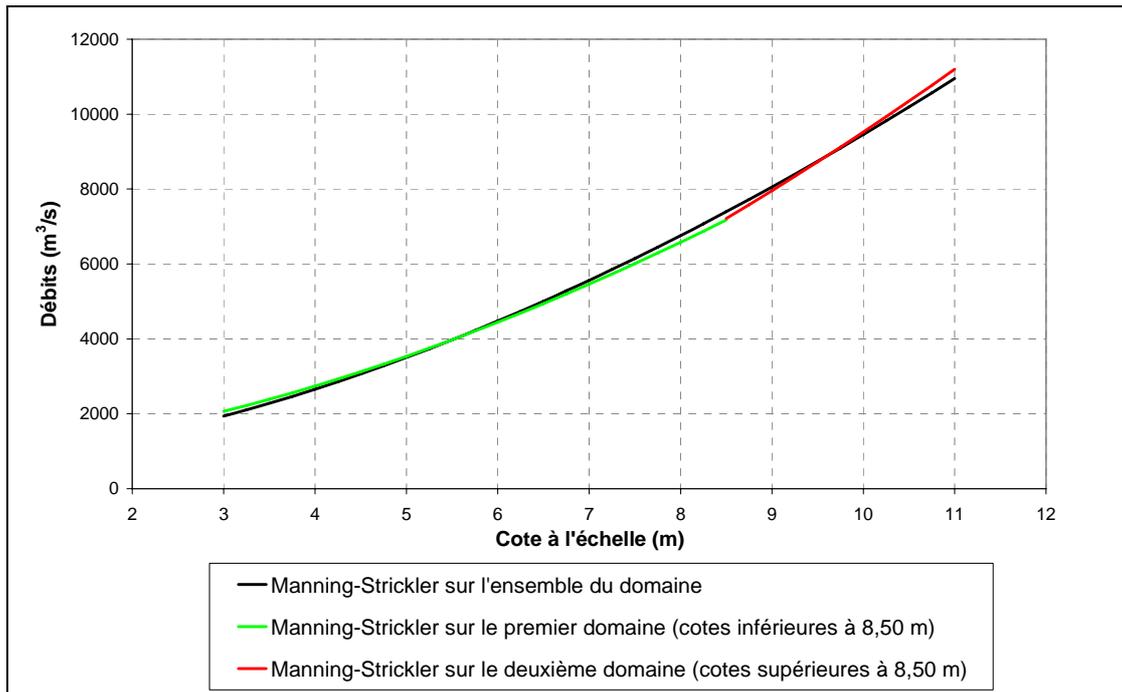
Après analyse, le choix de la loi d'interpolation à conserver a été guidé par divers paramètres dont le premier est la répartition des **résidus : ceux-ci doivent être répartis de façon aléatoire autour de la valeur moyenne**. Après étude sur le cas de Beaucaire, il s'avère que l'on observe une tendance sur la répartition des résidus pour la régression linéaire et pour la loi en puissance. Ces deux lois sont donc, d'un point de vue statistique, à considérer comme moins satisfaisantes que les deux autres. En revanche, pour la régression polynomiale de degré 2 comme pour la loi Manning-Strickler, la répartition des résidus ne montre pas de tendance marquée. La loi polynomiale est une loi purement mathématique alors que la loi de Manning-Strickler est une loi physique représentative des écoulements à surface libre en régime permanent. Pour cette raison, **la loi de Manning-Strickler est préférable**, elle est donc **choisie pour l'interpolation de la courbe hauteur-débit de Beaucaire**.

L'étude statistique de la courbe doit être complétée par des éléments rapportés par les expérimentateurs afin que la construction de la courbe et son utilisation soient les plus pertinentes possibles. On notera que des études de terrain ont montré qu'à l'aval de la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600), la transition entre le lit mineur et le lit majeur moyen se fait approximativement pour un débit de 7 300 m<sup>3</sup>/s. Ce débit correspond à un niveau proche de 8,50 m NGF (ortho) au PK 269.600. Ceci conduit à examiner deux domaines distincts : l'un en-dessous de 8,50 m NGF (ortho) et l'autre au-dessus. La distinction de deux domaines pour les trois échantillons a donc été étudiée.

Ainsi, pour l'échantillon n° 1, la loi de Manning-Strickler a été appliquée :

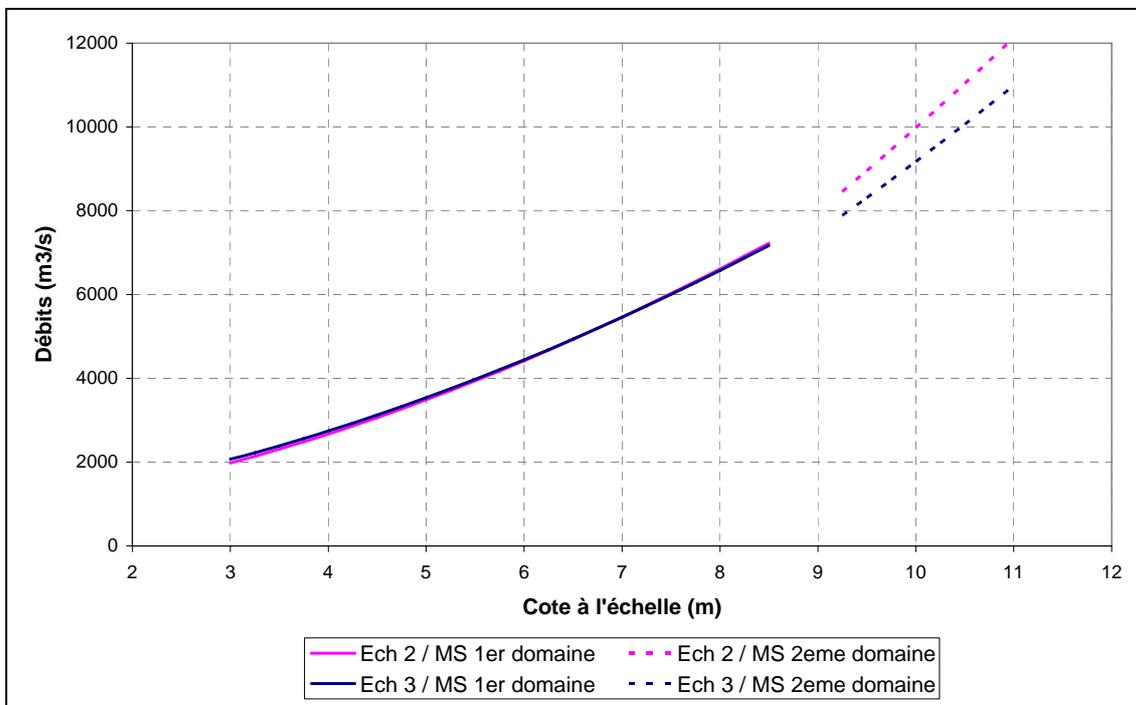
- A l'ensemble de l'échantillon n° 1 ;
- Aux mesures de l'échantillon n° 1 situées en-dessous d'environ 8,50 m NGF (ortho) ;
- Aux mesures de l'échantillon n° 1 situées au-dessus d'environ
- 8,50 m NGF (ortho).

Les résultats figurent sur le graphique ci-dessous :



**Figure 40 : Beaucaire – Application de la loi de Manning-Strickler à l'échantillon n° 1 (Nov. 1992 – Déc. 2003) sur l'ensemble du domaine et sur chacun des sous-domaines**

Le même type d'étude que pour l'échantillon n° 1 a été mené sur les échantillons n° 2 et n° 3 (cf. Figure 41) :



**Figure 41 : Beaucaire – Application de la loi de Manning-Strickler (MS) aux échantillons n° 2 et n° 3 sur chacun des deux sous-domaines**

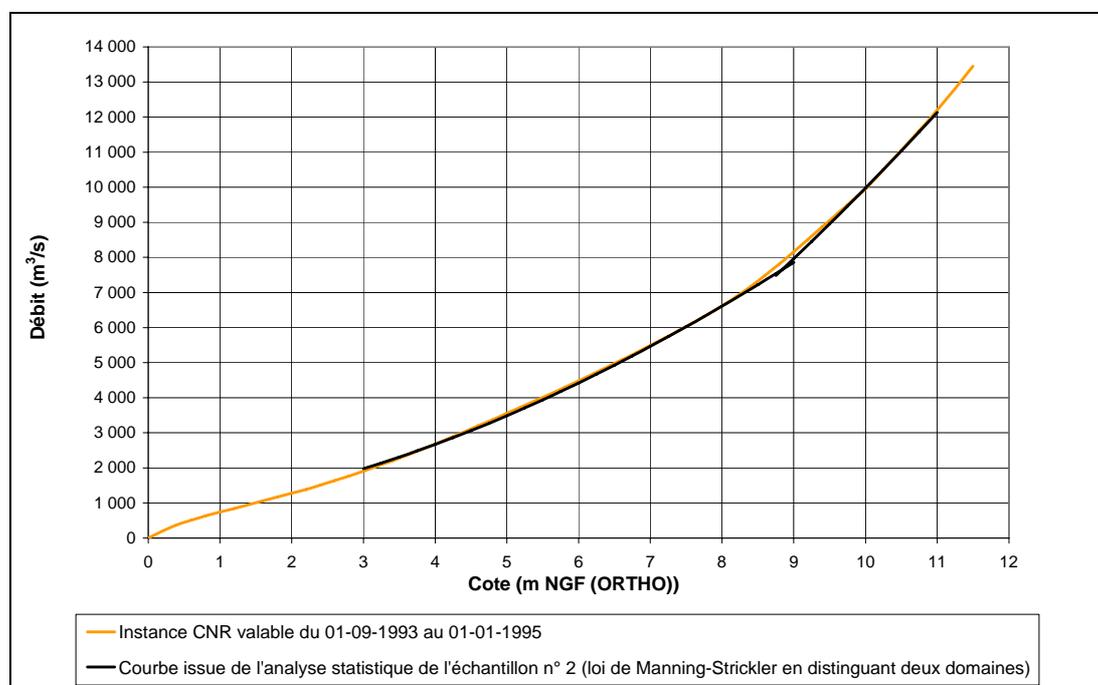
On observe que la courbe construite sur le premier domaine (cotes inférieures à 8,50 m) est à peu près stable durant l'ensemble de la période (1992 à 2003). **En revanche, sur le deuxième domaine l'écart est important et peut être interprété comme une évolution de la courbe au cours du temps.**

La Figure 41 montre que pour les cotes supérieures à 8,50 m, l'écart entre les courbes sera d'autant plus important que la cote sera grande. Pour la cote maximale enregistrée au cours de la période à la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600), les valeurs de débit prédites en fonction de la loi et du domaine choisis figurent dans le tableau 1.

**Tableau 1 - Valeurs de débits estimés pour 11,3 m NGF (ortho) à la station de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600) par lecture de la courbe**

	Modèle polynomial degré 2 Domaine complet (m3/s)	Modèle Puissance Domaine complet (m3/s)	Modèle Manning-Strickler Domaine complet (m3/s)	Modèle Manning-Strickler (domaine > 8,6 m) (m3/s)
Echantillon n°1	11 643	10 801	11 419	11 722
Echantillon n°2	12 564	11 622	12 186	12 800
Echantillon n°3	11 277	10 585	11 155	11 554

L'échantillon n° 2 comprend les jaugeages qui ont permis de tracer la courbe utilisée pendant la crue par la CNR (cf. paragraphe 5.3).



**Figure 42 : Comparaison de la courbe utilisée pendant la crue de décembre 2003 et de la courbe construite par analyse statistique de l'échantillon n° 2 (période novembre 1992 – janvier 1994 inclus).**

La validité de cette courbe utilisée en temps réel est corroborée par l'analyse statistique des jaugeages qui ont permis de la construire (cf. Figure 42). Le détail de cette interpolation statistique est présenté à travers l'étude de l'échantillon n° 2 dans la Contribution CNR ANNEXE V. Il convient de noter que le débit correspondant à la cote de 11,30 m NGF (ortho) est de 12 800 m<sup>3</sup>/s pour l'échantillon n° 2.

La partie haute de la courbe (débits supérieurs à 7 300 m<sup>3</sup>/s) construite à partir de l'échantillon n° 3 ne comprend que des jaugeages effectués pendant les crues de novembre 2002 et décembre 2003. L'utilisation de cette courbe pour estimer le débit correspondant à la cote de 11,30 m NGF (ortho) conduit à la valeur de 11 554 m<sup>3</sup>/s d'après le tableau ci-avant.

Les calculs d'incertitudes ont été menés sur les trois échantillons. L'incertitude globale est la combinaison de trois composantes d'incertitude qui sont :

- Incertitude liée aux jaugeages qui servent de référence pour la construction de la courbe (cf. Contribution CNR ANNEXE IV) ;
- Incertitude liée à la qualité de l'interpolation : elle résulte des écarts entre les valeurs de référence (jaugeages) et la courbe construite en choisissant une certaine loi d'interpolation ;
- Incertitude liée à la lecture de la courbe : elle résulte de la pente locale de la courbe et de l'incertitude sur la mesure de niveau.

Pour chaque courbe obtenue, il est possible de déterminer l'incertitude associée à la valeur de débit prédite. Il a été montré une évolution de la courbe dans le temps pour les cotes supérieures à 8,50 m NGF (ortho), l'incertitude estimée sur l'échantillon n° 1 intègre donc la dérive de la courbe au cours de la période considérée. Les incertitudes estimées sur les échantillons n° 2 et n° 3 n'intègrent pas cette dérive et conduisent à des valeurs d'incertitude plus faibles.

Les valeurs maximales calculées figurent dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 2 - Incertitudes estimées**

	U(Q <sub>lu</sub> ) maximale sur domaine complet (k=2)	U(Q <sub>lu</sub> ) sur domaine < 8,5 m (k=2)	U(Q <sub>lu</sub> ) sur domaine > 8,5 m (k=2)
Echantillon n° 1	13,5%	13,5%	13,5%
Echantillon n° 2	13,7%	12,5%	10,7%
Echantillon n° 3	11,4%	12,2%	6,0 %

**Pour l'échantillon n° 1** (novembre 1992 à décembre 2003), l'incertitude maximale sur le débit lu sur la courbe est de ± 13,5 %, quelque soit le domaine considéré. Cette valeur pourra être arrondie à ± 14 %.

**Pour l'échantillon n° 2** (novembre 1992 à janvier 1994), l'incertitude maximale sur le débit lu sur la courbe est du même ordre de grandeur que celle de l'échantillon n° 1 lorsque l'on considère l'ensemble du domaine. En revanche, la valeur est légèrement plus faible pour chaque domaine séparément (cotes soit inférieures soit supérieures à 8,50 m). On notera cependant que dans les hauts débits, l'incertitude est plus faible que dans les bas débits, ce qui est à considérer avec prudence d'un point de vue hydrométrique. Après analyse des données, cette valeur plus basse s'explique par le nombre de points utilisés pour faire l'interpolation sur le deuxième domaine : ces points sont à la fois peu nombreux et issus de jaugeages réalisés sur une courte période (octobre 1993 et janvier 1994 pour le deuxième domaine).

**Pour l'échantillon n° 3** (mars 1994 à décembre 2003), quelque soit le domaine considéré, l'incertitude est plus faible que pour les autres échantillons. On notera que pour le deuxième domaine (cotes supérieures à 8,50 m), l'incertitude sur le débit lu sur la courbe est seulement de  $\pm 6 \%$ , ce qui est à considérer avec prudence d'un point de vue hydrométrique. De même que pour l'échantillon n° 2, cette faible valeur de l'incertitude s'explique par un nombre réduit de points, issus de jaugeages réalisés sur une courte période (novembre 2002 et décembre 2003).

### **En conclusion,**

L'étude statistique met en évidence le fait que la loi la plus adaptée pour la courbe hydrométrique de Beaucaire-Tarascon est celle de Manning-Strickler, en distinguant deux domaines :

- L'un pour les cotes inférieures à 8,50 m NGF (ortho) ;
- L'autre pour les cotes supérieures à 8,50 m NGF (ortho).

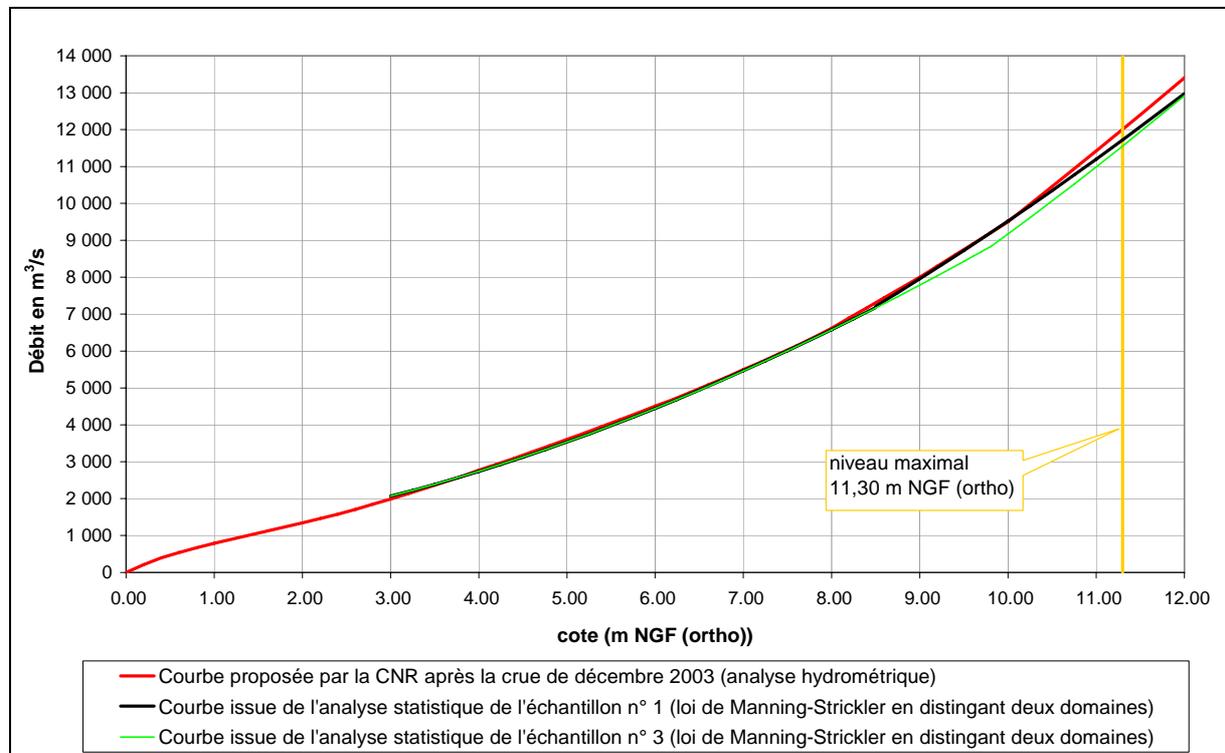
Par ailleurs, l'écart constaté entre la courbe construite à partir de l'échantillon n° 2 (deuxième domaine) et celle construite à partir de l'échantillon n° 3 (deuxième domaine) peut être interprété comme une évolution de la courbe au cours de la période (novembre 1992 à décembre 2003).

L'incertitude obtenue sur les débits prédits par la courbe de Manning-Strickler établie à partir de l'échantillon n° 1 (période Nov. 1992 – Déc. 2003) est de  $\pm 14 \%$  sur l'ensemble du domaine. Cette valeur intègre la dérive de la courbe au cours de la période considérée.

Il peut être pertinent de considérer une période plus courte, qui doit logiquement conduire à une incertitude plus faible. Cependant, la réduction de la taille de l'échantillon réduit la fiabilité de la valeur d'incertitude estimée. Ainsi, on peut conclure que l'incertitude sera comprise entre une limite basse de l'ordre de  $\pm 6 \%$  et la limite haute de  $\pm 14 \%$ . Entre ces deux limites, une valeur réaliste de l'incertitude est de l'ordre de  $\pm 10 \%$  à  $\pm 12 \%$  (voir tableau 2), valeur qui pourra être précisée par l'intégration des jaugeages futurs.

D'après le CETIAT, pour le gestionnaire, deux choix sont possibles :

- Utiliser la courbe de l'échantillon n° 1 sur le domaine complet, avec une incertitude de  $\pm 14 \%$ .
- Utiliser les courbes par domaine de l'échantillon n° 3, avec une incertitude de  $\pm 10 \%$  à  $\pm 12 \%$ .



On observe que les trois courbes tracées sur le graphe ci-dessus sont confondues sur le domaine correspondant aux cotes inférieures à 8,50 m NGF (ortho), et très proches les unes des autres pour le domaine correspondant aux cotes supérieures à 8,50 m NGF (ortho).

## 5.6 Courbe de transformation hauteur-débit proposée

### 5.6.1 Courbe de transformation hauteur-débit proposée

Pour la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600), à l'issue de l'analyse menée dans ce rapport, la courbe de transformation hauteur-débit proposée est celle qui a été construite après la crue. Elle intègre les jaugeages effectués pendant la crue. Il s'agit de la courbe issue de l'analyse hydrométrique (cf. 5.4.3).

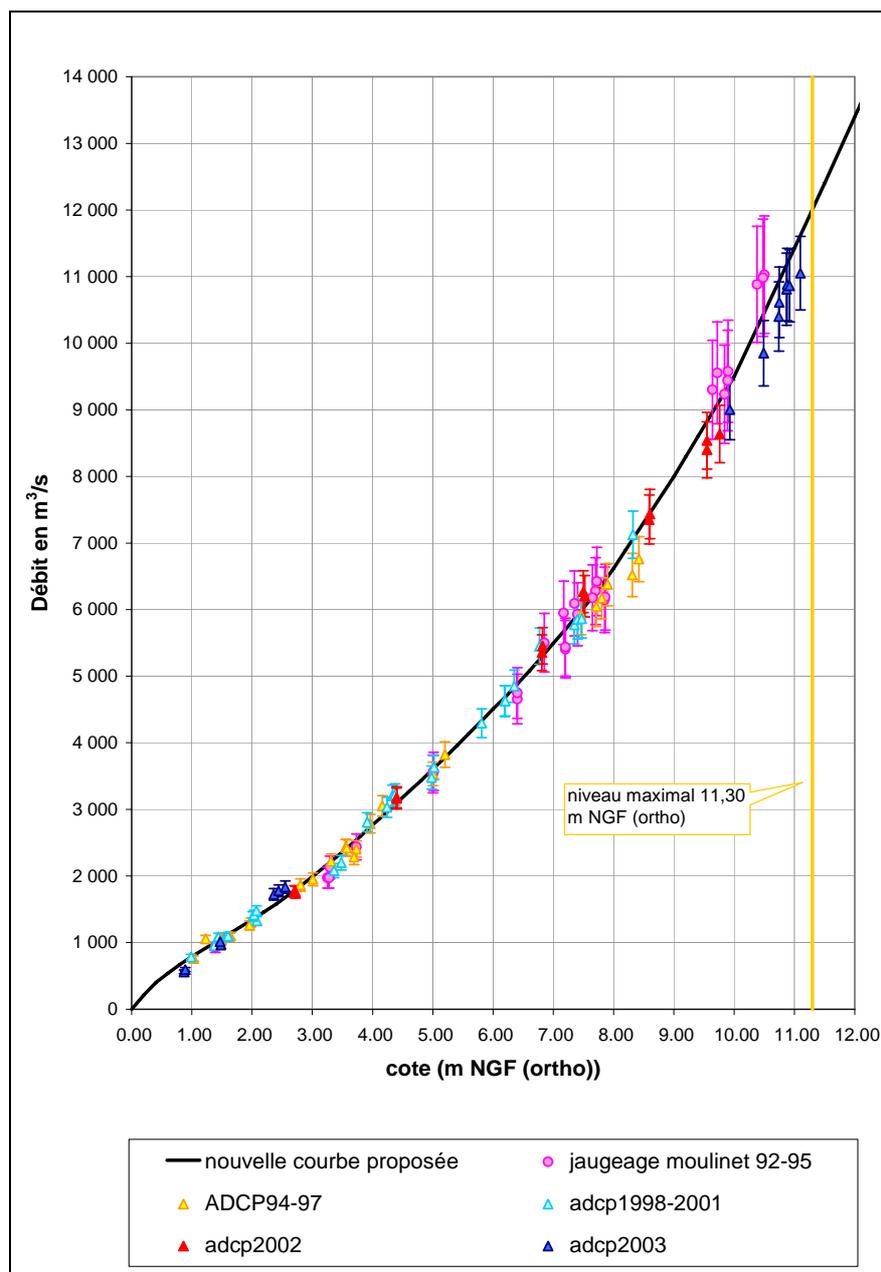


Figure 44 : Nouvelle courbe de transformation hauteur-débit à la station de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600), avec une incertitude globale de  $\pm 10\%$

### 5.6.2 Débit de la crue de 2003 issu de la nouvelle relation $Q(h)$ (hors effets de brèches)

Par lecture directe de la nouvelle courbe (cf. Figure 44), le débit maximal de la crue de décembre 2003 à la station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon est égal à 12 000 m<sup>3</sup>/s.

