

n° 005602-01

décembre 2008

Expertise du schéma de protection contre les crues du secteur de Tarascon-Arles

Rapport technique

Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat
Prévention des risques
Développement durable
Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**



**CONSEIL GÉNÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT
ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE**

Rapport n° : 005602-01

**EXPERTISE DU SCHEMA DE
PROTECTION CONTRE MES CRUES DU
SECTEUR DE TARASCON-ARLES**

Partie Technique

établi par

Gérard Degoutte

Ingénieur général du génie rural, des eaux et des forêts

Réginald Sarralde

Ingénieur des travaux publics de l'État

Décembre 2008



Ministère de l'agriculture
et de la pêche

Conseil général de l'agriculture, de l'alimentation
et des espaces ruraux (CGAAER)



Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui
à la Prévision des Inondations (SCHAPI)

Protection contre les crues du secteur Tarascon Arles

Rapport hydraulique

Gérard DEGOUTTE
Ingénieur général du GREF
Membre du CGAAER

Réginald SARRALDE
Ingénieur des travaux publics de l'Etat
SCHAPI



Le contexte de la mission est décrit dans le rapport d'inspection du CGEDD dont le présent rapport constitue le volet technique. Il concerne les actions prévues pour la protection contre les crues du secteur compris entre Tarascon - Beaucaire au nord et Arles - Fourques au sud. Il s'intéresse plus particulièrement à la rive gauche avec le confortement du remblai RFF et le projet de barreau de protection nord d'Arles. Il s'intéresse aussi au devenir des eaux en cas de brèche ou de déversement au niveau de la voie RFF, ce qui concerne tout le secteur du Grand-Trébon, des anciens marais d'Arles et des Baux et de la zone tertiaire de Fourchon. Les actions correspondantes sont prévues dans le cadre du pré-schéma sud établi en 2006. À l'initiative de la ville de Tarascon, un projet de canal reliant le Petit Rhône au Grand Rhône pour contourner Arles a été envisagé en 2007. Il constitue un projet complémentaire ou une variante à certaines actions du pré-schéma sud. Ce rapport a bénéficié de la relecture de Jean-Michel TANGUY directeur du SCHAPI au démarrage de la mission, ainsi que de celle de Philippe QUÉVREMONT et François GÉRARD du CGEDD.

16 décembre 2008

SOMMAIRE

0 - Problématique générale d'une vallée endiguée	3
1 - Fonctionnement du secteur rive gauche du Rhône en aval de Tarascon (Grand Trébon, Vigueirat, Fourchon)	4
1.1 - Les deux cours d'eau de la plaine	4
1.2 - Les autres ouvrages surélevés	5
1.3 - Un découpage de la vallée gauche du Rhône en casiers	7
2 - Les références de débits de crue à Beaucaire	9
3 - La crue de décembre 2003	11
4 - Modélisations hydrauliques en aval de Beaucaire	14
4.1 - Historique des études	14
4.2 - Principes de modélisation retenus.....	14
4.3 - Présentation des principaux modèles utilisés.....	15
4.4 - Avis sur les différentes phases de modélisation	22
5 - Actions prévues au pré-schéma sud entre Tarascon et Arles	23
6 - Étude de calage ; confortement de la voie RFF	25
6.1 - L'étude de calage	25
6.2 - Sécurisation du remblai RFF	32
6.3 - Maîtrise d'ouvrage pour le confortement du remblai RFF	35
7 - Protection des quartiers nord d'Arles	37
7.1 - Principe de la protection par ajout d'un « barreau ».....	37
7.2 - Situation actuelle (2008, barreau non réalisé).....	39
7.3 - Avec barreau seul.....	40
7.4 - Avec protection nord d'Arles, et ouvrage de transfert sur Vigueirat.....	41
7.5 - Avec protection nord d'Arles, sans transfert sur Vigueirat	42
8 - Protection de Fourchon	48
9 - Protection sud de Tarascon	50
10 - Projet de canal de contournement d'Arles	51
10.1 - Comment est née l'idée d'un canal de contournement ?	51
10.2 - La modélisation numérique du canal de contournement	52
10.3 - Le canal de contournement : une solution intéressante ?.....	59
10.4 - Aspect géomorphologique	62
10.5 - La dérivation des eaux vers la Camargue	62
11 - Conclusions et recommandations. Résumé	64
Bibliographie	67

Photo de couverture : digue droite du Petit Rhône à Fourques en décembre 2003 (cliché Paul ROYET)

Nul n'ignore que la problématique des crues dans la région d'Arles est particulièrement complexe. On en verra les raisons, naturelles comme artificielles, la proximité des affluents torrentiels du Rhône, le goulet d'Arles, le verrou de Fourchon, la diffluence, les remblais ferroviaires ou de canaux... Tout ceci conduit à des études complexes et longues. C'est le mérite de l'État de les avoir entreprises dans l'EGR, le Plan Rhône et son volet du pré-schéma sud, puis du SYMADREM de les continuer pour passer d'un schéma à des projets d'aménagement. Notre rapport est donc nécessairement long. **Un résumé en est tenté au dernier chapitre (page 64).**

0 - Problématique générale d'une vallée endiguée

La présence d'un système d'endiguement continu sur le Rhône pour tout le secteur qui nous concerne, ainsi que sur le Grand Rhône et le Petit Rhône, met en jeu une problématique classique mais qu'il n'est pas inutile de rappeler en préambule.

Les digues fluviales sont une arme à double tranchant : elles protègent des terrains pour des crues faibles ou moyennes, mais elles les mettent en danger en cas de crues fortes ou extrêmes ou si elles sont en mauvais état. Leur rupture provoque alors dans le lit majeur une onde de crue plus brutale que celle qui se serait produite sans la digue. Les digues en terre, comme celles du Rhône, résistent particulièrement mal à la surverse. Elles peuvent aussi périr avant même de surverser, selon divers mécanismes d'érosion interne, d'affouillement au pied de berge ou de glissement.

Jusqu'à quand une digue résiste-t-elle ?

Une digue correctement conçue, construite et entretenue résiste jusqu'à ce que l'eau atteigne ce qu'on appelle la « cote de danger de rupture ». À un ou quelques cm près, il s'agit en pratique de la cote de la crête de la digue, ou plus précisément de la cote des points bas de cette crête. Mais quand une digue ne satisfait pas aux trois conditions de bonne conception, bonne construction et bon entretien, elle peut périr par érosion interne, même pour des cotes d'eau inférieures à sa crête. Les exemples sont nombreux. L'ennui, c'est qu'il est facile de prédire qu'une digue, même correctement réalisée, se rompra peu après le début de surverse ; mais il n'est pas possible de dire pour quel niveau d'eau une digue non correctement réalisée se rompra ; il est de plus difficile de dire où. Plus encore, une digue non correctement construite pourra résister à un certain événement, par exemple la crue de 2003, mais s'étant alors affaiblie, elle pourra très bien ne pas résister à une crue arrivant à la même cote, voire même à une cote inférieure. Ce dernier point n'est pas forcément bien connu de toutes les personnes concernées. A contrario, une digue correctement conçue, réalisée et entretenue pourra résister à tous les types de désordre sauf évidemment à celui provoqué par une surverse. C'est-à-dire qu'elle pourra être considérée comme sûre tant que la crue n'atteint pas ce que nous appelons plus bas la crue de danger de rupture.

Une première conclusion, non spécifique au Rhône : lorsque des enjeux importants dépendent de digues, les personnes doivent être clairement informées de leur situation précaire et des plans communaux de sauvegarde doivent être réalisés. Lorsque les enjeux sont particulièrement importants, il est urgent de conforter les digues, ou de protéger ces enjeux par d'autres méthodes, si cela s'avère plus avantageux ou plus rapide.

La formation d'une brèche peut-elle être un bien ?

Les brèches qui se produisent, par surverse, ou tout autre mécanisme, dérivent une partie de l'eau du lit mineur endigué et le soulagent. Cela conduit souvent à penser que les brèches ont donc des conséquences positives en aval et évitent d'autres brèches. Est-ce toujours vrai ? Cela conduit aussi à penser que l'abaissement du niveau de l'eau au droit de la brèche agit en amont par effet de remous, en « tirant » la ligne d'eau vers le bas. Est-ce toujours vrai ?