**La lecture d'une courbe hauteur-débit ne permet pas de tenir compte de l'influence des brèches dans les digues du Petit-Rhône.** Pour un même débit transitant à Beaucaire, les niveaux impactés par le remous des brèches sont plus bas, par rapport à une situation sans brèches. La détermination du débit à partir de la simple lecture de la courbe de transformation hauteur-débit établie conduit à une sous-évaluation du débit. De ce fait, les valeurs de débits influencés doivent être réévaluées par un calcul de l'impact des abaissements dû aux brèches. Cette approche est réalisée à l'aide des modèles mathématiques.

Les analyses hydrométrique et statistique menaient aux résultats suivants :

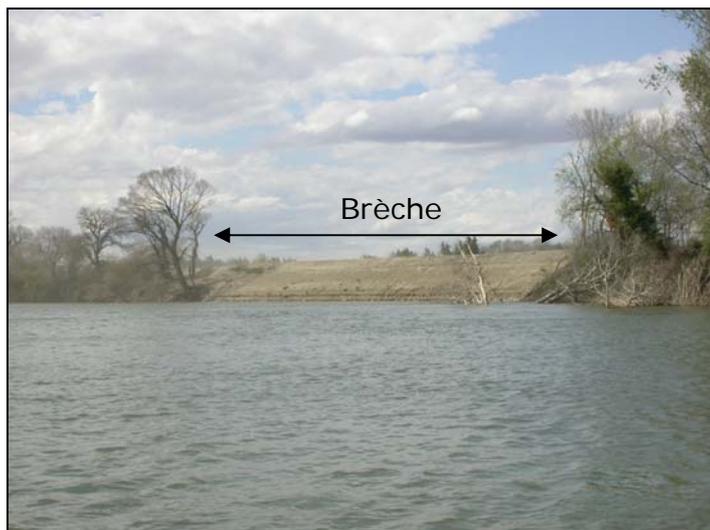
Valeur de débit (en m <sup>3</sup> /s) estimée pour 11.30m NGF (ortho) à la station de Beaucaire Restitution (PK 269.600) par des méthodes statistiques ou hydrométriques*	
Valeur maximale jaugée = 11 051 m <sup>3</sup> /s à 11,10 m NGF (ortho)	
<b>Extrapolation à 11,30 m NGF (ortho) à partir du débit maximum jaugé</b>	11 600 m <sup>3</sup> /s
<b>Utilisation de la nouvelle courbe proposée après la crue de 2003</b>	12 000 m <sup>3</sup> /s
<b>Analyse statistique des jaugeages récents en distinguant deux domaines (avant et après débordements) (Echantillon n° 3)</b>	11 554 m <sup>3</sup> /s
<b>Analyse statistique de l'ensemble des jaugeages en distinguant deux domaines (avant et après débordements) (Echantillon n° 1)</b>	11 722 m <sup>3</sup> /s

\* hors effets de brèches

Il est à noter que l'écart entre le débit retenu de 12 000 m<sup>3</sup>/s et les plus petites estimations figurant dans le tableau ci-dessus est inférieur à 4 %. Cet écart est lui-même inférieur à l'incertitude globale retenue qui est égale à ± 10 % (incertitude prenant en compte l'ensemble des incertitudes évoquées au paragraphe 2.3.4).

## 5.7 Influence des brèches du Petit-Rhône

Deux brèches importantes sont apparues sur le Petit-Rhône pendant la crue de décembre 2003. L'une se situait en amont du pont autoroutier du PK 288.000. L'autre se situait vers le PK 309.000. Celle au PK 288.000 faisait près de 230 m de large (selon le rapport du CETMEF « Description de ruptures de digues consécutives aux crues de décembre 2003 »). Elle était donc quasiment aussi large que le lit du Petit-Rhône à cet endroit. Celle du PK 309.000 faisait près de 120 m de large.



**Figure 45 : Brèche (rebouchée) vers le PK 288.000, le 31 mars 2005**

Pour tenter d'estimer l'impact de ces brèches, il convient d'observer les évolutions des vitesses et débits à la station ultrasons que la CNR possède à Fourques (PK 281.000). Cette station a deux croix de mesures, chacune à un niveau différent. Chaque croix de mesure fournit une valeur de vitesse (nommées  $V_{x1}$  et  $V_{x2}$  sur la Figure 47). La combinaison de ces deux vitesses fournit une valeur moyenne utilisée pour déterminer le débit à la station (en noir sur la Figure 47).

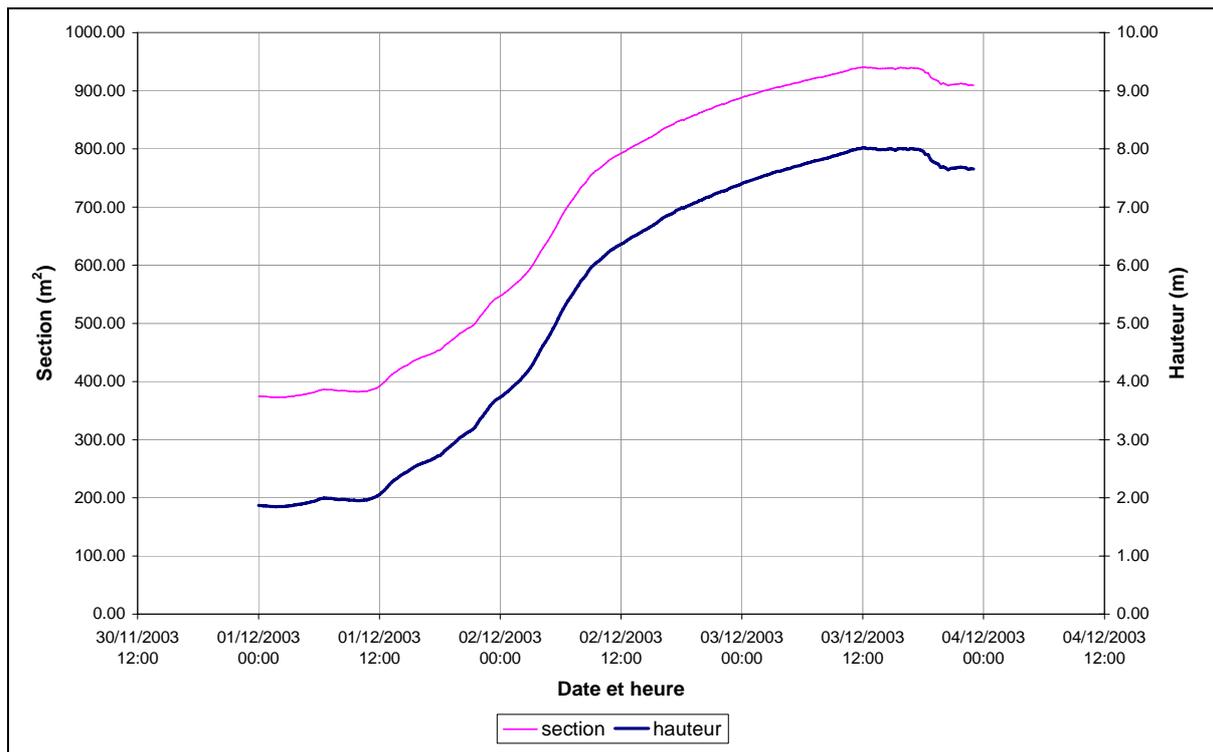


Figure 46 : Evolution de la section et de la cote à la station ultrasons de Fourques pendant la crue de décembre 2003

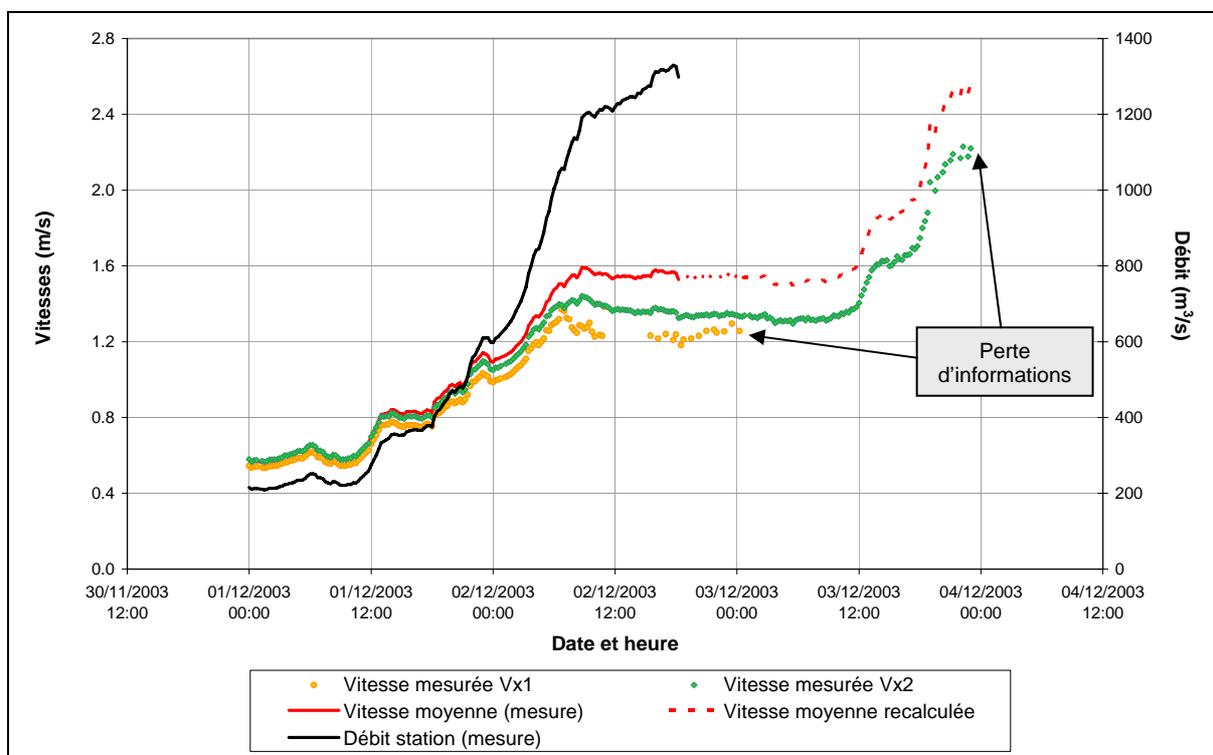


Figure 47 : Evolution du débit et des vitesses à la station ultrasons de Fourques pendant la crue de décembre 2003

La Figure 46 et la Figure 47 montrent :

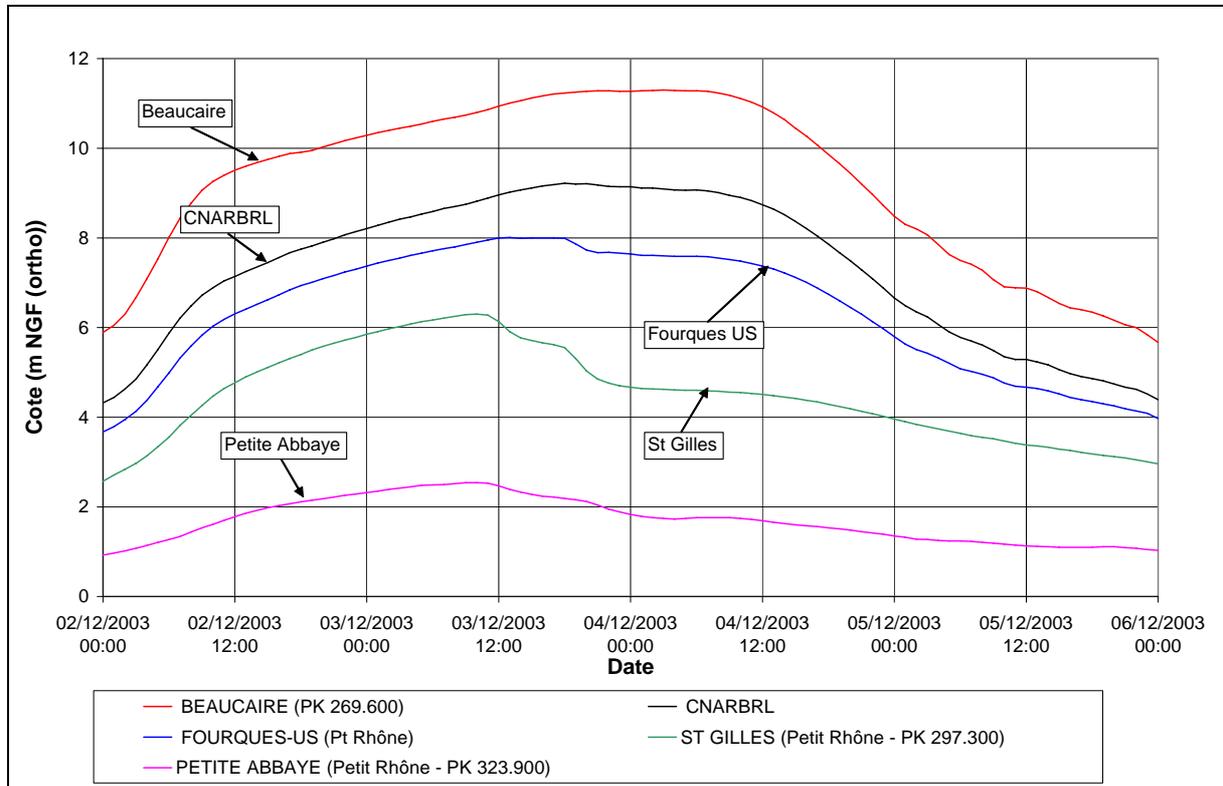
- Un arrêt du calcul de débit à la station ultrasons le 2 décembre vers 18h00 suite à un début d'incident ;
- Cependant, les mesures de vitesses se sont poursuivies jusqu'au 3 décembre vers 23h00, et ensuite la station a été endommagée définitivement ;
- Une accélération brutale des vitesses en deux temps le 3 décembre vers 12h00 passant de 1,3 m/s à 1,6 m/s, puis vers 17h00 passant de 1,6 à 2,2 m/s (au-delà, vers 23h, la station s'est arrêtée de fonctionner). Compte tenu des vitesses et section (940 m<sup>2</sup> au max de niveau observé pendant les paliers, 85 m de large), les deux paliers de débits (combinaison des vitesses et de la section) observés avant arrêt de la station peuvent être estimés à :
  - 1<sup>er</sup> palier passant 1 500 m<sup>3</sup>/s à 1 800 m<sup>3</sup>/s ;
  - 2<sup>nd</sup> palier passant de 1 800 m<sup>3</sup>/s à 2 400 m<sup>3</sup>/s ;

Les débits ont été arrondis à la centaine de m<sup>3</sup>/s près, et la section a été supposée stable pendant la crue (à environ 940 m<sup>2</sup>).

Ces deux paliers ont été observés sur 12 heures au droit de la station, alors que la cote chutait dans le même temps de près de 35 cm à la station de Fourques. Ces augmentations de vitesses seraient dues aux ruptures de digues présentées ci-avant.

- Le niveau s'est stabilisé à un niveau proche de 8 m NGF (ortho) le 3 décembre de 11h00 à 17h00, puis s'est abaissé rapidement à 7,65 m NGF (ortho) le 3 décembre 18h00. Le 4 décembre 9h00 il affichait encore 7,5 m NGF (ortho). Cette diminution de cote de 35 cm impacte très légèrement la section mouillée (diminution de la section mouillée inférieure à 50 m<sup>2</sup> sur un total de 940 m<sup>2</sup>).

L'analyse des enregistrements des stations limnimétriques situés en amont des brèches de Fourques montre clairement un impact de celles-ci sur les niveaux enregistrés (cf. Figure 48). L'effondrement des niveaux dans le petit Rhône dû aux brèches de digues conduit, avec un effet retard, à un abaissement des niveaux dans le Rhône en amont du défluent jusqu'à Beaucaire. Seule la modélisation mathématique permettra de mieux estimer cet impact.



**Figure 48 : Abaissement des niveaux enregistrés aux stations limnimétriques après l'apparition des brèches dans les digues du Petit-Rhône**

## 6 La démarche qualité

### 6.1 Principe et intérêt de la démarche

Depuis juillet 2000, la Direction de l'Ingénierie Technique CNR est certifiée ISO 9001 version 1994. Cette certification a concerné dans un premier temps les activités techniques avec pour objectif premier la satisfaction client.

Ensuite, la CNR a adopté dans son Plan Stratégique d'Entreprise 2002- 2006 la migration de la certification ISO 9001 version 1994 vers la certification ISO 9001 version 2000. Cette étape consiste à passer l'ensemble des activités de la CNR sous qualité.

Fin 2003, la CNR est certifiée ISO 9001 version 2000, avec la mise en place d'une politique qualité qui se décline suivant ses principaux axes comme suit :

- Constituer un véritable outil de management ;
- Répondre aux exigences de ses clients (internes et externes) ;
- Accroître la sécurité de ses installations ;
- Mettre en place une boucle d'amélioration permanente.

La CNR a donc formalisé son expérience au travers de différentes procédures qui respectent les exigences des normes internationales de la qualité.

En ce qui concerne la gestion du réseau d'observations hydrométriques les procédures en vigueur précisent qu'il y a lieu d'établir :

- La liste des matériels utilisés ;
- La précisions attendues sur les mesures ;
- L'étalonnage des matériels utilisés ;
- Les procédures permettant de s'assurer de la fiabilité des matériels utilisés ;
- Les fiches de vie traçant les étapes importantes de chaque appareil.

### 6.2 Réseau de mesure hydrométrique

En complément d'une note d'organisation pour l'activité hydrométrie et de son cahier des charges associé, trois procédures particulières impactent directement cette activité :

- Maîtrise des dispositifs de mesure et de surveillance (DMS) ;
- Gestion technique et maintenance centralisée du réseau hydrométrique ;
- Surveillance et entretien des lits du Rhône, de ses affluents et du chenal navigable.

L'hydrométrie repose sur la réalisation et l'exploitation de mesures. Ainsi tout appareil utilisé pour cette activité suit la procédure générale liée aux DMS.

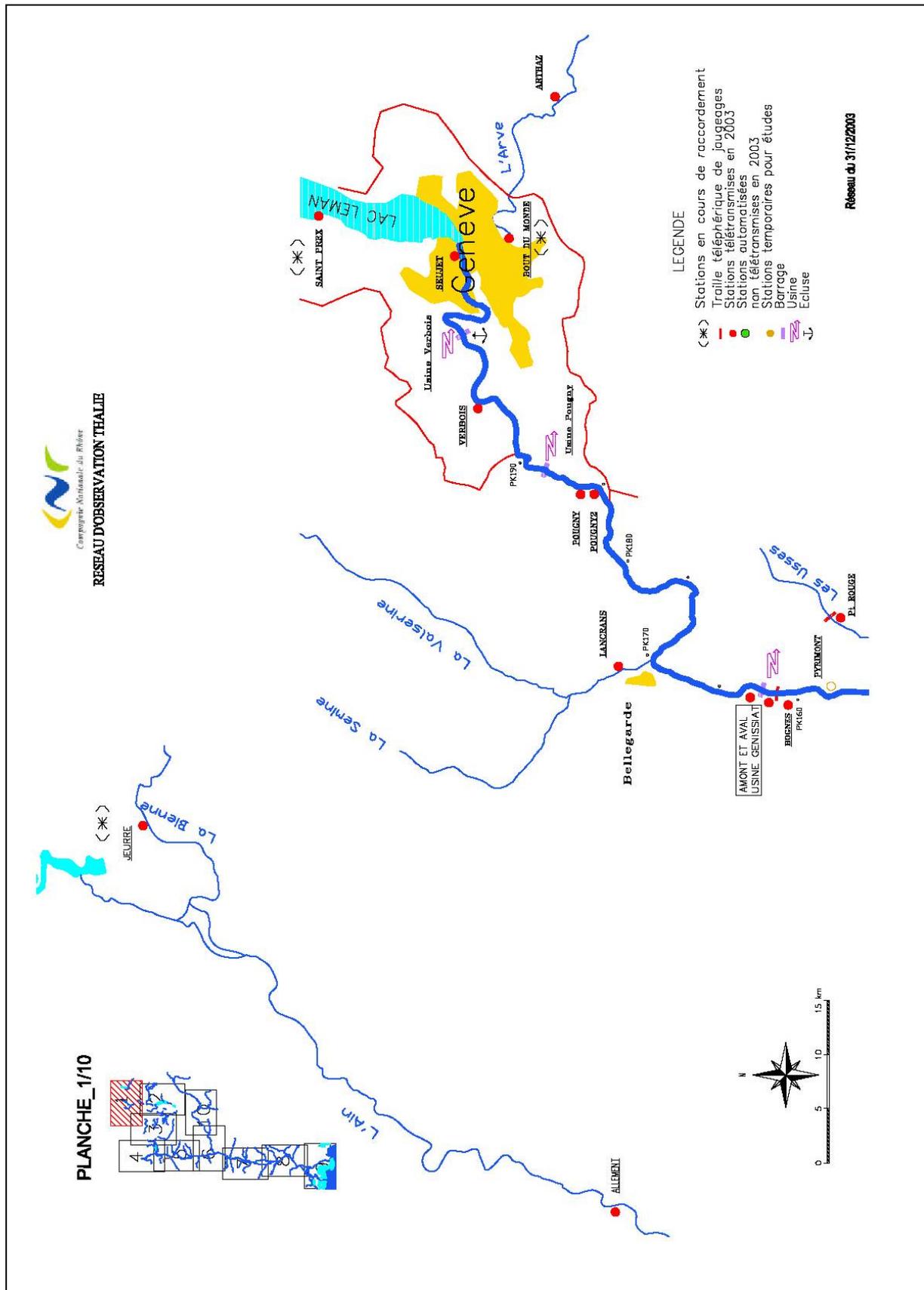
Enfin le rattachement des mesures de niveaux d'eau est fait par le biais des échelles limnimétriques implantées sur site. Elles sont vérifiées par les équipes topographiques avec des appareils étalonnés. Ces vérifications sont soit planifiées sur le moyen et long terme soit faites à la demande. La planification à long terme consiste à vérifier l'échelle pour s'assurer de sa validité bien qu'aucun dysfonctionnement n'ait été constaté. L'intervention à la demande fait suite à un contrôle d'échelle incohérent entre la lecture d'échelle et une autre information (ligne d'eau ou capteur en berge). Pour lever l'ambiguïté, le contrôle d'échelle s'impose.

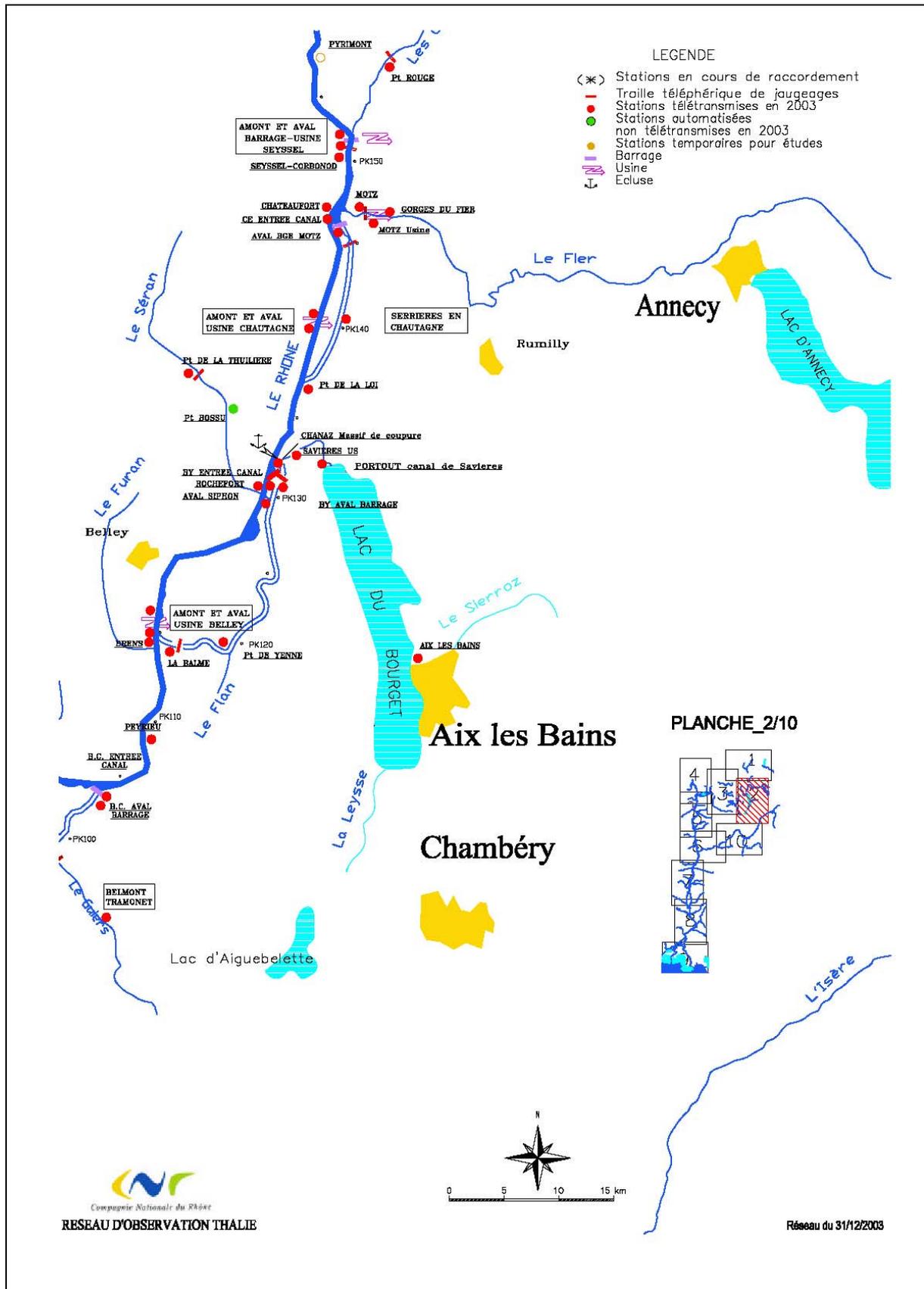
# Annexe A

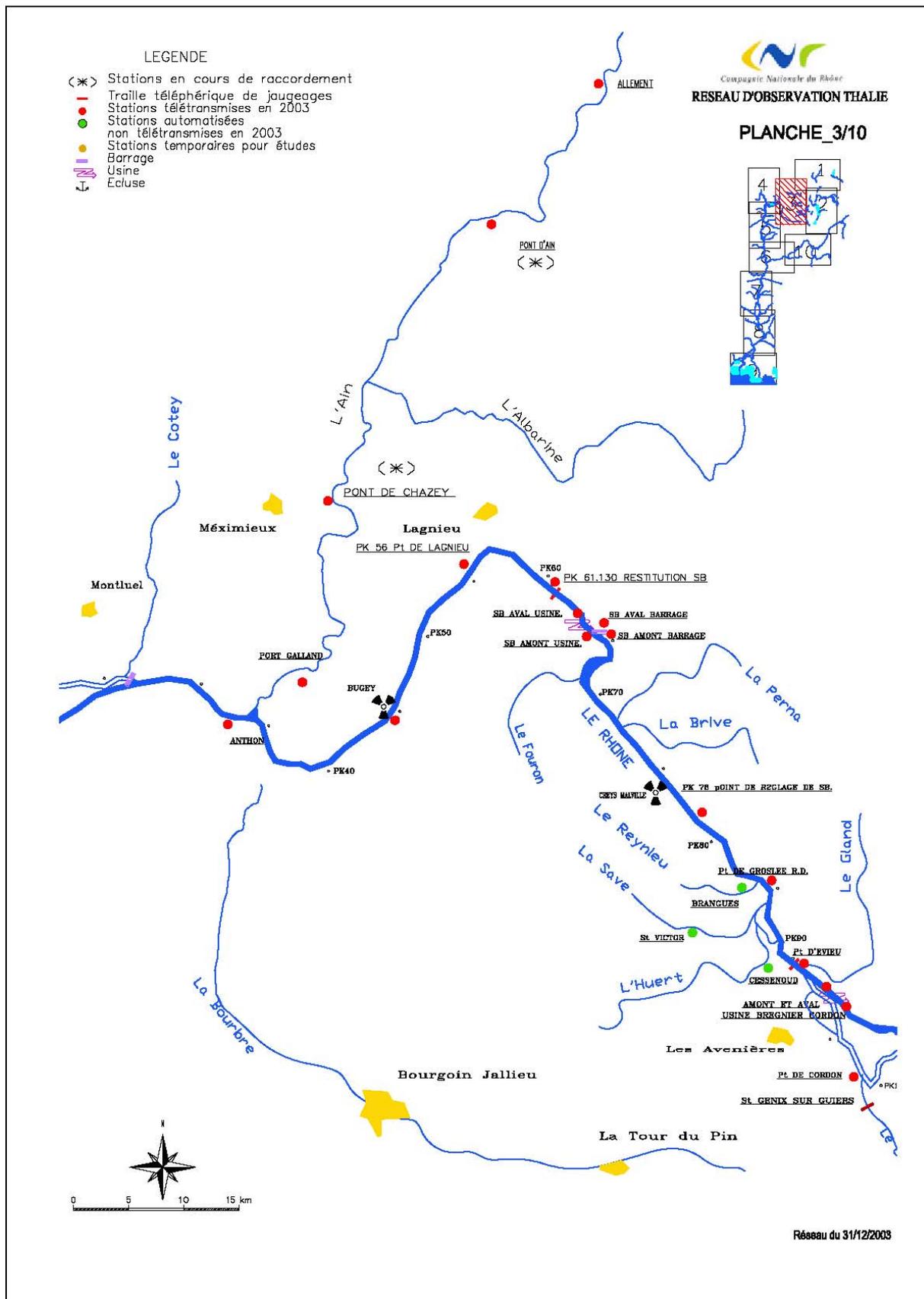
## Réseau d'observation THALIE

Le réseau d'observation Thalie est composé d'environ 150 stations hydrométriques pouvant mémoriser et télétransmettre les niveaux du Rhône et de ses affluents à chaque instant. Ces stations apparaissent en rouge sur les cartes des pages suivantes.

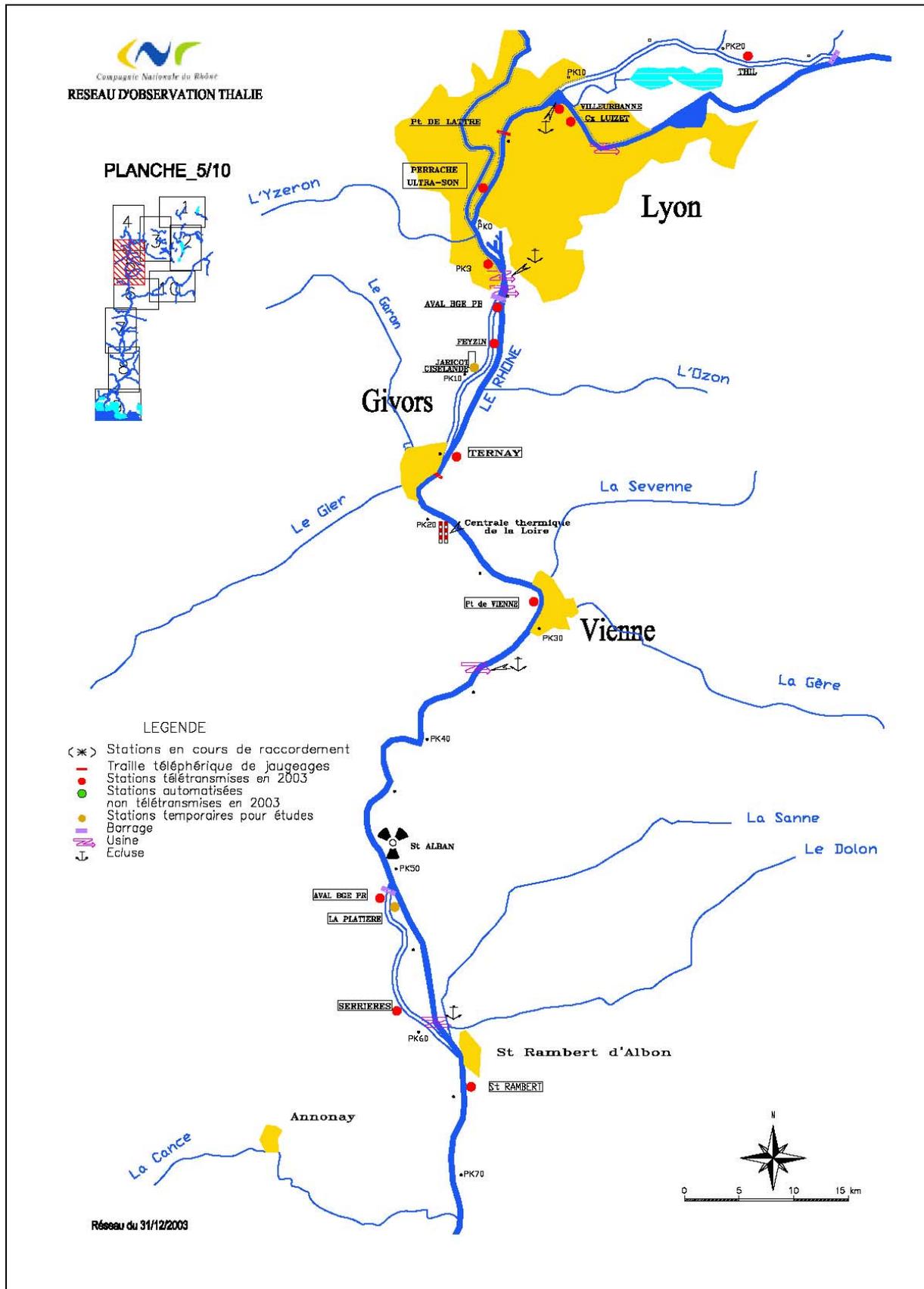


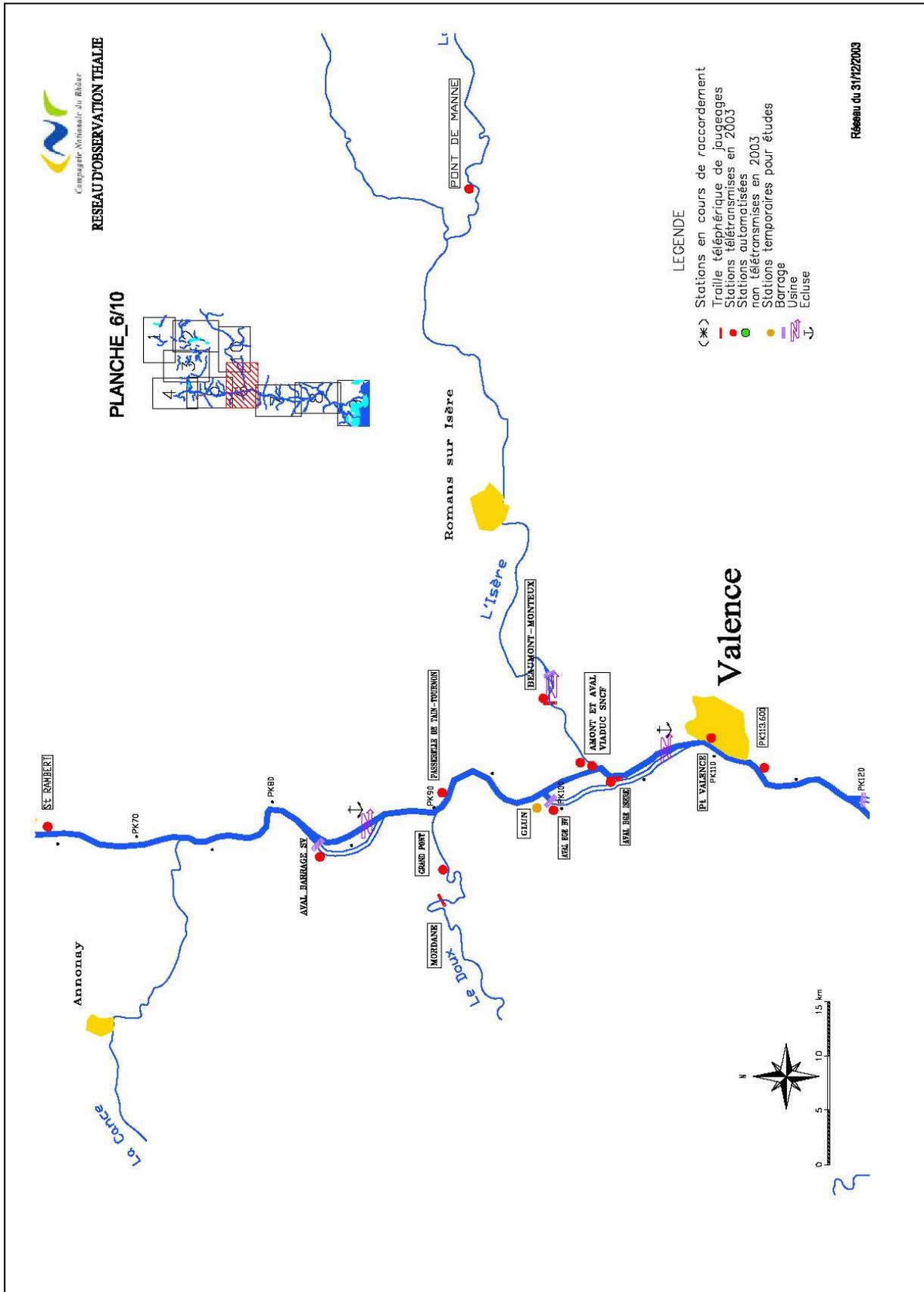


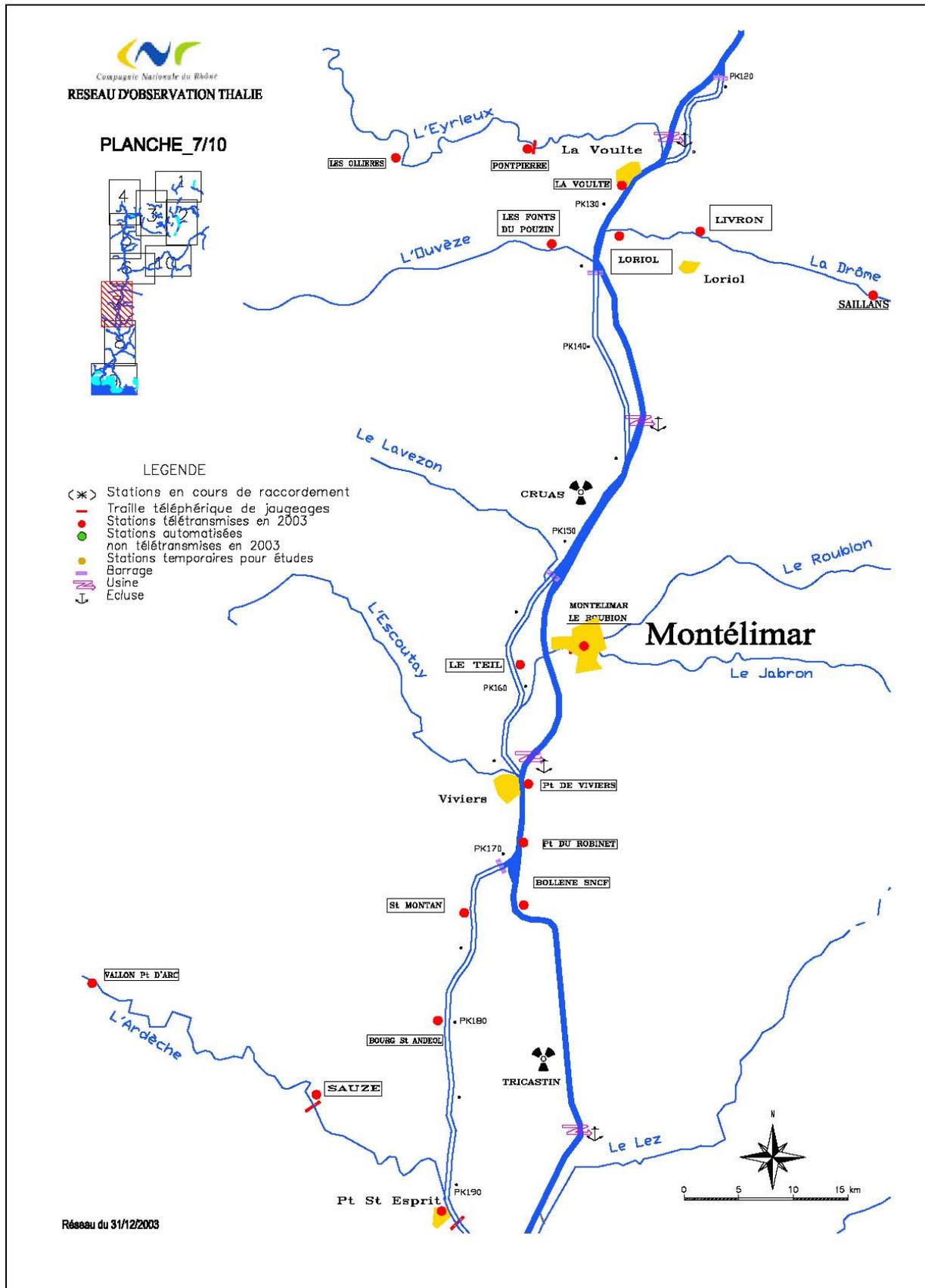


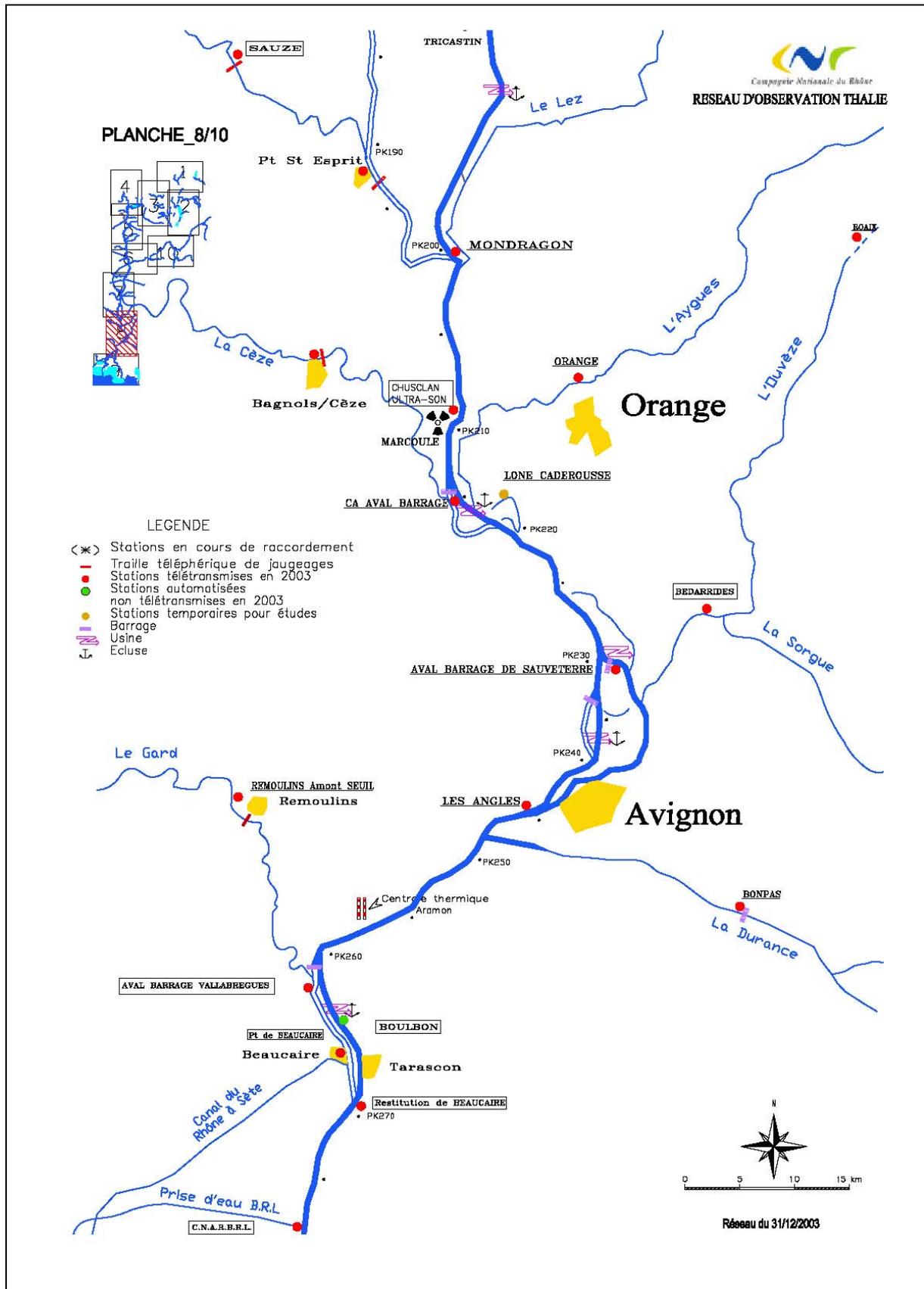




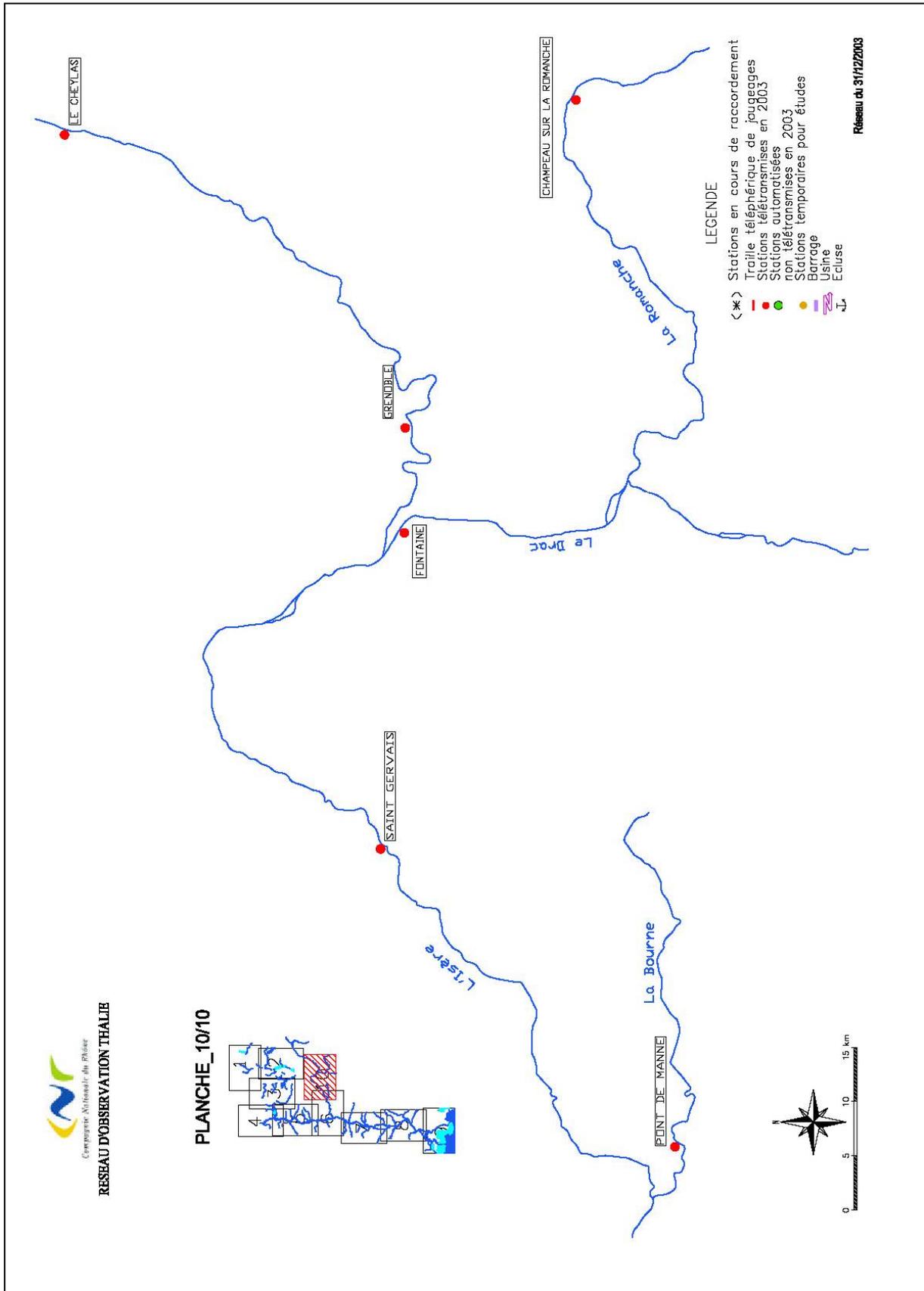












# Annexe B

## Historique des stations

Fiches classées d'aval vers l'amont :

- ANNEXE B1 : Beaucaire (objet de l'étude)
- ANNEXE B2 : Viviers (début du secteur à forte crue en décembre 2003)
- ANNEXE B3 : Valence
- ANNEXE B4 : Ternay

# LE RHONE à BEUCAIRE

## 1. La station de mesure

Jusqu'en 1970, les séries de débit étaient relevées au Pont de Beaucaire (PK 267.700). En 1970, suite à la mise en eau de l'aménagement de Vallabrègues, le PK 267.700 se retrouve dans le Vieux-Rhône et n'est plus représentatif du Rhône total. Les séries de débit se sont poursuivies à la restitution, au PK 269.600.