En aval d'une brèche qui vient de se produire, le lit endigué propage un hydrogramme de crue obtenu par différence entre l'hydrogramme amont et celui qui est dérivé vers le lit majeur au travers de la brèche. Lorsque les pointes de ces deux hydrogrammes sont relativement simultanées, le

bénéfice est réel car la pointe de crue à l'aval de la brèche est diminuée. Lorsque les crues sont rapides, ce bénéfice n'est pas garanti. En effet, la digue peut résister à la surverse pendant quelques minutes à quelques heures, et la brèche peut très bien survenir alors que la montée de crue est déjà terminée. Cette circonstance a clairement été mise en évidence sur le Vidourle après la crue de septembre 2002. Peu importe que cela ait aussi été ou non le cas pour les deux brèches du Petit Rhône en décembre 2003, nous voulons simplement rappeler que l'on ne peut pas escompter à l'avance qu'une brèche aura un réel bénéfice à son aval.

Vers l'amont, l'effet hydraulique est d'une toute autre nature. Une brèche, tant qu'elle débite, induit un abaissement de la ligne d'eau par effet de remous. Cela peut constituer un avantage local, par exemple en arrêtant un débordement qui aurait commencé. Mais cela est rarement déterminant sur de longues distances, car peu à peu l'effet des pertes de charges tout au long du cours d'eau « dilue » le bénéfice de l'abaissement aval.

Cote de protection et cote de danger de rupture.

Nous parlons de la cote de l'eau dans la rivière au droit du tronçon de digue considéré. Commençons par parler d'une digue correctement réalisée. Nous avons déjà défini la « cote de danger de rupture », celle au-delà de laquelle on ne garantit plus la tenue de la digue : c'est la cote de la crête de la digue (ou du point le plus bas de son profil, sauf s'il est aménagé pour être résistant à la surverse). La « cote de protection » est la cote à partir de laquelle les lieux à protéger commencent à être inondés en dépit de la présence de la digue. Dans les aménagements conçus dans un but de protection, on réalise des tronçons de digue aptes à résister au déversement qui permettent d'inonder la plaine lentement quand il n'est plus possible de l'éviter et de diminuer le risque d'érosion par surverse. Il y a alors une marge importante entre ces deux cotes. Mais dans le cas du Rhône, et dans bien d'autres cas de digues anciennes, il n'y a aucune marge : vu l'absence de digue apte au déversement, ces deux cotes sont identiques, la protection des personnes cesse exactement au moment où la digue est en danger de rupture. Cette circonstance fort dangereuse résulte souvent d'un aménagement non voulu : les maisons sont arrivées après la digue.

Mais si la digue n'est pas correctement réalisée, c'est encore pire, elle risque de se rompre pour des niveaux de crue inférieurs à la cote de la crête. Cote de protection et cote de danger sont encore identiques, mais en plus c'est une cote que l'on ne connaît pas.

La crue de danger de rupture est une crue amenant le niveau de l'eau dans la rivière à la cote de danger de rupture. On trouve en France des cas très variables où cette crue peut être moins que décennale ou plus que centennale.

1 - Fonctionnement du secteur rive gauche du Rhône en aval de Tarascon (Grand Trébon, Vigueirat, Fourchon)

La plaine de rive gauche du Rhône en aval de Tarascon a un fonctionnement hydraulique déjà complexe en l'absence de crue, bien plus encore quand le Rhône s'en mêle. Il y a deux petits cours d'eau venant de la Crau, le Vigueirat et le canal de la vallée des Baux, il y a de nombreux remblais (routes, voie ferrée, canaux) barrant les écoulements. Il y a surtout en aval de tout ça un verrou naturel à Fourchon qui crée à son amont une cuvette marécageuse, en grande partie assainie maintenant.

1.1 - Les deux cours d'eau de la plaine

En aval de Tarascon et jusqu'à la mer, la vallée naturelle (avant tous les aménagements) est barrée transversalement par un ensemble composé du relief de la costière de Crau, de l'affleurement

calcaire où s'est construite la ville antique d'Arles¹ et du col qui les rejoint, baptisé « verrou de Fourchon ». En amont de ce verrou, la vallée reçoit deux petits cours d'eau qui ont bien du mal à rejoindre le Rhône ou la mer ; ce sont le Vigueirat issu du nord des Alpilles et le canal de la vallée des Baux issu du sud des Alpilles. Ces deux émissaires, avant les aménagements, se perdaient dans les marais d'Arles et des Baux. Lors des crues du Rhône non encore endigué, ces marais se remplissaient et pouvaient (supposons-nous) déborder par-dessus le verrou de Fourchon, et s'étaler alors vers d'autres marais situés plus au sud d'Arles (Meyranne) et qui nous concernent moins.