- **Station historique**

Echelle historique du pont de Beaucaire PK 267,700 de 1840 à 1960 – Relevés de trois cotes par jour (archivés depuis 1845 par le Service de la Navigation) plus observation des crues.

- **Station CNR**

Le 06/01/**1961** : mise en service du limnigraphe à flotteur au PK 267,700 (pont de Beaucaire).

Le 14/01/**1970** : mise en eau de Vallabrègues. Le PK 267,700 se retrouve dans le Vieux Rhône.

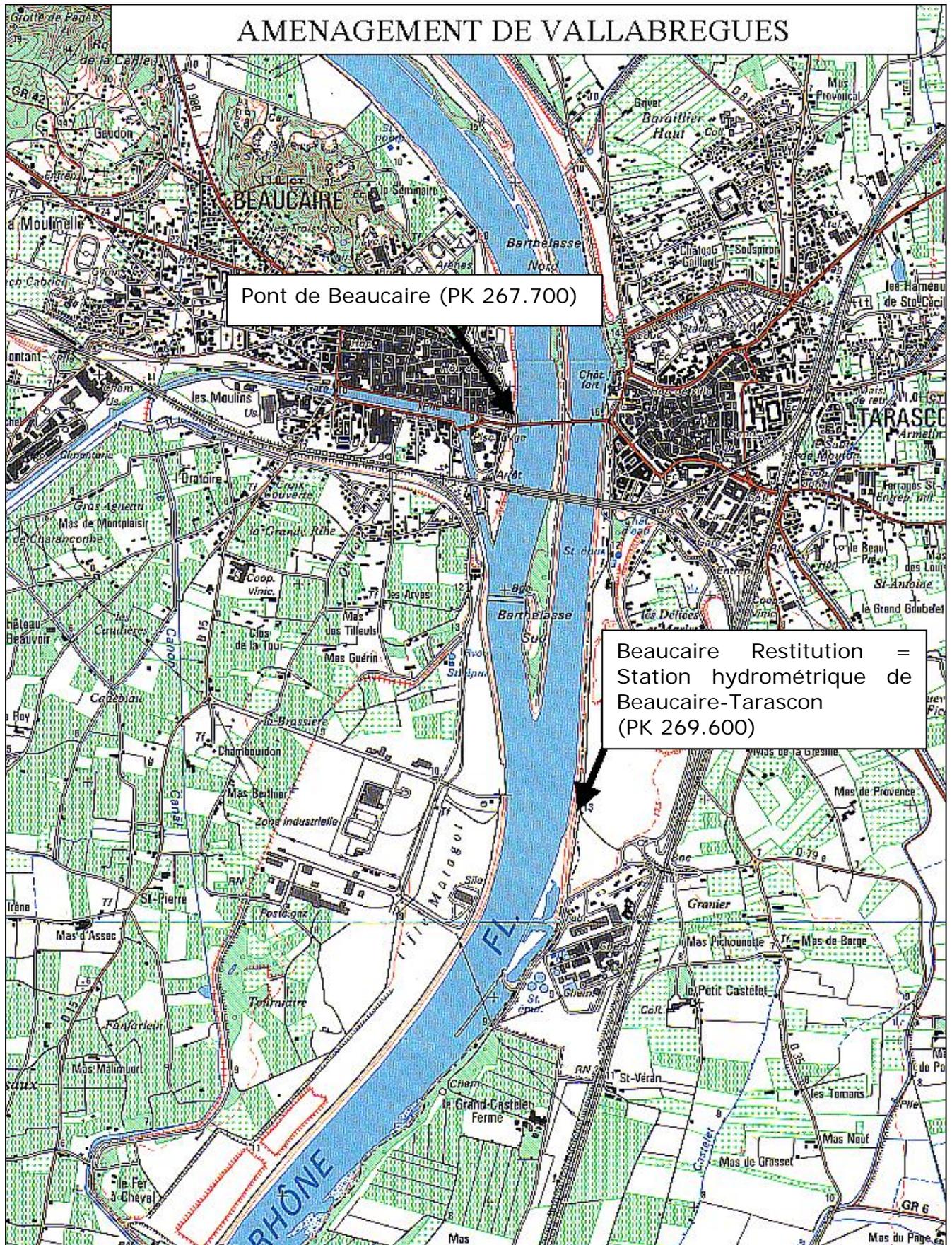
Le 02/11/**1970** : mise en service du télélignigraphe de la restitution, PK 269,600 rive gauche.

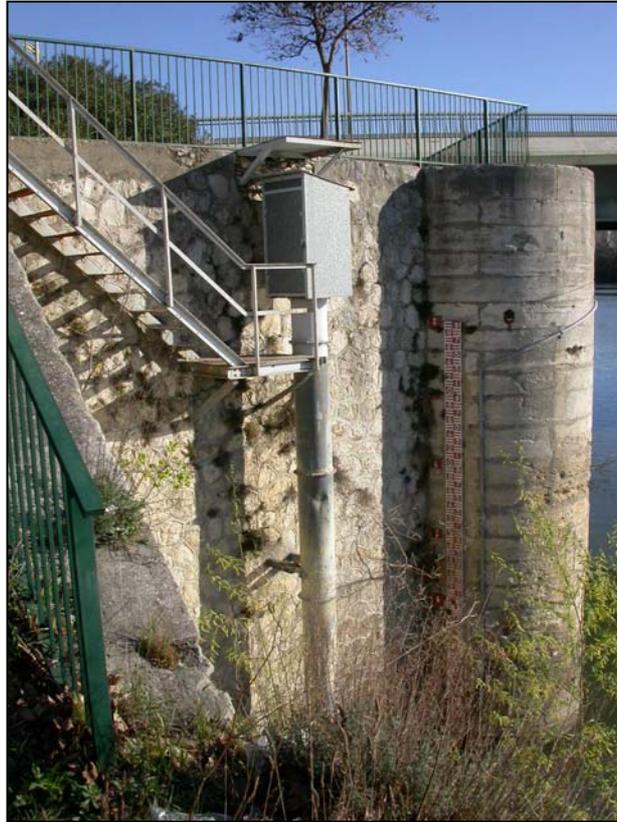
Dernier limnigraphe Rittmeyer papier le 21/10/1989.

Le 27/11/**1989** : automatisation par un LPN8.

Le 29/06/**1999** : remplacement des sondes de la station.

Sur le plan qui suit, on situe la station au PK 267,700 qui se trouve au pont de Beaucaire, ainsi que la station actuelle au PK 269.600 (indiquée par « Beaucaire » sur le plan).





**Station historique du Pont de Beaucaire (PK 267.700)**



**Station hydrométrique de Beaucaire-Tarascon (PK 269.600)**

## **2. Les jaugeages**

Par le Service de la Navigation :

- de nombreux jaugeages ont été exécutés, principalement par flotteurs superficiels, entre les années 1897 et 1937, et par moulinet suspendu de 1954 à 1960.

Par la CNR :

- depuis **1961**, par moulinet suspendu en barque à traילה, au PK 265,400. Traילה détruite actuellement.
- De **1970 à 1974** : jaugeages en barque par un moulinet suspendu après passage d'un câble 400 m à l'amont de l'usine de Beaucaire (jaugeages du canal).  
Quelques jaugeages dans le vieux Rhône de Vallabrègues.
- 10/07/**1974** : mise en service d'une nouvelle station de jaugeages en téléphérique PK 272,250 (aval restitution) où seront désormais exécutés les jaugeages au moulinet jusqu'en **1994**.
- Depuis, jaugeages ADCP à la restitution.

## **3. Le calcul des débits**

- **1920 à 1961** : moyenne arithmétique des trois débits correspondant aux trois côtes journalières relevées à l'échelle historique.
- De **1962 à 1969**, après la mise en service du limnigraphe à flotteur au PK 267,700 le 06/01/1961, calcul avec courbe Q(H) et niveaux au pont de Beaucaire.
- Depuis **1970**, calcul des débits avec la cote à la restitution.
- Courbe à la restitution influencée par le niveau de la Méditerranée suivant la force des vents sud ou nord pour les débits inférieurs à 1 000 m<sup>3</sup>/s.  
Modification de la courbe pendant les dragages du Palier d'Arles : **1974-1975**.
- Depuis l'automatisation par un LPN8 le 27/11/**1989**, les débits sont calculés par le logiciel Thalie.

Ci-joints :

- note DE MP/LF 8853 du 31 juillet 1962.

DE - MP/LF - 8853

LYON, 31 Juillet 1962

HYDROLOGIE du BAS-RHÔNEStation de BEAUCAIRENiveaux et débitsNOTICEA/ Hauteurs a) Relevés

Les relevés de l'échelle principale de Beaucaire (Km 267.70) archivés depuis 1845 par le Service de la Navigation du Rhône comprennent :

- les observations régulières effectués journallement à heures fixes 7h - 12h et 17h.
- les observations spéciales de crue exécutées en principe toutes les heures lorsque le fleuve dépasse la cote de mesurée à l'échelle.

Cette importante documentation permet de déterminer en particulier les cotes maximales et minimales annuelles qui sont consignées dans les tableaux 1 et 2 Nos 41.045 & 41.046 ci-joints.

b) Variations des extrêmes. Le report sur un graphique chronologique de ces cotes extrêmes annuelles montre que si pour les minima il n'existe pas de tendance très marquée ce qui prouve la grande stabilité du thalweg, pour les maxima au contraire la tendance est à une hausse continue au rythme d'environ 90 cm en 100 ans. Ce phénomène est la conséquence probable d'un encombrement de plus en plus important du lit majeur par les digues, les constructions ou la végétation.

Le graphique 41.049 (pièce 3) rend compte de ces variations

## B/ Débits a) Jaugeages

De nombreux jaugeages ont été exécutés, principalement par flotteurs superficiels, par le Service de la Navigation entre les années 1897 et 1937, et par moulinet suspendu de 1954 à 1960.

D'autre part la C.N.R. a commencé en 1961 une campagne de jaugeages en toutes profondeurs par moulinet suspendu qui a permis de définir une courbe hauteur débits très précise entre 500 m<sup>3</sup>/s et 5.000 m<sup>3</sup>/s (courbe: H/Q n° 29450-b, pièce 4)

L'extrapolation de cette courbe H/Q en l'absence actuelle de mesures directes a été réalisée de la manière suivante :

- pour les crues moyennes ( $Q \leq 7.000$  m<sup>3</sup>/s), les renseignements fournis par d'autres stations antérieurement étalonnées (Rhôn à St.Etienne des Sorts et Durance à Pont Mirabeau) permettent une définition assez précise de la relation Hauteurs-débits.

- pour les crues supérieures il a été procédé à une adaptatio mathématique avec extrapolation directe.

Les résultats obtenus sont résumés dans la courbe H/Q N° 41.088 pièce 5.

## b) Débits journaliers

Les renseignements déduits des jaugeages anciens ainsi que ceux tirés des variations des extrêmes permettent d'établir que les modifications de la relation H/Q par eaux basses et moyennes ont été négligeables pendant toute la période 1920-1961; la période antérieure 1890-1920 présente par contre des variations assez sensibles, en conséquence le calcul des débits moyens journaliers a été réalisé seulement pour les années postérieures à 1920 y compris. Pour ce calcul il a été admis que le débit moyen journalie était égal à la moyenne arithmétique des 3 débits correspondants aux trois cotes journalières relevées.

Les tableaux ci-joints pièce 6 donnent l'ensemble des débits ainsi déterminés.

c) Débits classés

A partir de ces résultats il a été tracé les courbes annuelles et mensuelles des débits classés pour la période 1920-1961 inclus soit 42 ans.

Courbes n° 29499-a et 41073 (pièces 7 et 8)

e) Détermination des débits de crue.

Le graphique chronologique des cotes maximales a mis en évidence l'exhaussement continu des crues qui est la conséquence de l'encombrement de plus en plus marqué du lit majeur, c'est ainsi que des crues de cote identiques à l'échelle de Beaucaire peuvent en réalité avoir roulé des débits forts différents si leurs dates sont séparées par un nombre important d'années. Pour tenir compte de ce phénomène et pour pouvoir rendre les débits homogènes il a été intégralement tenu compte de la variation moyenne des niveaux définie par la Droite de régression de la série chronologique.

Les niveaux des crues ont donc été augmentés de la dénivellation existant pour l'année considérée entre l'ordonnée de la droite de régression et l'ordonnée correspondante de l'année de référence soit 1960. Le tableau n° 41097 pièce 9 donne les débits maxima annuels ainsi ~~restitués~~ obtenus.

# VIVIERS - LE TEIL - JOVIAC (quartier du Teil)

## 1. Les stations de mesure depuis 1910

La chronique de débits de la station de Viviers (PK 166,5 RG) comprend celles des stations historiques de Le Teil et de Joviac.

### Période 1910-1932 :

L'échelle principale du Service Navigation (km 158 rive droite) est la seule observée. Les débits journaliers du Rhône à la station du Teil sont obtenus par transformation de la lecture d'échelle de midi au moyen d'une courbe H (Q) établie par le Service Navigation à l'aide de jaugeages aux flotteurs auxquels était appliqué le coefficient  $u/v = 0,90$ .

### Période 1933-1942 :

A dater de 1933, la référence à l'échelle 158 rive droite est abandonnée, les lectures sont faites à l'échelle (158,400 rive gauche) dite de Joviac. Ainsi de 1933 à 1942, le relevé de la cote de midi a été admis comme donnant la cote moyenne journalière.

### Période 1943-1957 :

Début 1943 est installé un limnigraphe au droit de l'échelle précédente PK 158,400 rive gauche. Les diagrammes d'enregistrement permettent de déterminer le niveau réel du fleuve au cours des 24 h.

Le débit journalier est obtenu avec les diagrammes d'enregistrement (aux archives CNR du 01/01/1943 au 01/01/1993) et la relation H(Q). (Fin extrait note 408).

Le 07/05/1951, installation du limnigraphe du Pouzin au PK 132,800 installé sur l'échelle Gabert, zéro = (84,30) NGF. Nous avons sur papier une série de niveaux et de débits maximum annuels à la station du Pouzin de **1896 à 1954**.

Depuis la mise en eau de l'aménagement de Montélimar le 11 juin **1957**, le limnigraphe du Teil se trouve sur le Vieux Rhône.

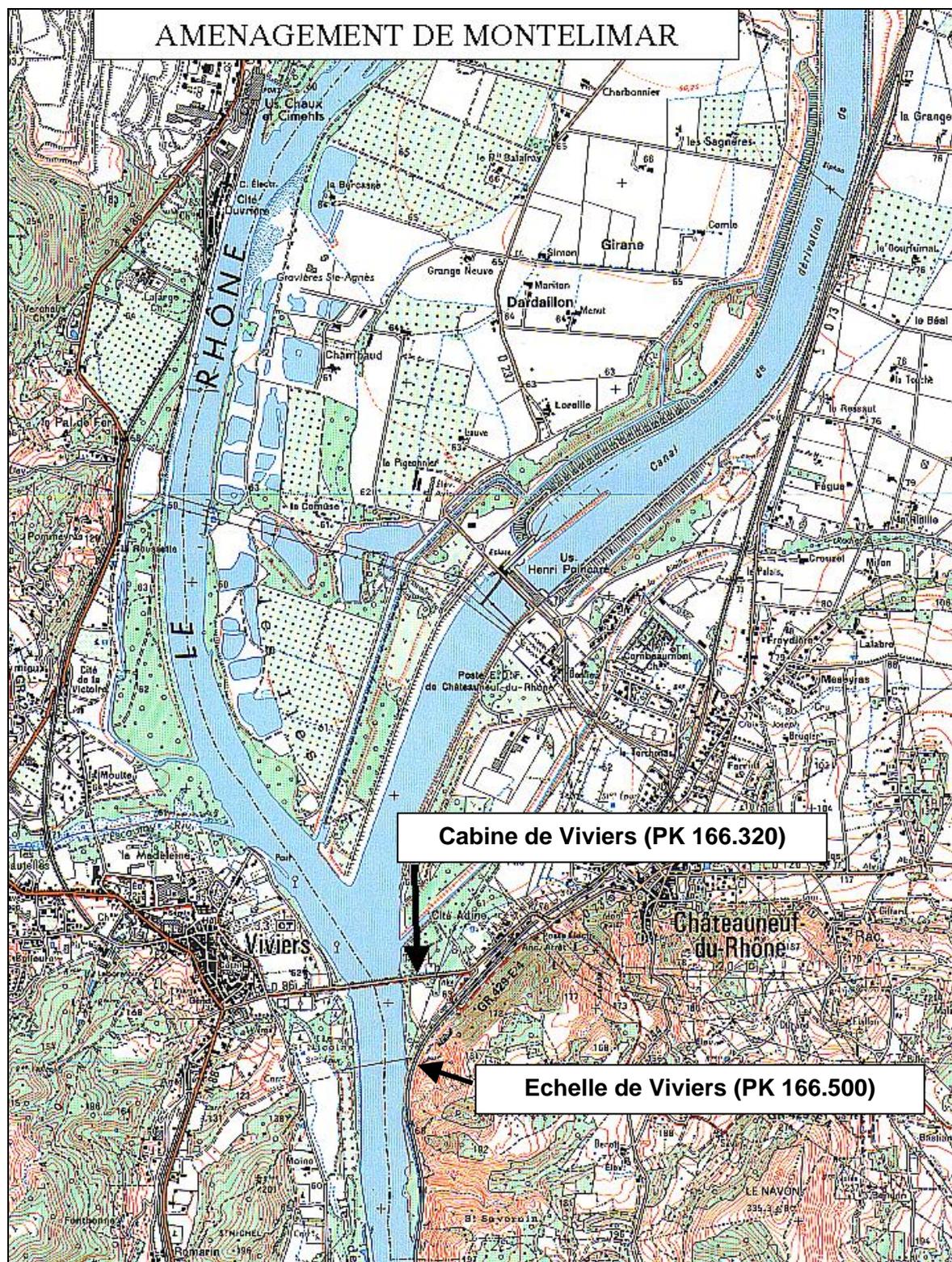
En **1957**, installation du limnigraphe aval usine de Chateauneuf.

le 23/11/1977, installation du limnigraphe Rittmeyer de Viviers PK 166,500 zéro échelle rive gauche (58,08) NGF.

Le 16/01/1993 remplacement du limnigraphe à flotteur de la station du Teil par un LPN8 télétransmis sur Thalie. Le choix de l'automatisation (LPN8) du point aval (il s'agit d'une courbe double) se porte sur le point de réglage du pont double SNCF, au PK 174,500 du canal d'aménée de Donzère-Mondragon (appelé sur Thalie : Bollène SNCF), point utilisé pour régler la retenue jusqu'à un débit de 1 750 m<sup>3</sup>/s. Ce choix permet d'avoir une pente plus importante qu'entre

Viviers et le PK 170,300 d'où une plus faible influence du point aval sur les débits.

Le plan ci-dessous permet de situer l'actuelle station de Viviers :



Le 01/12/1995, l'échelle historique du Teil PK 158,400 rive gauche, zéro échelle = (62,93) NGF, qui ne trempait plus pour le débit réservé, est reprise et abaissée de 3 m – Zéro = (60,04) NGF.

Le 26/05/1996 suite à des dragages au droit de l'échelle, les repères des mètres sont de nouveau descendus de 1 m – Nouveau zéro actuel (59,04) NGF.

Sur le plan de la page précédente, on situe l'actuelle station de Viviers. Ci-dessous des photos de la station :



**Echelle limnimétrique de la station de Viviers (PK 166.500)**



**Cabine de la station de Viviers (PK 166.320)**

## 2. Les relations hauteurs débits 1941-1957

- Les jaugeages de la CNR ont débuté en 1941 et ont conduit à la détermination de différentes courbes H (Q) qui ont servi au calcul des débits journaliers.
- Période **1933-1949** (sauf 1944) : les jaugeages effectués entre 1941 et 1948 pour des débits ne dépassant pas 3 500 m<sup>3</sup>/s donnent une courbe H (Q) utilisée entre 1933 et 1949 à l'exclusion de 1944.
- En 1950 lorsque la CNR a envisagé de reprendre ses mesures de débit du fleuve, il ne lui a pas été possible, par suite du mauvais calibrage du lit, d'implanter une station de jaugeage au droit de l'échelle de référence du km 158,400 rive gauche, dite de Joviac, utilisée depuis 1933.

De ce fait la station de jaugeage a été reportée à Lafarge, 5 km en aval (km 163,400), dans un secteur du Rhône rectiligne et bien calibré.

A cet emplacement, le profil de la station s'est maintenu stable depuis sa mise en service, ainsi que les profils amont et aval : le fond du lit du Rhône est d'ailleurs en grande partie rocheux dans cette région.

Des précautions spéciales sont prises à chaque jaugeage du fait de l'éloignement entre la station et l'échelle de référence, c'est ainsi que les cotes de Joviac sont relevées avant le début et après la fin de chaque opération en vue d'établir une correspondance précise avec Lafarge. En outre, par suite du mauvais fonctionnement d'un moulinet, les résultats des jaugeages effectués entre 1950 et 1952 ont été éliminés.

Enfin la station de jaugeage paraît, tout au moins en basses eaux, se trouver en queue du remous du barrage de Donzère, l'élimination des jaugeages de 1950-1952 ne permet pas de faire des comparaisons utiles avec la situation avant mise en eau, cependant l'examen des résultats des mesures montrera par la suite que cette influence est faible et limitée.

- Période **1950 à 1953** et **1944** : les nouveaux jaugeages repris en 1950 avec un matériel insuffisant mènent à une courbe H (Q) dont les débits de crue sont sous-estimés.
- Année **1954** : les opérations de jaugeages reprennent avec un matériel et une installation appropriés, la nouvelle courbe H (Q) est bien définie.
- Années **1955-1956-1957** : la succession des trois grandes crues de décembre 1954, janvier et février 1955 perturbe la ligne d'eau au Teil. Les jaugeages exécutés dans les meilleures conditions donnent une

nouvelle courbe H (Q) qui est légèrement décalée dans sa partie basse et moyenne par rapport à la précédente.

- De **1958 à mai 1960** : Calcul des débits avec les niveaux au limnigraphe du Pouzin. Courbe Q(H) du Pouzin. Jaugeages réalisés sur l'échelle de la station du Gabert en 1957 et 1959. Toutes profondeurs et surfaces par moulinet suspendu en barque à moteur. Nous avons sur papier une série de niveaux et de débits maximums annuels à la station du Pouzin de 1896 à 1954.
- En mai **1957**, arrêt du suivi de la courbe au Teil (quelques jaugeages par la suite lors d'essais de lâchers du barrage de Rochemaure).

D'après note manuscrite (pas de référence) :

Courbes utilisées pour déterminer les débits journaliers à Joviac :

- De 1950 à 1954 : courbe 16 027<sup>e</sup>
- De 1955 à 1957 : courbe 16 027f
- A partir du 12 juin 1957 : courbe 29 049b (Le Pouzin).
- De 1958 à mai 1960 : courbe 29 049d (Le Pouzin).
- De **1961 à 1974** :  
Les débits du Teil sont ceux donnés par l'usine de Chateauneuf du Rhône (débits dérivés à l'usine plus débits déversés au barrage de Rochemaure). (Indications sur rapport hydrologique).  
Jaugeages à Viviers avec la vedette en se tenant sur le profil au moyen du moteur. Depuis 1969.  
  
Les débits moyens journaliers au Teil (pour Viviers) peuvent être déterminés de la façon suivante :
  - Pour les périodes sans déversement au barrage, nous utilisons la relation  $Q_{\text{moyen}}$  journalier en fonction de la production journalière de l'usine de Chateauneuf.
  - Pour les périodes avec déversement, nous utilisons la relation Q (H) aval usine de Chateauneuf.
 Note manuscrite à M. Pommier de mars 1971. (Extrait concernant le Teil).
- **En 1975-1976** :  
Calcul des débits avec le limnigraphe aval usine de Chateauneuf. (Limnigrammes aux archives du 29/11/1957 au 01/01/1993).  
La courbe aval Chateauneuf (n° 29 464) est obtenue par relation d'échelle avec Viviers et contrôlé par jaugeages.  
Les 1<sup>ères</sup> courbes ne tenant pas compte des fluctuations de la retenue de Donzère, il semblerait que les bas débits soient donnés par l'usine.
- **De 1977 à 1992** :  
Calcul des débits avec les niveaux pris au limnigraphe de Viviers PK 166,500 et courbe Q (H) double à Viviers (n° 58 422) tenant compte

des fluctuations de la retenue de Donzère Mondragon à l'amont barrage au PK 170,300 rive droite.

(Limnigrammes aux archives CNR du 14/05/1954 au 02/01/1981 appelé 170,200 du Bas-Rhône). (Limnigrammes aux archives CNR jusqu'au 01/01/1993).

- Après **1981** : la cote de la retenue est prise sur la feuille du limnigraphe Rittmeyer à l'usine de Donzère. Il est souvent rappelé sur les différentes courbes que la présence de la retenue de Donzère rend très difficile l'évaluation précise des faibles débits. Ces courbes sont suivies par jaugeages, avec la vedette de TC, sur profil 166,700 aval pont de Viviers.
  
- **En 1993** : le calcul des débits se fait automatiquement sur le logiciel Thalie avec les niveaux à Viviers – télétransmis par LPN8 depuis le 19/01/1990 - et ceux de Bollène SNCF – télétransmis par LPN8 depuis le 23/12/1992. La courbe Q (H) utilisée est construite avec les niveaux à Bollène SNCF.

Il reste quand même une imprécision pour le calcul des débits quand le contrôle de la retenue est transféré à l'amont barrage pour les débits supérieurs à 1750 m<sup>3</sup>/s. Les niveaux restent alors constants à l'amont barrage jusqu'à 7 750 m<sup>3</sup>/s alors que ceux de Bollène SNCF fluctuent à cause de la perte de charge, fluctuations qui ne sont pas prises en compte au-delà de 2 000 m<sup>3</sup>/s sur la nouvelle courbe. A suivre.

- Depuis **1995**, jaugeages ADCP à l'amont du port du Teil ou à la restitution sur l'échelle du port de Viviers dans le Vieux Rhône, PK 165,500.

# VALENCE (CORNAS – BOURG-LES-VALENCE)

## ***1. La station de mesure***

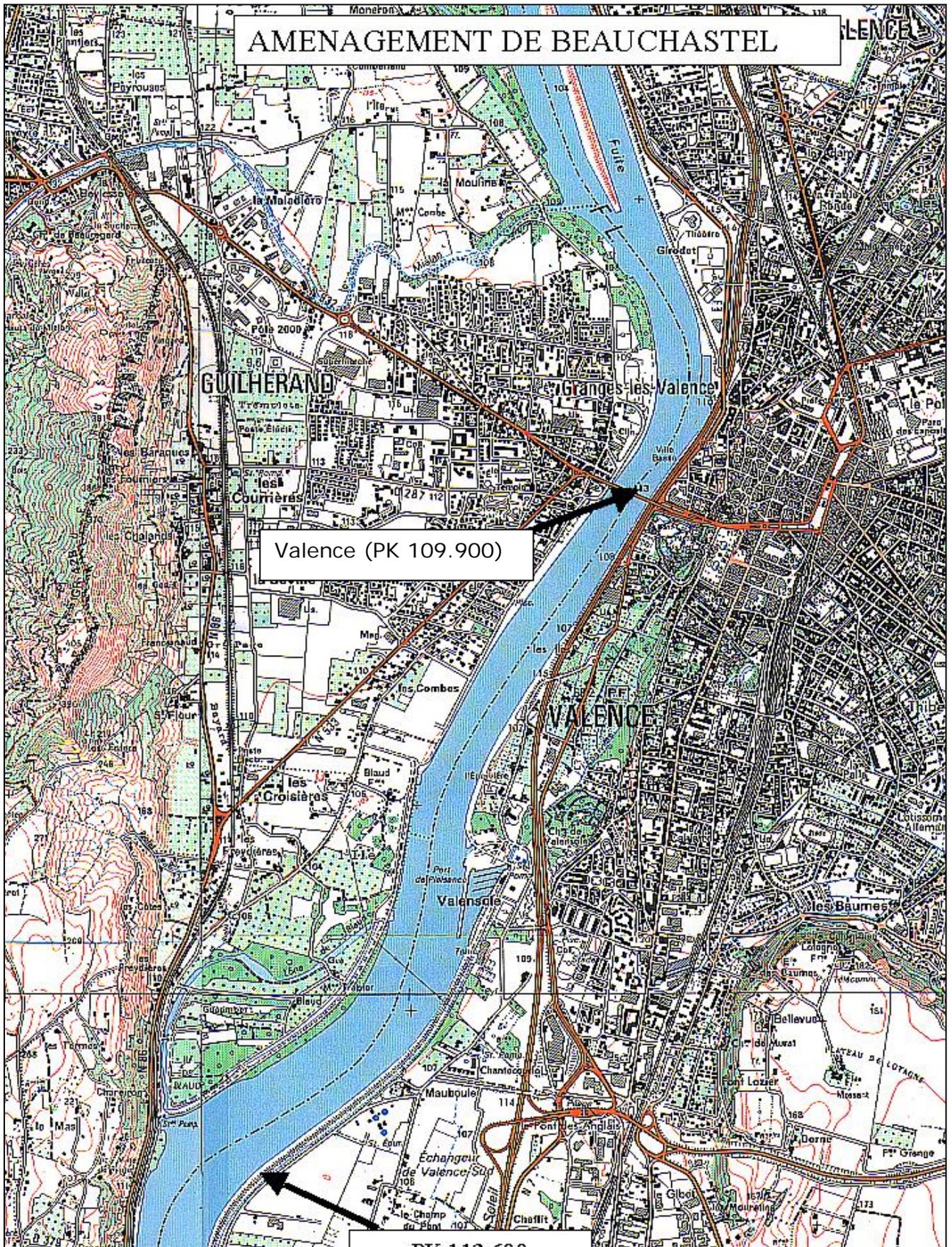
La station de Valence n'a quasiment pas évolué géographiquement.

Le 03/07/1957 un limnigraphe à flotteur a été installé à l'échelle du Pont de Valence (zéro : 102,00 NGF) en rive droite au PK 109,700.

Par la suite la cabine a été transformée pour recevoir les appareils nécessaires à l'exploitation du Rhône avec automatisation et télétransmission des données par LPN8 à partir du 20/09/1990.

La CNR dispose dans ses archives des limnigrammes à la station de Valence pour les périodes du 03/07/1957 au 01/02/1971 et du 06/01/1984 au 27/12/1996. Pour la période comprise entre le 01/02/1971 et le 06/01/1984 l'enregistrement papier a été arrêté.

Depuis la mise en eau de l'aménagement de Beauchastel le 20/08/1963, la station de Valence se trouve sous l'influence de la retenue de Beauchastel.





**Cabine et échelle de Valence (PK 109.900)**

## 2. Les jaugeages

De 1893 à 1940 des jaugeages au flotteur ont été réalisés au PK 110,00 par le service spécial du Rhône des Ponts & Chaussées.

Des jaugeages au moulinet ont été réalisés par les Ponts & Chaussées de 1927 à 1931 au PK 106,700. Jusqu'à la mise en eau de l'aménagement de Montélimar des jaugeages au moulinet étaient effectués à la fois par CNR et les Ponts & Chaussées.

Depuis 1995, CNR effectue des jaugeages ADCP au droit de la station de Valence.

## 3. Le calcul des débits

### . De 1920 à 1957 :

D'après un document référencé DE-XB/LF (date approximative 1958), les débits de Valence ont été calculés certainement à partir de trois cotes relevées par jour et la courbe Q(H) du service des Ponts & Chaussées. Ils ont été critiqués d'une part par corrélation avec les débits du Rhône à Serrières (série disponible 1901-1958) et de l'Isère à Beaumont-Monteux (série 1918-1948 publiée par la société hydroélectrique française) et d'autre part, par corrélation avec les débits à la station de Joviac (Le Teil) (série disponible 1910-1957). La conclusion de cette critique n'a pas rendu utile la modification de certains débits.

Voir aussi la note du 05/02/1965 de A.MAUCHAMP adressée à M.GEMAEHLING concernant le calcul des débits de Valence et du Teil (cf. note associée aux renseignements de la station de Viviers)

**Une note manuscrite de M. Pommier datée de mars 1971 précise les méthodes de calcul des débits moyens journaliers à Valence. (Extrait) :**

*Pour Valence :*

- *Nous utilisons la relation existante débit moyen journalier en fonction de la production journalière de l'usine de Beauchastel, pour les périodes sans déversement au barrage.*
- *Pour les périodes avec déversement, nous utilisons la relation Q (H) aval usine de Bourg-lès-Valence.*

**D'après la note manuscrite de P/L, les courbes Q(H) utilisées pour déterminer les débits journaliers à Valence sont :**

- De 1950 à 1954 : n° 16 464 à Bourg-lès-Valence
- De 1955 à 1957 : n° 16 464 à Bourg-lès-Valence
- De 1958 à 1959 : n° 29 050d à Valence
- 1960 ---- : n° 29 050<sup>e</sup>.

**Les enregistrements du limnigraphe de Bourg-lès-Valence PK 107,26, zéro échelle (102,05) du 09/02/1950 au 28/06/1968 sont consultables dans les archives CNR.**

**D'après cette note, de 1950 à 1957, les débits ont été calculés avec les niveaux relevés sur le limnigramme de Bourg-lès-Valence avec la courbe Q(H) à Bourg-lès-Valence.**

**. De 1958 à 1962 :**

Le calcul des débits est réalisé à partir des cotes du limnigramme de Valence et la courbe Q(H) simple étalonnée par jaugeages à la station de jaugeages à Etoile PK 121,400 (jaugeages par moulinet suspendu en barque à traîlle depuis 1954). La mise en eau de la retenue de l'aménagement de Beauchastel qui a eu lieu le 20/08/1963 a rendu pratiquement inutilisable cette station de jaugeages.

**. De 1963 à 1967 :**

**Les débits sont calculés avec les cotes du limnigramme de Cornas PK 104,300 et la courbe Q(H) tenant compte de la fluctuation des niveaux de la retenue de Beauchastel au PK 113,600.**

Le limnigraphe de Cornas a été installé en juillet 1962 en rive droite. A ce limnigraphe a été associée une station de jaugeages en téléphérique en juin 1964 au PK 104,400.

Limnigrammes de Cornas aux archives du 18/07/1962 au 29/03/1996.

Depuis la mise en eau de Bourg-lès-Valence en janvier 1968, la station de jaugeages de Cornas se trouve dans le Rhône court-circuité (Vieux-Rhône).

**. De 1968 à 1970 :**

Les débits du Rhône sont calculés en faisant la somme des débits de Saint-Vallier sur le Rhône et de Beaumont-Montoux sur l'Isère.

**. De 1971 à 1974 :**

Calcul des débits en utilisant les cotes du limnigraphe aval barrage de Beauchastel (Charmes) PK 120,200 et la courbe Q(H) aval barrage construite par jaugeages pour le débit du Rhône court-circuité auquel était rajouté le débit de l'usine de Beauchastel.

Ce limnigraphe a été installé le 26/06/1964.

Les limnigrammes sont consultables aux archives CNR pour la période du 26/06/1964 au 27/12/1968 sous le nom de PK 120,200 du Bas-Rhône.

Ce limnigraphe fonctionnait encore en 1974 (sans trace aux archives CNR).

**. De 1975 à 1984 :**

Calcul des débits en utilisant les cotes du limnigraphe aval usine de Bourg-lès-Valence PK 7,650 du canal mis en service en 1968 et courbe Q(H) double à l'aval usine tenant compte de la fluctuation des niveaux de la retenue de Beauchastel au PK 113,600.

Jaugeages CNR avec moulinet suspendu, en vedette par l'agence CNR de Montélimar durant cette période.

Limnigrammes aux archives du 28/12/1979 au 22/09/1989 sous le nom de Bourg-lès-Valence aval usine.

• **De 1985 à 1990 :**

Calcul des débits en utilisant les cotes du limnigraphe du pont de Valence et la courbe Q(H) double au pont de Valence tenant compte de la fluctuation des niveaux de la retenue de Beauchastel au PK 113,600.

• **Depuis 1991 :**

**Après automatisation de la station du pont de Valence et sa télétransmission, calcul des débits automatique par le logiciel Thalie avec les mêmes paramètres que pour le calcul des débits 1985-1990.**

La courbe Q(H) a été contrôlée par jaugeages au moulinet suspendu en vedette par agence CNR de Montélimar jusqu'en 1992 puis en barque par le service DX-HY de la CNR de 1992 à 1995. Jaugeages poursuivis depuis par DX-HY en utilisant l'ADCP.

- 6 700 m<sup>3</sup>/s jaugés le 08/10/1993 en début d'après-midi par moulinet en surface.

Coefficient U/V utilisé = 0,90.

- 4 450 m<sup>3</sup>/s le 27/02/1995 à 16h15 par ADCP.

- 4 620 m<sup>3</sup>/s le 23/02/1999 à 13h30 PAR ADCP.

Note sans référence (relative aux débits de Valence) :

## HYDROLOGIE DU RHONE

*Débits du tiers central (annexe 1\*) – (Pièce 1\*)  
Etude des débits à la station de Joviac (Le Teil) et à la station de Valence*

### **Station de Valence (km 109,700). (Extrait)**

*Dans le même esprit nous avons entrepris pour la station de Valence l'établissement des relations H/Q et le calcul des débits moyens journaliers correspondants.*

*Le service spécial du Rhône a effectué par le passé dans ce secteur du Rhône de nombreux jaugeages soit au flotteur à une station implantée aux environs du km 110, soit au moulinet au km 106,700.*

*Ces opérations comportent :*

- 27 jaugeages aux flotteurs pour la période 1893-1899,
- 7 « « « 1920-1922,
- 12 « au moulinet « 1927-1931.

*A partir de 1954 les opérations exécutées par CNR à la nouvelle station d'Etoile (km 121,400) peuvent être assez facilement rattachées à la station de Valence. Ces opérations comportant des mesures nombreuses tant en surface qu'à toutes profondeurs.*

*Les jaugeages au flotteur ont été exploités en utilisant un U/V égal à 0,85 valeur confirmée par les opérations récentes d'Etoile pour des débits faibles ou moyens.*

*Ces courbes H/Q de la pièce 5\* ont servi de base de calcul des débits moyens journaliers pour la période 1920-1950.*

*Nous avons utilisé ensuite les courbes H/Q déterminées au limnigraphe de Bourg-lès-Valence à partir des jaugeages CNR.*

*La courbe applicable au couple 1955-1956 tient compte des modifications sensibles enregistrées dans ce secteur du Rhône à la suite des hautes eaux de l'hiver 1954-1955 (voir pièce 6\*).*

*A partir de 1957 et après la mise en service du limnigraphe de Valence, la courbe H/Q utilisée et rapportée à l'échelle du 109,700 (voir pièce 5\*). Les pièces 7\* et 8\* résument les résultats auxquels nous avons abouti.*

*\*Toutes les références citées dans cette note ne sont pas joints à ce dossier et ne correspondent en aucune manière aux numéros des annexes de ce dossier.*

# TERNAY - GIVORS - LA MULATIERE

La série des débits du Rhône que l'on trouve sous Thalie à la station de Ternay se décompose en fait de la façon suivante :

- de 1920 à 1965, il s'agit des débits issus de la cote à la station de la Mulatière
- de 1966 à 1979, il s'agit des débits issus de la cote à la station de Givors
- de 1980 à 1999, il s'agit des débits issus de la cote à la station de Ternay

## **1. Les stations de mesure**

### **LA MULATIERE**

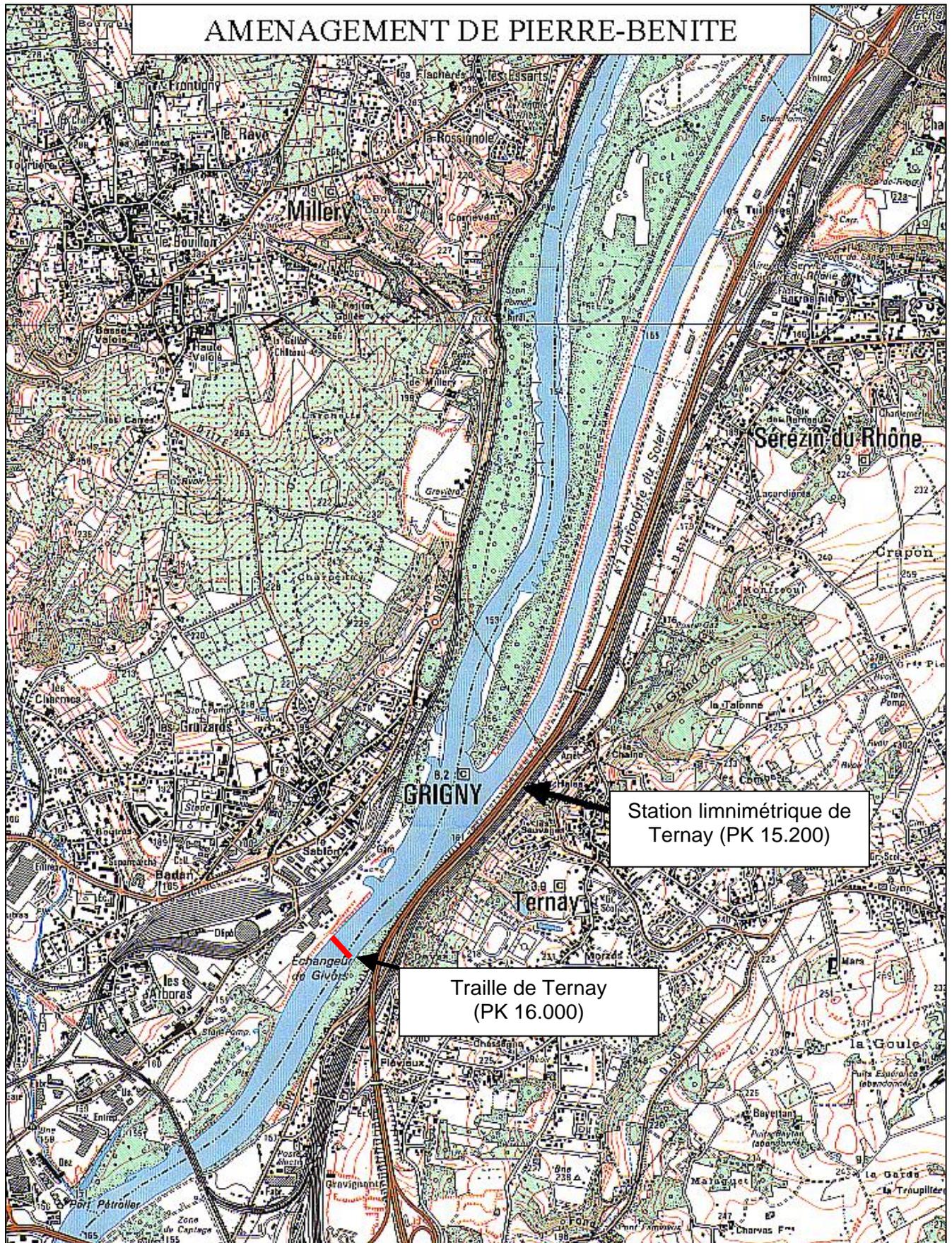
- Relevés de l'échelle historique trois fois par jour depuis au moins **1895** (archivés à la CNR depuis cette date).
- Limnigraphe à flotteur mis en service le 14/03/**1949** par les Ponts et Chaussées au **PK 0,700** du Bas-Rhône en **rive droite**. Devient CNR le 25/05/**1957**.
- Cette station se retrouve dans la retenue de Pierre Bénite, depuis la mise en eau en **1966**.
- Arrêt de l'enregistrement papier le 27/12/**1996**.

### **GIVORS**

- Limnigraphe à flotteur mis en service le 29/04/**1960** au **PK 19,070 rive droite** (retenue de Vaugris). Arrêt le 23/04/**1993**.

### **TERNAY**

- Limnigraphe Rittmeyer bulle à bulle installé en **1966**, **PK 15,2 rive gauche**. Enregistrement papiers à la CNR Lyon et à l'usine de Pierre Bénite, par transmission ligne PTT.
- Station influencée par le remous de Vaugris depuis la mise en eau en **1980**.
- Automatisation le 26/03/**1990**.
- Présence d'un capteur géré par le Service de la Navigation au même endroit.