Le bassin versant du Vigueirat représente 193 km². Il s'évacue par le **Vigueirat** (souvent appelé à tort canal du Vigueirat²) qui traverse le col de Fourchon puis rejoint le port de Fos. Il a dû être fortement endigué (depuis le lieu-dit Saint-Gabriel) pour que son écoulement traverse gravitairement le verrou de Fourchon. Du fait des digues, les parcelles riveraines ne peuvent pas être assainies vers le Vigueirat. Ce cours d'eau modeste qui ne devait pas souvent envoyer des eaux vers la mer est en fait devenu un petit fleuve.

Le Vigueirat voit les débits de son bassin versant plafonnés à environ 35 m³/s par les ponts de la RD33 à St-Gabriel qui se mettent en charge dès 30 m³/s. Ainsi les débits du bassin versant du Vigueirat se partagent en crue entre son lit endigué et la plaine du Grand-Trébon. En outre, sa capacité étant par endroit largement inférieure à 35 m³/s dans la partie endiguée, il peut déborder, comme en 2003 à Fort d'Herval sur sa rive gauche (vers les marais d'Arles).

Le bassin versant du canal de la vallée des Baux est légèrement plus grand, avec 220 km². Pour assainir et cultiver les vastes marécages d'Arles et des Baux, ainsi que la plaine rive gauche du Vigueirat, des réseaux de fossés ont été creusés. Tous ces fossés rejoignent par pompage le **canal de la vallée des Baux** qui se jette dans le canal de navigation d'Arles à Fos après avoir entaillé le col de Fourchon et après être passé en siphon sous le Vigueirat.³

1.2 - Les autres ouvrages surélevés

D'autres ouvrages surélevés peuvent jouer un rôle important lors des grandes inondations. Ce rôle est toujours aggravant à l'amont par effet de rehausse de la ligne d'eau ; il est au contraire favorable à l'aval par effet de laminage de crue (stockage transitoire d'un volume d'eau) ; mais ce rôle positif peut s'inverser en cas de rupture.

Ces remblais qui traversent le lit majeur sont le canal des Alpines, la roubine du Roy, le canal de Craponne, la voie ferrée RFF et plusieurs routes. Voir figure 1.

Le **canal d'irrigation des Alpines**, situé au nord du Trébon, dérive des eaux de la Durance et se termine dans le Rhône. Son débit est totalement maîtrisé et ce canal ne joue un rôle sur les inondations que du fait qu'il est surélevé.

La **roubine du Roy**, située au cœur de la ville d'Arles, joue le rôle d'une décharge des eaux du Vigueirat vers le Grand Rhône, du moins si le Rhône n'est pas, ou plus, en crue. Elle est fortement endiguée entre le Vigueirat et la voie ferrée.

Deux ouvrages surélevés anciens ne sont cités que pour mémoire car ils sont transparents⁴ vis-à-vis des inondations :

¹ Cet affleurement en calcaire du Hauterivien culmine aux alentours de 15 m NGF alors que toute la plaine est entre 2 et 6 m NGF.

² Le Vigueirat n'est absolument pas un canal. C'est une rivière endiguée, tout comme le Rhône, la Loire, le Vidourle... qui ne sont pas qualifiés de canaux.

³ En fait, nous n'avons pas voulu compliquer encore plus en signalant que le canal de la vallée des Baux a le mauvais goût de changer de nom pour devenir le « tronc commun » une fois reçu le « canal de vidange » qui draine le casier des marais d'Arles.

⁴ « Transparent » : qui n'aggrave pas les inondations car ne surélève pas la ligne d'eau à l'amont, même en crue.