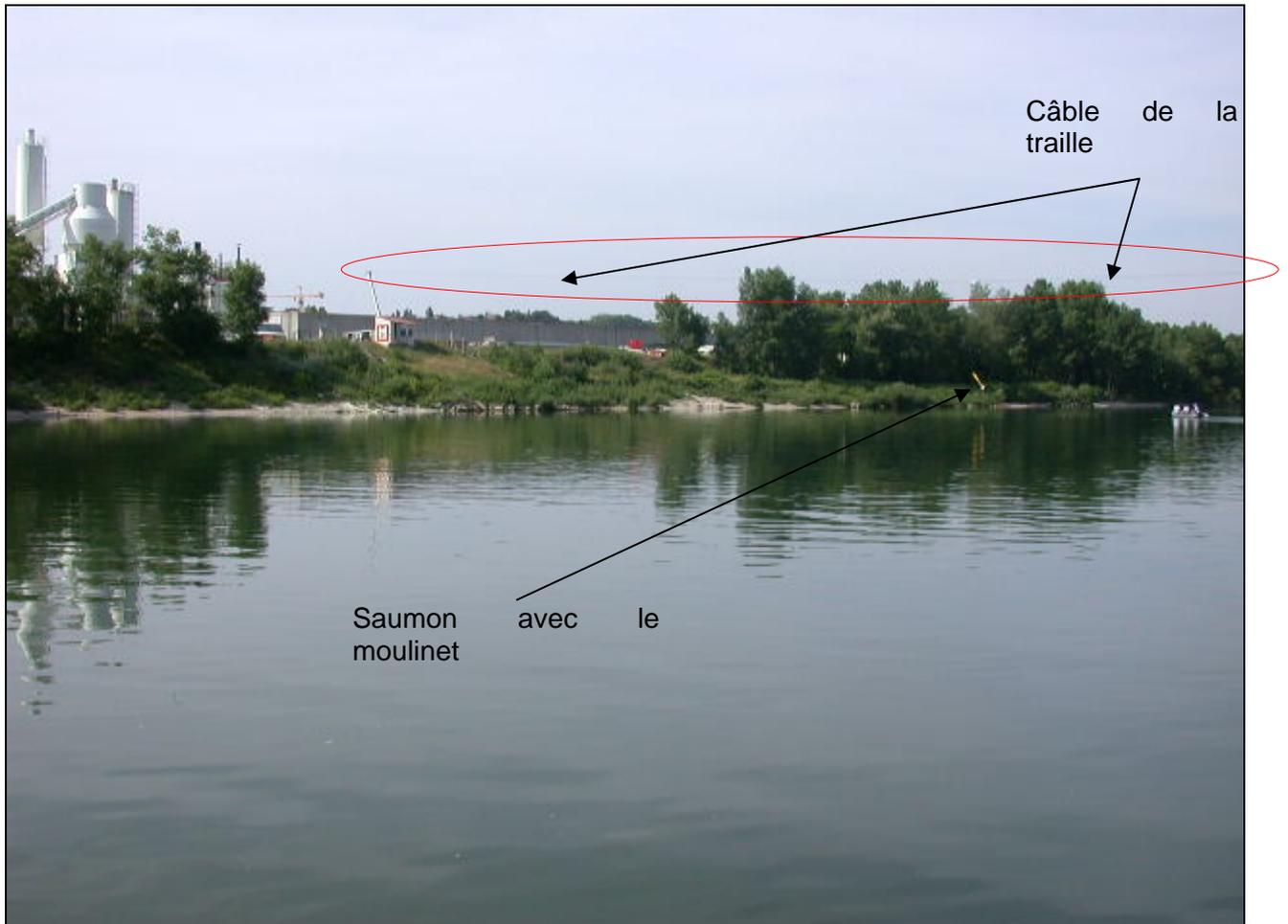
**Cabine de la station limnimétrique de Ternay (PK 15.200)**



**Echelle de la station limnimétrique de Ternay (PK 15.200)**



**Traille de jaugeage de Ternay (PK 16.000)**



**Traîle de jaugeage de Ternay (PK 16.000)**

## **2. Jaugeages et calcul des débits**

- De **1920 à 1950**, calcul des débits avec cotes observées à l'échelle de La Mulatière et courbe Q(h) des Ponts et Chaussées.
- De **1951 à 1965**, calcul des débits avec cotes prises sur limnigramme de la Mulatière et courbe Q (h) contrôlée par jaugeages à Oullins PK 1,5 du Bas-Rhône avant **1959** puis à Vienne après 1959 (station en téléphérique).
- Calcul des débits **1966-1979** avec hauteurs prises sur le limnigramme de Givors et la courbe Q(h) à Givors. La courbe Q(h) à la station de Givors est basée sur des jaugeages à la station en téléphérique de Vienne (barque) qui sera déposée fin septembre **1979** (travaux de la chute de Vaugris).
- En **1980**, construction d'une station de jaugeage en téléphérique complète (saumon) au **PK 16.000** (cabine en rive droite). Cette station est toujours en service.
- Calcul des débits à Ternay de **1980 à 1990** avec les hauteurs prises sur le limnigramme de Ternay et la courbe Q (h) double à Ternay tenant compte des fluctuations de la retenue de Vaugris au pont de Vienne PK 28,600 (point de réglage).
- Depuis **1991**, calcul automatique des débits à Ternay par le logiciel Thalie avec les hauteurs télétransmises à Ternay et la courbe Q (h) double précédente.
- Jaugeage moulinet à Grigny (PK 16.000 RD) et ADCP depuis **1995** (au droit de la station)

# Annexe C

## Organisation de l'activité Hydrométrie

## Objet de l'activité Hydrométrie :

Sous ce terme Hydrométrie, l'activité hydrométrique regroupe 5 thèmes :

- A Assurer la gestion technique et la maintenance centralisée du réseau hydrométrique de la CNR (détaillée dans la procédure P111) ;
- B Assurer la maintenance du logiciel Thalie ;
- C Répondre aux demandes ponctuelles concernant l'hydrologie ;
- D Répondre aux demandes ponctuelles concernant l'hydraulique.
- E Assister le maître d'ouvrage pour des expertises ou des réalisations d'équipements de mesures sur site.

L'activité A reste le cœur de métier de l'équipe hydrométrie du laboratoire.

Extrait de la P111 résumant l'activité A

« Préambule

Cette procédure a pour but de décrire l'organisation mise en place pour répondre à l'ensemble des missions ayant trait à la gestion technique et à la maintenance centralisée du réseau hydrométrique de la CNR, dans le bassin versant du Rhône :

- Supervision du réseau ;
- Opérations de mesures sur le terrain ;
- Maintenance centralisée des stations de mesures ;
- Assistance technique au maître d'ouvrage (notamment en période de crue) et expertises ponctuelles en hydrométrie. »

En 2005, les activités B, C et D ont été transférées des services centraux CNR à l'hydrométrie gérée par le laboratoire.

L'activité E peut être plus ou moins importante en fonction des années. Nous citerons pour mémoire les affaires en cours pour 2005 :

- Mise en place d'une station de mesures directes de débit sur le Rhône à Roquemaure ;
- Réalisation de mesure de vent dans le canal de Donzère Mondragon ;
- Rénover les capteurs de niveaux d'eau dans le cadre du projet Rhône2000.

Pour mener à bien ces missions, l'équipe hydrométrique est constituée :

- d'un noyau « dur » permanent de 10 personnes affectées exclusivement à cette activité (le responsable de l'activité, le responsable de l'activité terrain, le responsable de la maintenance Thalie/ingénieur, 7 techniciens) ;
- de 3 personnes intervenant en complément du noyau « dur » en fonction de la charge de travail et de leur disponibilité (1 ingénieur et 2 techniciens).

Un technicien intervient en activité transverse en tant que RGEM (Responsable de la gestion des équipements de mesure).

En appui, on citera les Directions Régionales qui assurent la maintenance locale des stations sauf demande express de leur part, comme pour la DR de Vienne.

## Rôle et responsabilité de chacun

### Responsable de l'activité Hydrométrique

- Il assure l'organisation des missions de cette activité (charge de travail et planning, livrable, indicateur technique et financier). Il en rend compte au responsable du laboratoire qui arbitrera les priorités en cas de besoin ;
- Il gère la suite à donner aux demandes ponctuelles de types hydrométriques. Il désigne notamment le technicien responsable pour établir la réponse ;
- Il contrôle, ou s'assure du contrôle, technique de l'ensemble des documents issus de cette activité.

Il est principalement assisté de deux ingénieurs, un pour les interventions sur le terrain et l'autre pour la maintenance Thalie.

En cas d'absence, notamment congé, il est remplacé par le responsable de l'équipe « terrain » ou par un ingénieur (ingénieur 2 dans ce texte).

### Responsable de l'équipe « terrain »

Il est le qui intervient sur site pour réaliser des mesures de niveaux, vitesses ou débit. A ce titre :

- Il planifie et organise le planning de l'ensemble des agents de l'hydrométrie et en particulier celui des agents de terrain. Sauf cas particulier, il devra toujours être possible de constituer une équipe d'intervention sur site. De même, la supervision du réseau doit être assurée du lundi au vendredi ;
- Il intervient sur le terrain en période de crise ou de tout autre évènement dont pour lequel il jugera sa présence nécessaire. Suite aux interventions de jaugeages, il s'assure que le tableau « état des jaugeages » est bien complété avec les mesures qui viennent d'être réalisées. Il en rendra compte au responsable d'activité ;
- Il suit la qualité des courbes hauteurs/débits du réseau hydrométrique et programme les opérations de jaugeages depuis leur réalisation jusqu'à l'archivage des données dans la base de données Thalie.
- Il propose la mise à jour des courbe H/Q ou le reparamétrage des stations de mesures directes de débits ;
- Il veille à la bonne réalisation des dossiers annuels validant les mesures de l'année précédentes, notamment le rapport de jaugeages, le rapport de courbes et le rapport hydrologique annuel.

### Responsable de la maintenance Thalie

Il est responsable de la maintenance Thalie et des réponses aux demandes ponctuelles de types hydrauliques. A ce titre :

- Il est la correspondante privilégiée pour toutes demandes d'informations, de formation, de droit d'accès à la base de données ou de

dysfonctionnement de l'applicatif Thalie. Seules les demandes d'améliorations ou montées de version Thalie ne sont pas de son ressort ;

- Il gère la suite à donner aux demandes ponctuelles de types hydrauliques sous contrôle du responsable de l'activité hydrométrique.

### **Technicien n° 1**

Il est le responsable du bon fonctionnement du réseau de mesures Hydrométrique. A ce titre :

- Il supervise le réseau de mesure au quotidien. Il est le correspondant privilégié pour toutes les questions relatives aux stations de mesures ;
- Il tient à jour la liste des stations du réseau de mesure ;
- Il contrôle le bon fonctionnement des stations de mesures et initie les actions correctives en cas de défaillance ;
- Il gère la base de données maintenance traçant l'ensemble des actions faites sur les stations de mesures ;
- Il veille particulièrement aux stations utilisées par les outils du CGPR dans le cadre de la prévision de production d'énergie ;
- Il réalise un bilan mensuel de l'état du réseau avec les indicateurs de disponibilité et de maintenance des stations. Il en rendra compte à Thierry Pantel à minima une fois par mois ou plus s'il le juge nécessaire ;
- Il est responsable de la réalisation du rapport hydrologique annuel, sous contrôle du responsable « terrain ».

En cas d'absence, congé, formation, maladie, il est remplacé en priorité par le technicien 3 puis en second par le technicien 2.

### **Technicien n° 2**

Il veille à la cohérence des données dans la base Thalie aussi pour la nomenclature des données que les données elles même. A ce titre :

- Il participe à l'élaboration des indicateurs qualité de l'état du réseau. Il informe, si besoin est, le responsable de l'équipe « terrain » des problèmes de cohérences de la base pour effectuer des contrôles sur site (jaugeages ou niveaux) et à minima une fois par mois lors du bilan mensuel ;
- Il assure, en lien avec le responsable d'activité, la validation des données notamment lors de l'édition du rapport hydrologique annuel ou lors d'évènements ponctuels comme les crues ;
- Il est responsable du tableau de suivi de demandes ponctuelles aussi bien celles de type hydrologique qu'Hydraulique ;
- Il est susceptible d'intervenir sur le terrain pour compléter les équipes de jaugeages en cas de besoin, et à minima une fois par an pour être opérationnel.

### **Technicien n° 3**

Il est le technicien privilégié pour les réponses aux demandes de types hydrologiques. Il est responsable de l'édition du rapport d'alarme Thalie en lien avec l'ingénieur 2 et de l'édition du rapport mensuel d'activité hydrométrique.

Il supervisera le réseau de mesure lors d'absence du technicien 1. En fonction de sa disponibilité, il assistera le technicien 1 ou le technicien 2 pour la critique et la validation des données sous Thalie. Il est susceptible d'intervenir sur le terrain pour compléter les équipes de jaugeages en cas de besoin, et à minima une fois par an pour être opérationnel

#### **Technicien n° 4**

Sa fonction principale est technicien de terrain en hydrométrie sous la responsabilité du responsable de l'équipe « terrain ». A ce titre :

- Il installera des capteurs sur site. Il réalisera la maintenance de station de mesure et de jaugeage ;
- Il pourra être responsable d'équipe pour jauger ou pour installer des équipements de mesures en toute situations normale ou en crise. Il s'assurera alors de la bonne préparation de son équipe avant intervention, du bon déroulement des mesures ainsi que le dépouillement des valeurs mesurées avec une attention particulière pour la réalisation des comptes-rendus incluant les incertitudes de mesures ;
- Il est sous la responsabilité directe du chef d'équipe le jour des interventions sur site ;
- Il est responsable de la réalisation des rapports de courbes ;
- Il est responsable de l'entretien des véhicules et du matériel marine. Dans ce cadre, il est assisté du technicien 6.

#### **Technicien n° 5**

Sa fonction principale est technicien de terrain en hydrométrie sous la responsabilité du responsable de l'équipe « terrain ». A ce titre :

- Il installera des capteurs sur site. Il réalisera la maintenance de station de mesure et de jaugeage ;
- Il pourra être responsable d'équipe pour jauger ou pour installer des équipements de mesures en situations normales. Il s'assurera alors de la bonne préparation de son équipe avant intervention ;
- Il est sous la responsabilité directe du chef d'équipe le jour des interventions sur site ;
- Il participera au dépouillement des valeurs mesurées avec une attention particulière pour la réalisation des comptes-rendus incluant les incertitudes de mesures ;
- Il est responsable de la réalisation des rapports de jaugeages ;
- Il est responsable de l'entretien et de la gestion du parc des appareils mobiles tels que les aqualogs.

#### **Technicien n° 6**

Sa fonction principale est technicien de terrain en hydrométrie sous la responsabilité du responsable de l'équipe « terrain ». A ce titre :

- Il installera des capteurs sur site. Il réalisera la maintenance de station de mesure et de jaugeage ;
- Il pourra être responsable d'équipe pour jauger ou pour installer des équipements de mesures en toute situations normale ou en crise. Il

s'assurera alors de la bonne préparation de son équipe avant intervention, du bon déroulement des mesures ainsi que le dépouillement des valeurs mesurées avec une attention particulière pour la réalisation des comptes-rendus incluant les incertitudes de mesures ;

- Il est sous la responsabilité directe du chef d'équipe le jour des interventions sur site ;
- Il est responsable du suivi des gilets de flottaisons notamment pour le contrôle sécurité annuel de l'ensemble des gilets de l'équipe hydrométrie.

### **Technicien n° 7**

Sa fonction principale est technicien de terrain en hydrométrie sous la responsabilité du responsable de l'équipe « terrain ». A ce titre :

- Il installera des capteurs sur site. Il réalisera la maintenance de station de mesure et de jaugeage ;
- Il est sous la responsabilité directe du chef d'équipe le jour des interventions sur site ;
- Il participera au dépouillement des valeurs mesurées avec une attention particulière pour la réalisation des comptes-rendus incluant les incertitudes de mesures ;

### **Ingénieur hydraulicien**

Projet Rhône 2000 et mission complémentaire au responsable de la maintenance Thalie, en cas d'absence, pour Thalie

### **Ingénieur responsable maintenance Thalie**

Outre sa charge d'hydraulicien, cet ingénieur apporte une contribution non négligeable à l'Hydrométrie. Il intervient notamment :

- En tâches de fond récurrentes : rapport d'alarme Thalie, suivi des conventions avec les organismes extérieurs pour la mutualisation de données, remplacement du responsable de l'activité en cas de besoin ;
- En mission ponctuelle, notamment la mise en place de nouvelle station sur le réseau (sur l'Azergues, sur le Rhône à Avignon).

### **Technicien n° 8**

Outre sa charge d'agent d'essais au laboratoire, il intervient en cas de besoin en complément pour la supervision du réseau ou intervention sur site. La planification de ces interventions se fera en concertation avec le responsable de l'activité hydraulique. La gestion des priorités se fera par le chef du laboratoire.

### **Technicien n° 9**

Outre sa charge d'agent d'essais au laboratoire, il intervient en cas de besoin en complément pour la supervision du réseau ou intervention sur site. La planification de ces interventions se fera en concertation avec le responsable de l'activité hydraulique. La gestion des priorités se fera par le chef du laboratoire.

### **Technicien n° 10**

Il intervient dans l'activité hydrométrie en tant que RGEM : il s'assure que les matériels de mesures sont gérés et utilisés conformément aux procédures en vigueur.

# Annexe D

## Etude des coefficients de surface sur le Rhône et ses affluents

- Document de travail -

## Coefficient de surface sur le Rhône et ses Affluents

### INTRODUCTION

Le jaugeage au moulinet peut être réalisé de plusieurs manières :

- mesure de vitesse pour chaque abscisse à toutes les profondeurs (0.9h ; 0.8h ; 0.6h ; 0.4h ; 0.2h ; 20cm de la surface) : jaugeage dit 'standard'
- mesure de vitesse en quelques points par abscisse
- mesure de vitesse avec un seul point par abscisse (à 20 cm sous la surface ou à 0.6h)

Le coefficient de surface  $C_2$  est calculé, après traitement d'un jaugeage standard au moulinet, en faisant le rapport entre le débit total et le débit mesuré à 20cm sous la surface (cf. paragraphe 2.1.2.2 du rapport) :

$$C_2 = \frac{Q_{total\_calculé\_à\_partir\_de\_toutes\_les\_valeurs\_du\_profil}}{Q_{2\_calculé\_à\_partir\_des\_valeurs\_à\_20cm\_sous\_la\_surface}}$$

Il permet, par la suite, d'obtenir une estimation du débit en faisant une mesure de vitesse à 20cm sous la surface lorsque les conditions ne permettent pas de réaliser un jaugeage au moulinet complet.

Une étude menée par le CETIAT (dont les conclusions ont été rendues en 2005) basée sur les résultats des jaugeages toutes profondeurs au moulinet réalisés par la CNR sur 40 sites sur le Rhône et ses Affluents, apporte une valeur numérique moyenne à ce coefficient de surface  $C_2$ . Elle est de 0.86, avec un écart type de 0.04, qui peut être utilisé comme estimation de l'incertitude-type (l'écart type représente 4.5% du  $C_2$  moyen).

Après plusieurs années de mesures de débit toutes profondeurs avec le moulinet, nous remarquons que l'utilisation d'une valeur moyenne du coefficient de surface ne permettrait pas d'obtenir une estimation assez juste d'un débit total à partir d'un débit de surface. En effet, la dispersion de ce coefficient de surface est telle qu'il est impératif de se faire une idée de son comportement.

C'est pour cela que nous allons, dans les pages suivantes, étudier l'évolution de  $C_2$  en fonction de la hauteur d'eau.

Beaucoup de paramètres utilisés ne seront que des estimations, nous ne nous appuyerons pas sur les valeurs numériques en elles-mêmes, mais plutôt sur l'évolution de ces valeurs. Nous essayerons de dégager une tendance plutôt qu'une formule mathématique concernant la variation du coefficient de surface en fonction de la hauteur d'eau.

## MODE OPERATOIRE

### *Traitement du jaugeage standard*

Nous allons utiliser des jaugeages standard réalisés sur le Rhône et ses Affluents. Ces jaugeages sont classés dans un premier temps par site, mais ils sont aussi regroupés suivant la nature de la rivière où ils ont été faits. Ainsi, nous distinguons 3 grands groupes dans l'échantillon de jaugeages moulinet toutes profondeurs choisis pour cette étude [voir tableau 1] :

- Rhône : 145 jaugeages opérés sur 11 sites différents
- Rhône Court-Circuité : 34 jaugeages sur 5 sites
- Affluents : 332 jaugeages pour 19 sites répertoriés

Chaque jaugeage (donc chaque débit mesuré) est associé à un niveau de plan d'eau relevé sur le terrain par l'opérateur lors de la manipulation.

Les résultats obtenus lors du traitement du jaugeage standard sont principalement :

- le débit total  $Q$
- le débit  $Q_2$  mesuré à 20 cm sous la surface
- la section mouillée

Ces données sont aujourd'hui automatiquement fournies par le logiciel Thalie 2 lorsque la saisie manuelle du jaugeage standard est terminée.

Le coefficient de surface  $C_2$  est obtenu en faisant le rapport entre le débit total et le débit à 20cm.

### *Largeur fictive [par site]*

Nous avons donc pour chaque jaugeage des données calculées après saisie (les débits totaux et de surface, la surface mouillée, le coefficient de surface) et des données rapportées par l'opérateur depuis le terrain (cote à l'échelle lors du jaugeage).

Chaque site est alors pris individuellement : en utilisant une loi de régression linéaire à partir des cotes aux échelles lues sur site et des sections mouillées calculées lors du traitement du jaugeage, nous parvenons à estimer une largeur fictive moyenne.

Ces valeurs ne sont que des estimations, qui ont été tout de même vérifiées par les personnes qui connaissent le mieux le terrain dans notre service.

Le tableau 1 récapitule ces largeurs fictives moyennes pour chaque site.

### *Hauteur fictive [par jaugeage]*

Pour chaque jaugeage nous pouvons désormais déterminer désormais une hauteur fictive en faisant le rapport entre la section mouillée calculée lors de sa saisie et la largeur fictive moyenne du site que nous avons estimée au préalable.

Ainsi, pour tous les jaugeages standards réalisés sur le Rhône et ses Affluents, nous allons pouvoir associer le coefficient de surface calculé lors de sa saisie avec la hauteur d'eau fictive qu'il y avait lors de sa réalisation.

## OBSERVATIONS ET COMMENTAIRES

### *Mise en graphique*

Dans un premier temps, tous les coefficients de surface sont regroupés (172 pour le Rhône, 36 pour les RCC, 368 pour les Affluents) sur un même graphique en fonction de la hauteur d'eau fictive qui leur est associée [voir graphe 1].

De ce nuage de points sont tirées 3 courbes de tendance : une pour le Rhône, une pour les RCC, et enfin une pour les Affluents.

Nous pouvons remarquer tout de suite que ces 3 courbes de tendance ont un coefficient directeur positif :

- ⇒ 0.007 pour le Rhône
- ⇒ 0.013 pour les RCC
- ⇒ 0.014 pour les Affluents

D'un ordre très général, ceci nous indique que quel que soit le site où le jaugeage est réalisé, le coefficient de surface a tendance à croître avec l'augmentation de la hauteur du plan d'eau.

D'autre part, nous pouvons remarquer que plus la hauteur d'eau augmente, plus le nuage de point de concentre vers des valeurs situées entre 0.85 et 0.95.

Dans un second temps tous les sites vont être traités séparément : pour chaque site il y aura un graphique sur lequel on portera un nuage de point représentant le coefficient de surface de chaque jaugeage effectué en fonction de la hauteur d'eau.

Ensuite, nous ajoutons la courbe de tendance générale de la rivière dont l'équation a été déterminée au dessus.

Cette opération est réalisée pour :

- ⇒ 11 sites du Rhône avec courbe de tendance générale  
 $y=0.0074x+0.8265$
- ⇒ 5 sites du RCC avec courbe de tendance générale  
 $y=0.0133x+0.8172$
- ⇒ 19 sites Affluents avec courbe de tendance générale  
 $y=0.0149x+0.8243$

En résumé, sur chaque graphique, nous retrouvons la courbe de tendance générale du groupe (Rhône, RCC ou Affluents), le nuage de points concernant le site, et enfin à partir de ce nuage de points est construite la courbe de tendance liée au site lui-même.

Dans le but de comparer le comportement, l'évolution du coefficient de surface en fonction de la hauteur entre tous les sites d'un même regroupement, les graphiques ont été miniaturisés et insérés à une seule feuille de calcul.

### *Les Affluents [Voir graphe 2]*

Tous les graphiques tirés des données des Affluents sont représentés avec une échelle commune :

- ⇒ 0 à 10m pour la hauteur d'eau sur l'axe des abscisses
- ⇒ 0.65 à 1.05 pour  $Q/Q_2$  sur l'axe des ordonnées

D'un ordre général, le coefficient de surface lié aux Affluents augmente avec la hauteur d'eau. En effet, pour la plupart des sites, la courbe de tendance est assez proche de la courbe de tendance générale des Affluents.

Mais aucune règle ni généralité n'est applicable.

D'autre part, même si la tendance générale des courbes des affluents est à la hausse, on ne peut pas dire que tous les sites se comportent ainsi. En effet, on remarque que la courbe de Couzon par exemple est plate alors que celles du Guiers et des Usses a même plutôt tendance à descendre quand la hauteur d'eau augmente.

### *Le Rhône [Voir graphe 3]*

Echelle des graphiques :

- ⇒ 0 à 13m pour la hauteur d'eau sur l'axe des abscisses
- ⇒ 0.70 à 1.00 pour  $Q/Q_2$  sur l'axe des ordonnées

Là aussi, nous pouvons aisément dire que chaque site observé se comporte d'une manière bien particulière. En effet, certains sites comme Ternay, Corbonod, suivent bien la courbe de tendance du Rhône (c'est-à-dire avec une pente légèrement positive), mais Beaucaire lui conserve un coefficient de surface presque constant malgré le fait que sa hauteur d'eau estimée soit très étendue.

Pour le Rhône, comme précédemment pour les Affluents, aucune règle n'est applicable pour expliquer l'évolution du coefficient de surface en fonction de la hauteur d'eau, même si la tendance générale est à la hausse. Tous les sites se comportent de manière bien particulière, même si on observe une tendance générale à la hausse.

### *Les RCC [Voir graphe 4]*

Echelle des graphiques :

- ⇒ 0 à 8m pour la hauteur d'eau sur l'axe des abscisses
- ⇒ 0.70 à 1.00 pour  $Q/Q_2$  sur l'axe des ordonnées

Il est difficile de tirer une conclusion sur ce groupe car seulement 5 sites présentent des données exploitables.

Pont Saint Esprit et Pierre Bénite sont les seuls sites pour lesquels les points mesurés sont étalés sur une gamme de hauteur assez significative.

Dans la globalité, les RCC se comportent comme le Rhône et les Affluents : la courbe de tendance générale a une pente positive, mais on observe des disparités à l'intérieur du groupe.

## CONCLUSION

L'analyse des données ci-dessus nous montre que dans sa globalité, le coefficient de surface varie largement suivant le lieu où le jaugeage est effectué.

Plus le jaugeage est réalisé dans une section dont la hauteur d'eau est petite, plus l'incertitude du coefficient de surface est grande. En effet, le nuage de point nous indique que lorsque le jaugeage est réalisé dans une section dont la hauteur d'eau est importante, le coefficient de surface tend à se rapprocher d'une valeur comprise entre 0.85 et 0.90.

Les disparités, à l'intérieur même d'un groupe (Affluents, Rhône et RCC) sont telles qu'il est impossible à ce niveau d'établir une règle conduisant à prédire l'évolution du coefficient de surface en fonction de la hauteur d'eau.

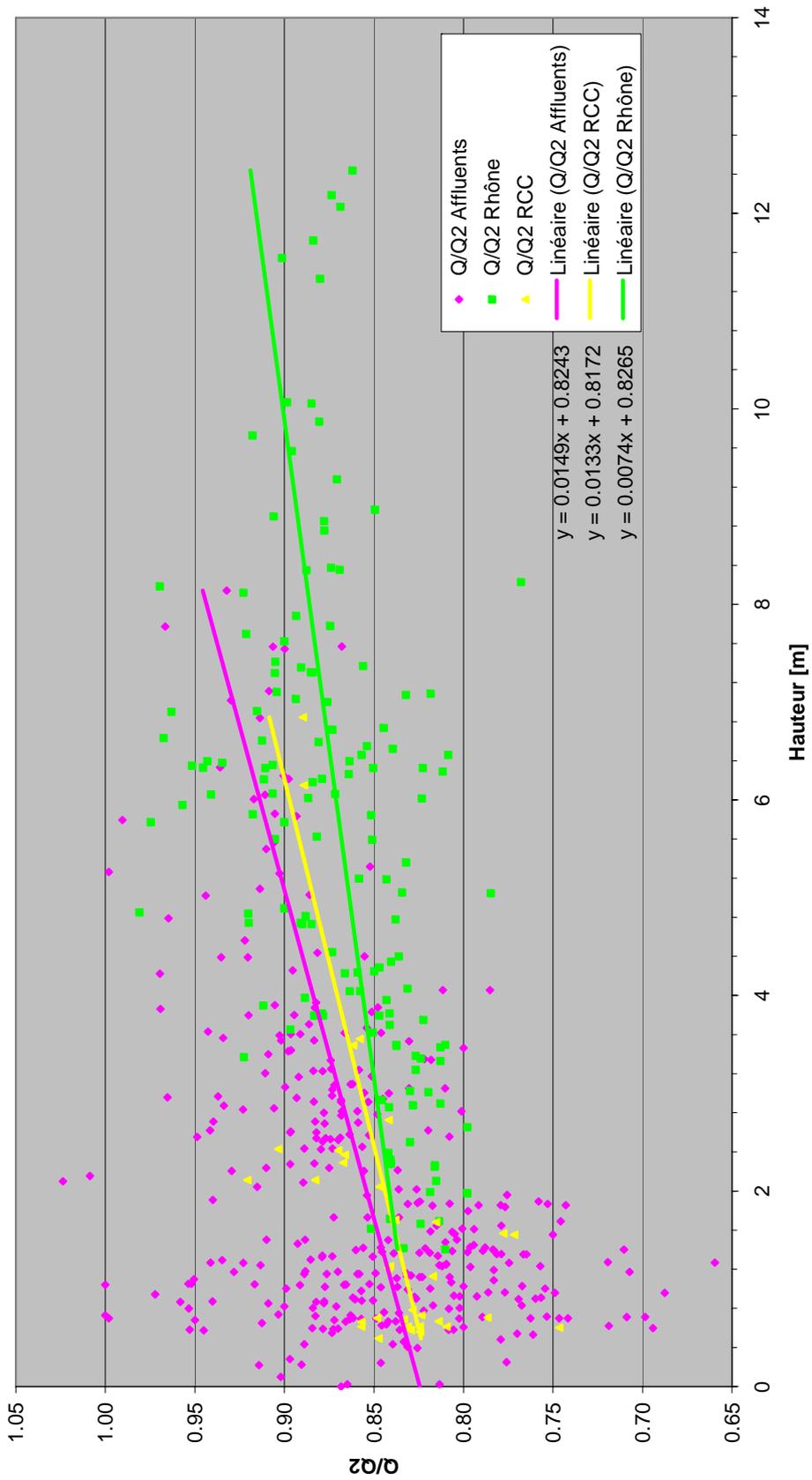
Même si pour la plupart des sites nous observons une augmentation de la valeur du coefficient de surface en fonction de la hauteur d'eau, il y a des cas où cette tendance ne s'applique pas.

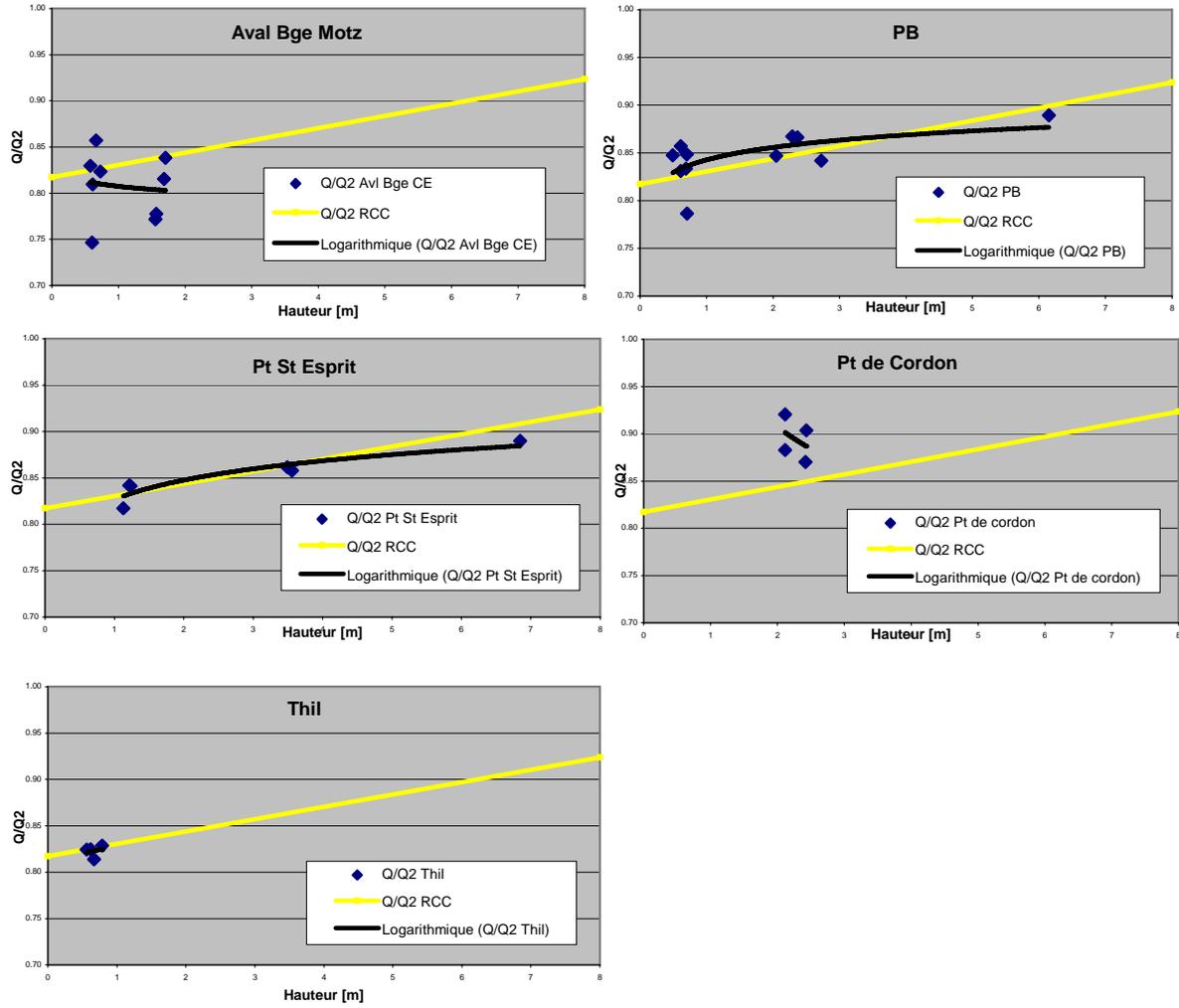
Peut-être faudrait-il établir et mettre à jour un historique des jaugeages toutes profondeurs réalisés pour tous les sites, et tirer de ces données une courbe indiquant l'évolution du coefficient de surface en fonction de la hauteur ?

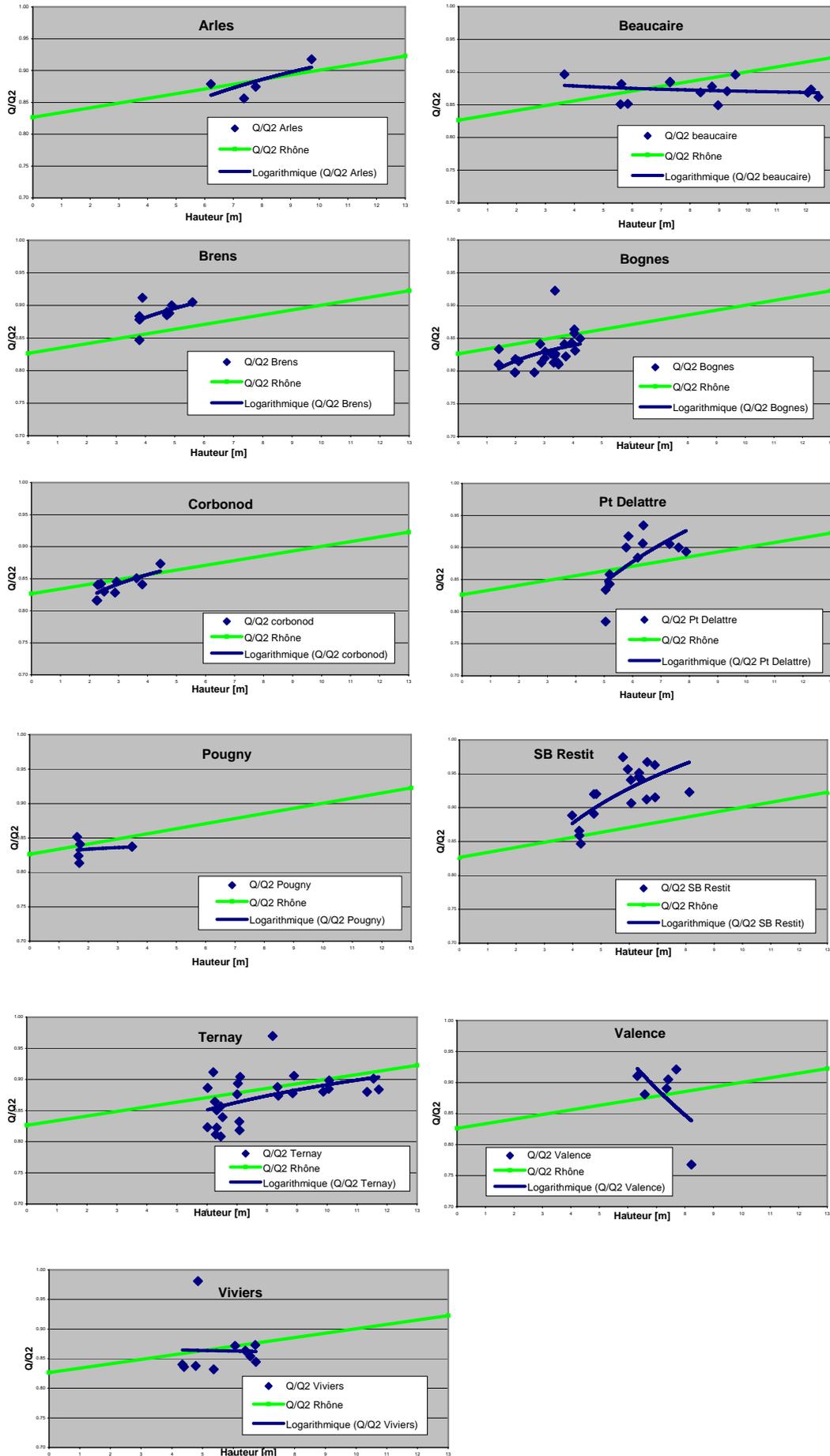
Ceci permettrait, en isolant les points douteux, d'avoir pour chaque site une courbe. Elle serait plus précise qu'une simple valeur moyenne du coefficient de surface, puisque nous avons vu que ce dernier varie d'une part en fonction de la hauteur d'eau, mais aussi en fonction du site dans lequel le jaugeage est réalisé.

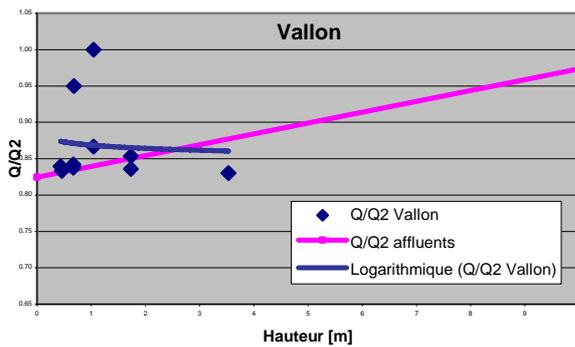
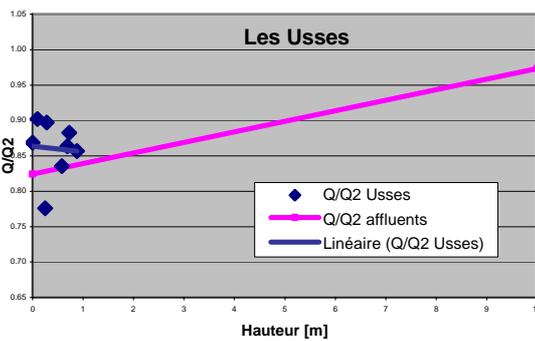
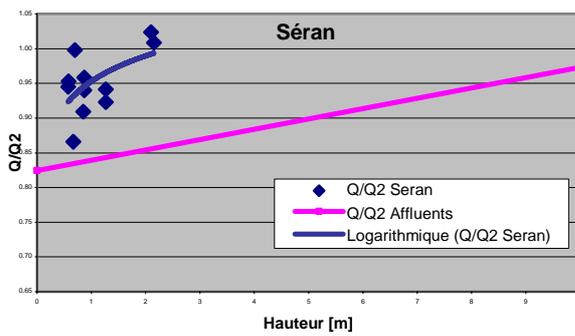
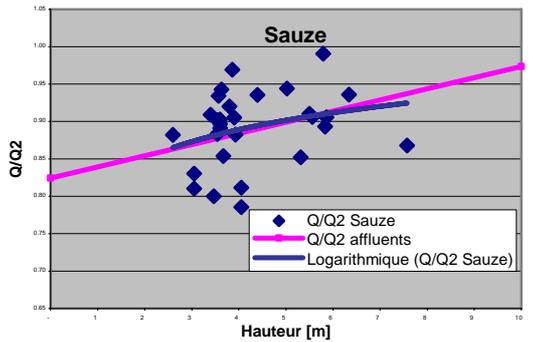
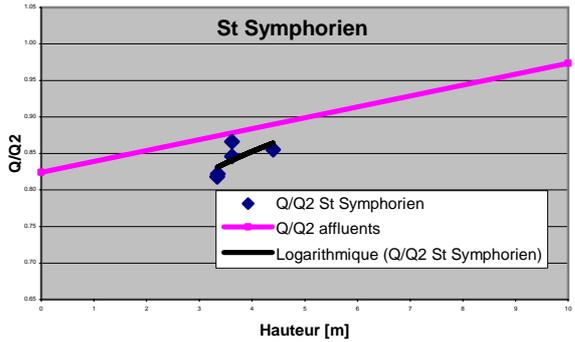
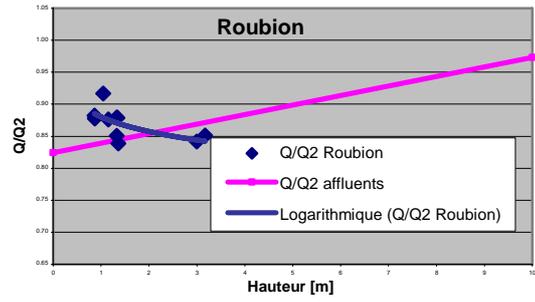
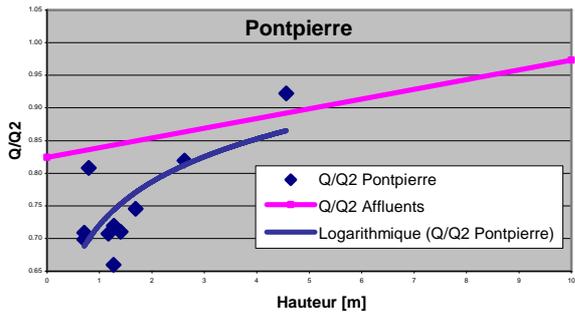
Une approche statistique complémentaire a été menée par le CETIAT (Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermique) à la demande de la CNR et est présentée en pages 29 à 37 de la Contribution CNR ANNEXE IV.

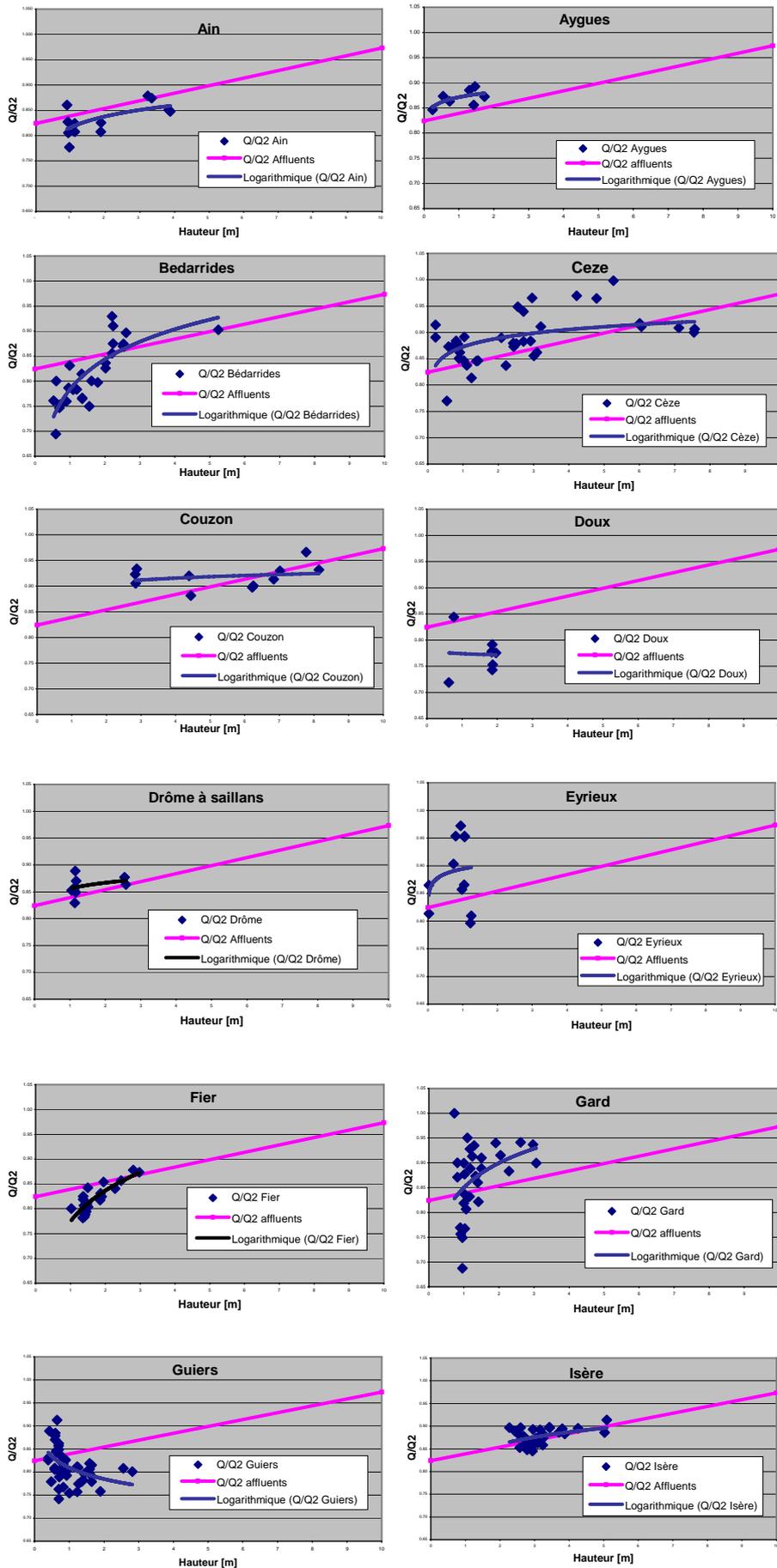
C2 en fonction de la hauteur de plan d'eau