- le **canal de Craponne** est ici un aqueduc (maçonné) dont, de surcroît, de longs tronçons ont été supprimés par les travaux routiers récents ;
- la **voie ferrée Tarascon Marseille** passe (ici) sur de très grands viaducs.

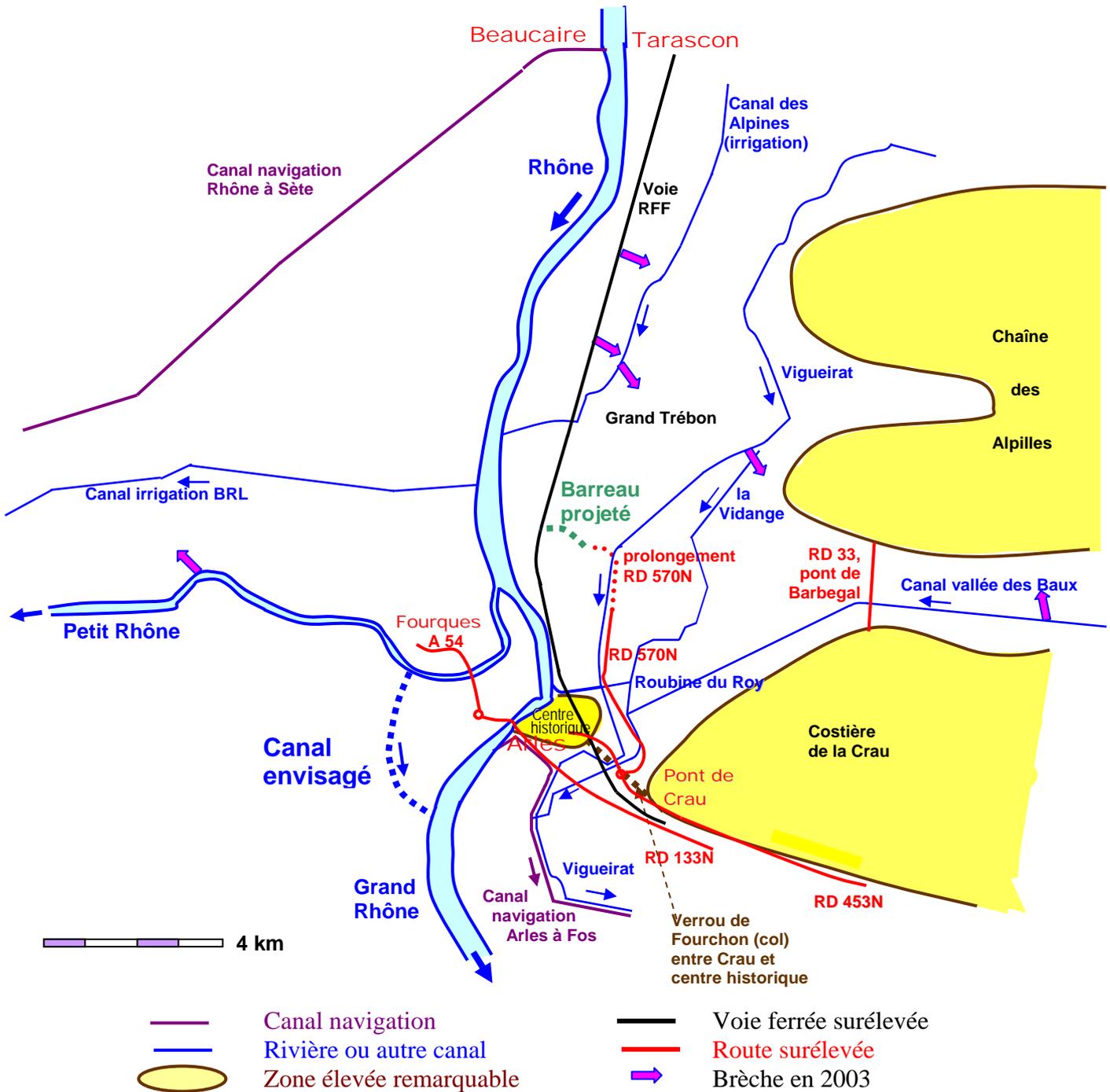


Figure 1 - schéma général du secteur Arles Tarascon

Les remblais plus récents ne sont transparents que jusqu'à une certaine limite :