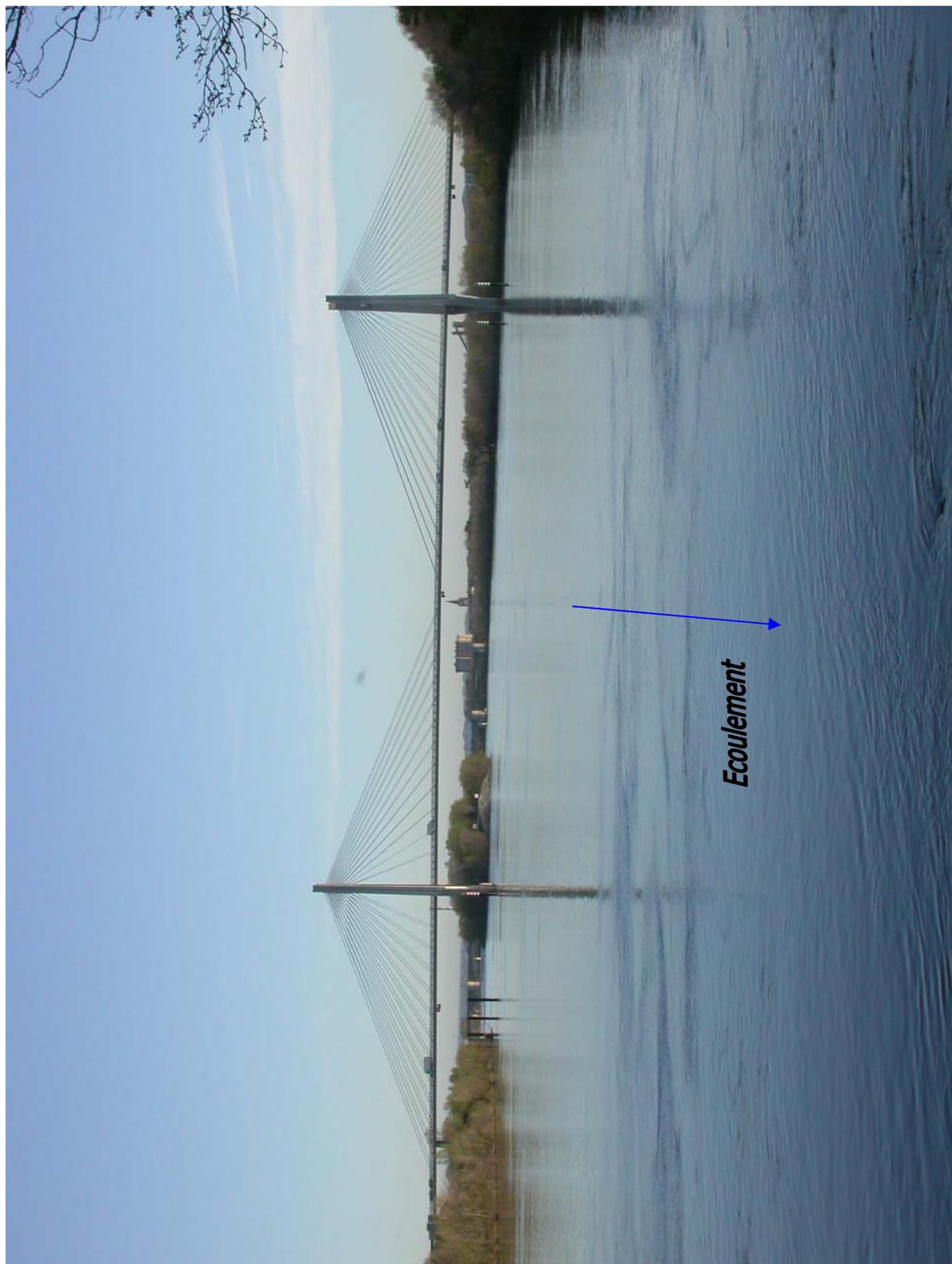




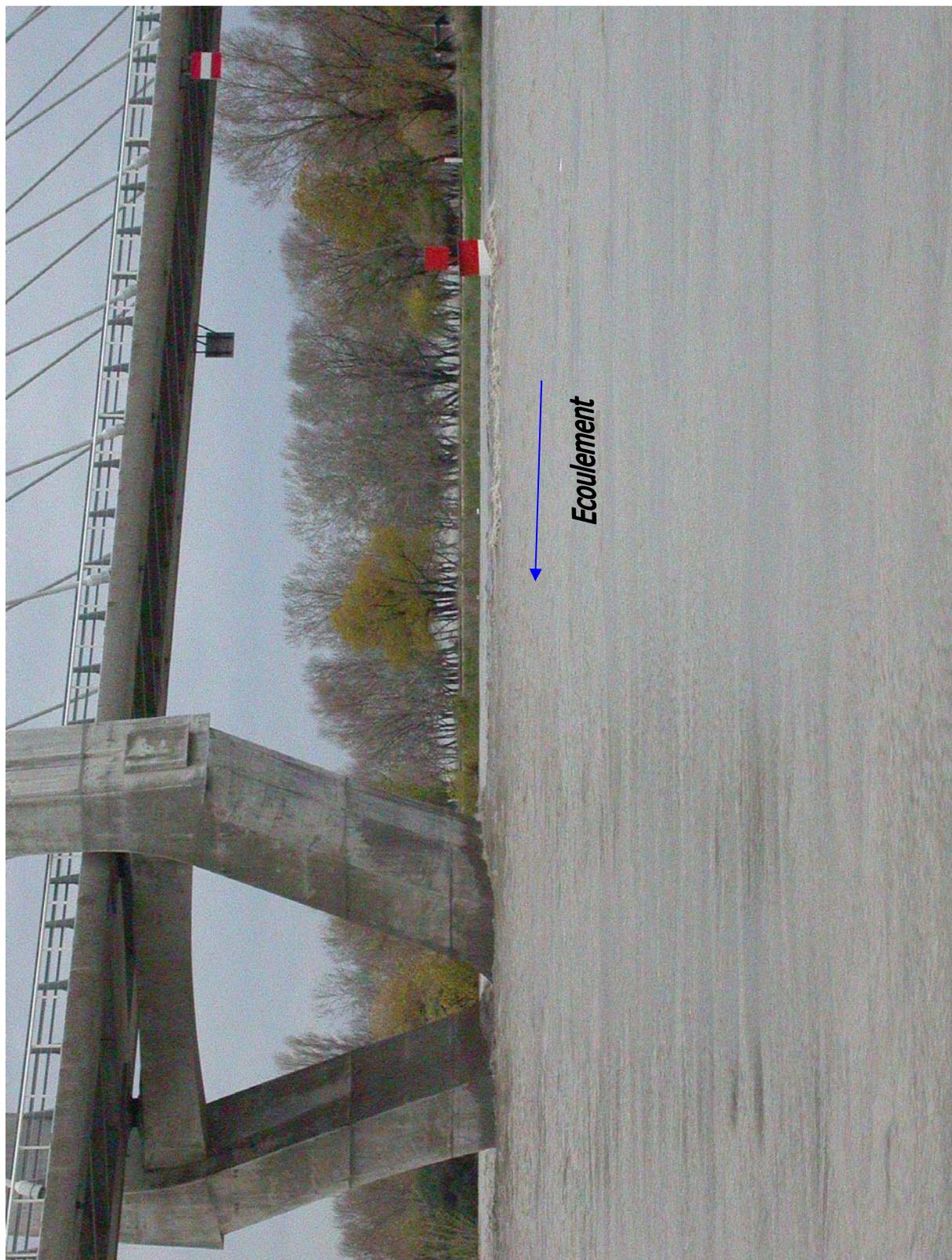


# Annexe E

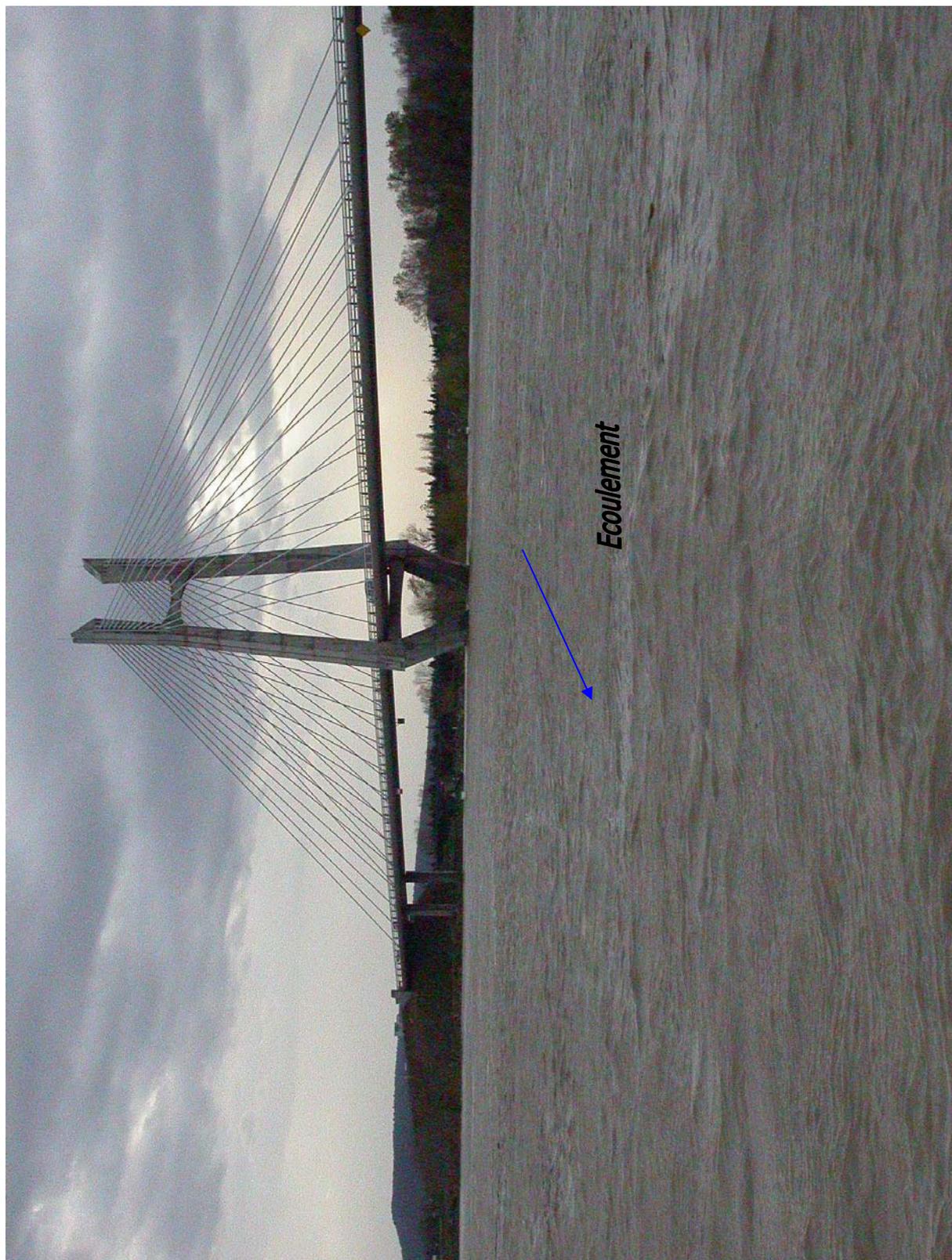
Photos du nouveau pont de Beaucaire  
(PK 269.600), au droit de la station  
hydrométrique de Beaucaire-Tarascon  
(PK 269.600)



**Photos du pont de Beaucaire (PK 269.600) le 31 mars 2005, hors crue**



**Photos du pont de Beaucaire (PK 269.600) le 3 décembre 2003 à 10h15, en crue**



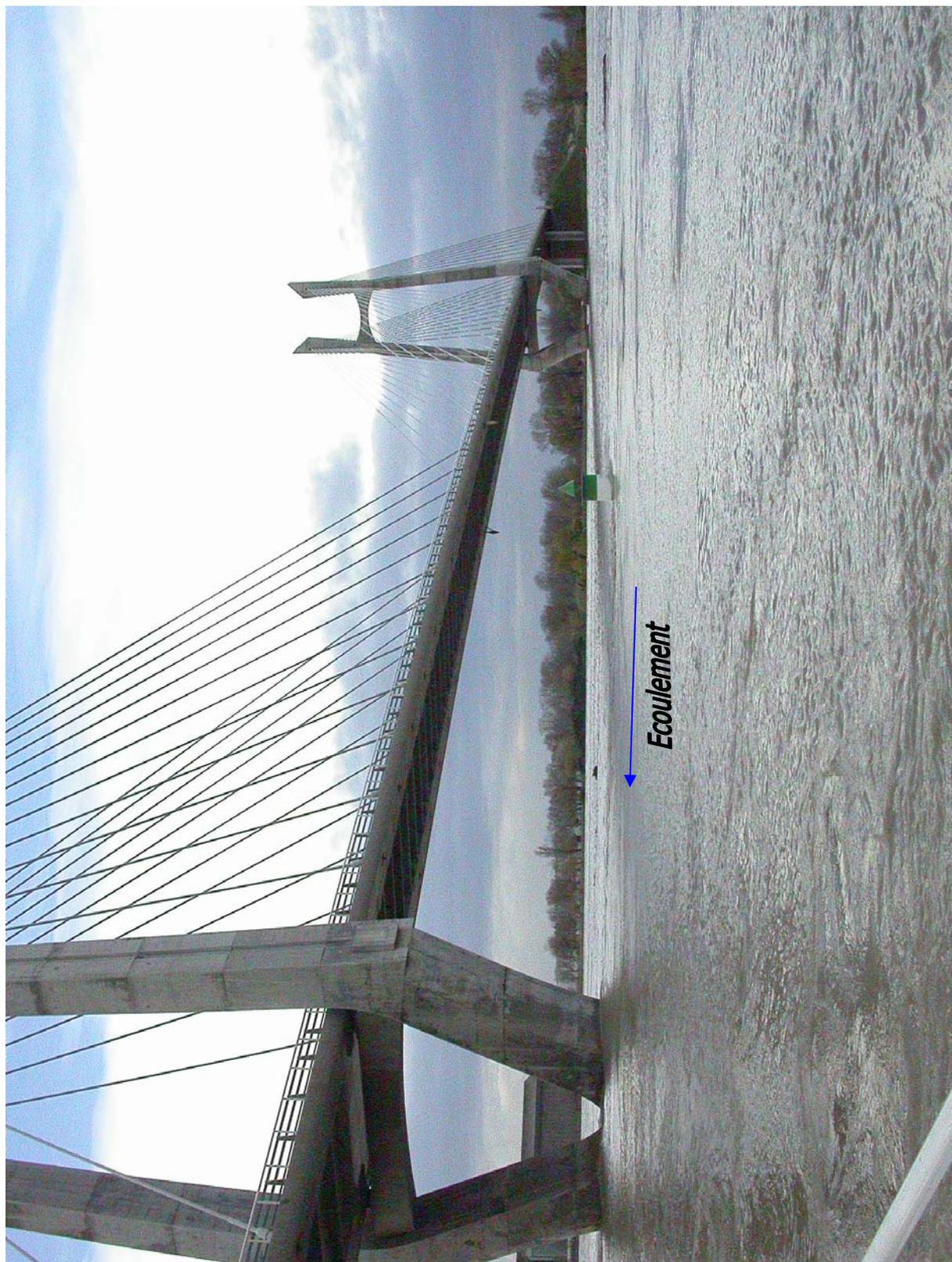
**Photos du pont de Beaucaire (PK 269.600) le 3 décembre 2003 à 10h19, en crue**



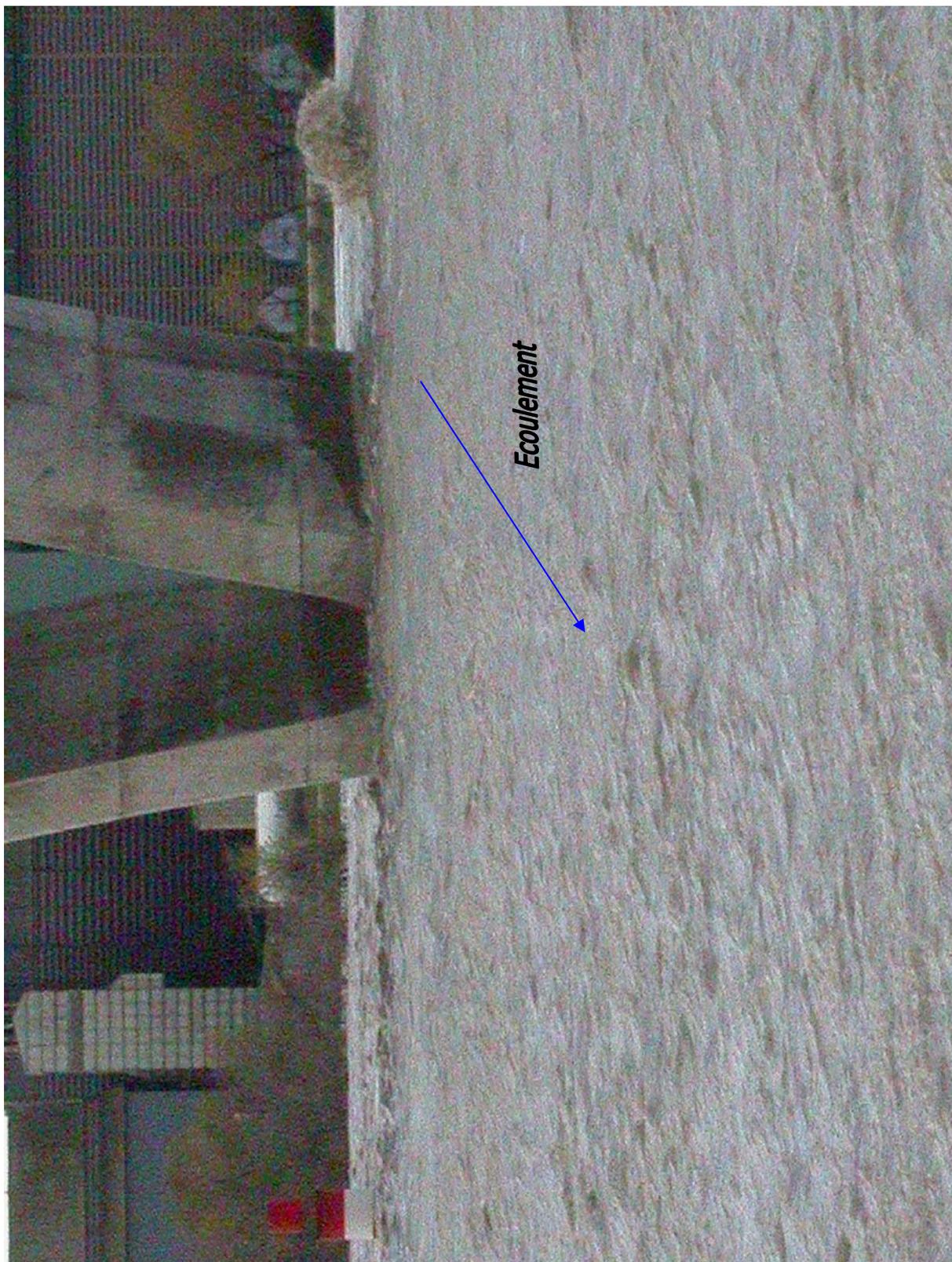
**Photos du pont de Beaucaire (PK 269.600) le 3 décembre 2003 à 10h47, en crue**



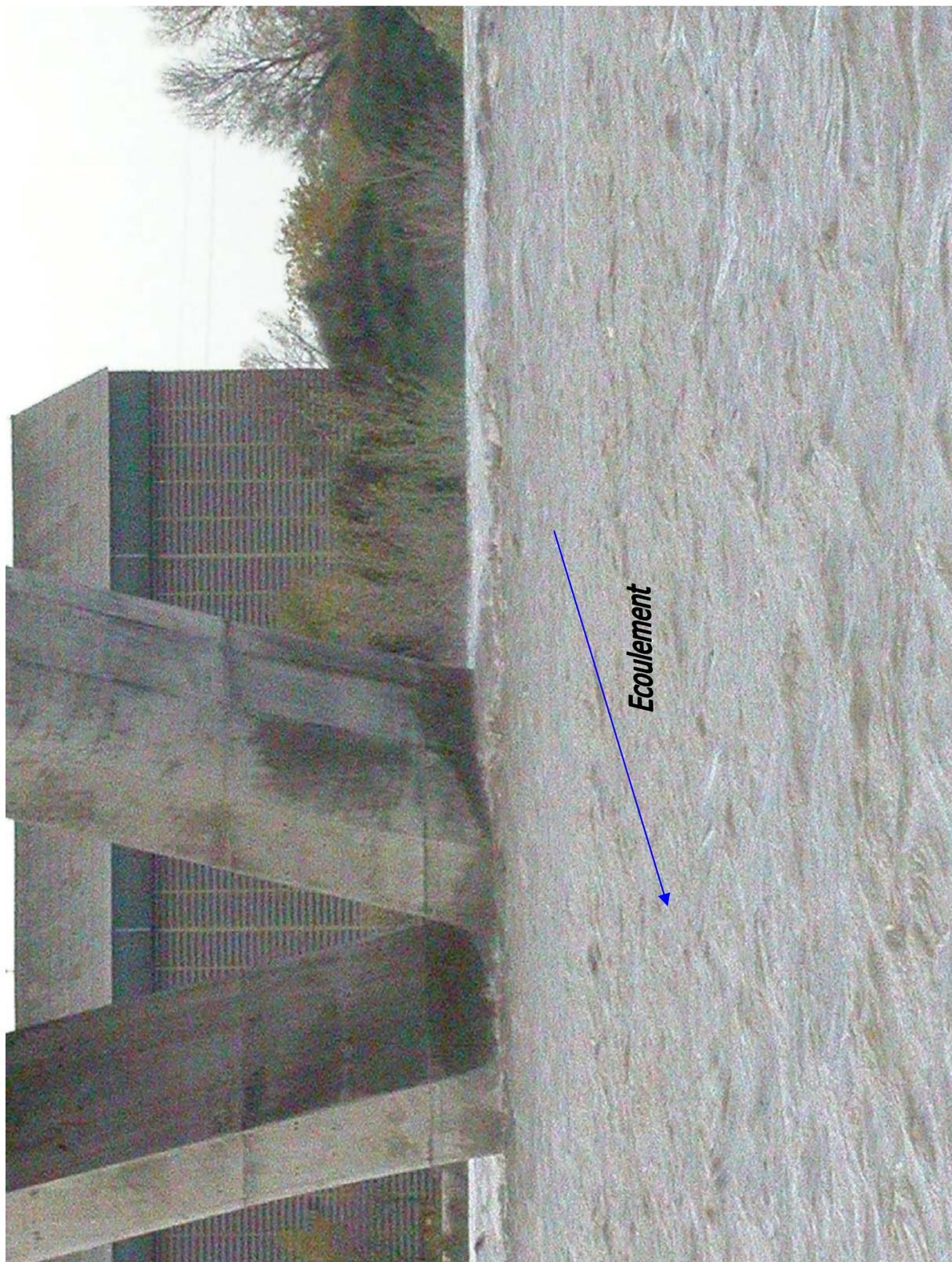
**Photos du pont de Beaucaire (PK 269.600) le 3 décembre 2003 à 10h49, en crue**



**Photos du pont de Beaucaire (PK 269.600) le 3 décembre 2003 à 10h49, en crue**



**Photos du pont de Beaucaire (PK 269.600) le 3 décembre 2003 à 11h21, en crue**



**Photos du pont de Beaucaire (PK 269.600) le 3 décembre 2003 à 11h22, en crue**