- le plus en aval est la **voie rapide RD 133^N** qui constitue la limite aval de la zone de Fourchon ;
- la **RD 453^N de Saint Martin de Crau à Arles** qui longe le canal de Craponne est le remblai le plus haut qui surélève le verrou de Fourchon ; malgré la présence des deux ponts (Vigueirat et canal de la vallée des Baux), cette route peut faire barrage aux écoulements qui proviendraient du nord, jusqu'à une certaine limite ;

- la **RD 570^N (rocade périphérique à l'est d'Arles)** rejoint cette RD 453^N au niveau d'un grand rond-point ; c'est sa prolongation au nord -baptisée barreau- qui est appelée à jouer un rôle dans le cadre de la protection nord d'Arles contre les crues.

1.3 - Un découpage de la vallée gauche du Rhône en casiers

Divers remblais cités plus haut barrent la vallée de rive gauche, et tendent à s'opposer aux débordements du Rhône. Ils créent des casiers de fait. Nous appelons casiers de grands espaces du lit majeur dans lesquels des débordements peuvent se produire à la faveur des crues ; ils sont limités côté fleuve et côté aval par des digues ou des remblais ; côté amont et côté coteau, ils se referment naturellement sur le relief ou sont aussi limités par des digues ou remblai divers. En cas de venue d'eau par l'amont, ces casiers ont un rôle favorable d'écrêtement des crues, et quand leur contenance est dépassée, ils déversent (brutalement s'il y a une brèche) dans le casier aval et ainsi de suite. Selon l'importance des débordements, un casier est sollicité, ou deux, ou trois... Bien sûr, aucun casier n'est sollicité par le Rhône si la voie ferrée ne connaît pas de désordre ou si elle n'est pas dépassée. Mais les casiers peuvent éventuellement être sollicités aussi par les eaux des bassins versants locaux (Vigueirat, vallée des Baux), sans parler de la pluie qui tombe directement.

Casier des Alpines. Le premier casier, en partant de Tarascon, est celui délimité à son aval par le canal des Alpines, en fait par la digue côté droit de ce canal (figures 1 et 2). C'est un canal d'irrigation dont la prise est en Durance. Le casier des Alpines a été sollicité en décembre 2003 par les flots qui se sont échappés de deux trémies sous la voie ferrée (trémie des Ségonnaux, trémie du mas de Teissier). Ce casier ne dispose pas de système de ressuyage. En décembre 2003, une brèche a été volontairement pratiquée pour éviter que le remous amont ne vienne inonder par l'aval les quartiers sud de Tarascon. Les eaux ainsi libérées se sont déversées dans le casier du Trébon, mais sans intervention humaine, une brèche se serait vraisemblablement produite. Ce casier a une petite superficie (4 km²) et n'écrête que modérément les crues. Le canal des Alpines n'ajoute pas de débit car il suffit de fermer les vannes d'entrée.

Casier de Grand Trébon - Monplaisir. Ce casier est situé environ 3 m en contrebas du casier des Alpines et couvre une grande superficie, 27 km². Sa limite aval est formée à l'est par la digue de rive droite du Vigueirat et au sud par la digue de rive droite de la roubine du Roy (figure 1). La roubine du Roy a évité en décembre 2003 l'inondation par le nord du quartier de Griffeuille et plus au sud de celui de Genouillade.

Ce casier est ressuyé par un contre-fossé qui longe la digue droite du Vigueirat. Ce fossé aurait bien du mal à traverser la ville d'Arles du nord au sud et il a fallu le faire passer sous le Vigueirat par les deux siphons de Flèche et de Quenin. Les deux roubines de Flèche et de Quenin rejoignent un grand fossé d'assainissement appelé « la Vidange ». La Vidange rejoint ensuite le canal de la vallée des Baux (figure 1).

En 2003, ce système de ressuyage s'est avéré insuffisant pour évacuer toutes les eaux stockées dans le casier de Grand Trébon - Monplaisir, d'autant que le siphon de Quenin s'est obstrué. Il a fallu aménager en urgence des passages busés sous la digue nord de la roubine du Roy afin de vidanger le casier vers le Grand Rhône une fois qu'il avait amorcé sa décrue.

Le barreau projeté pour protéger Arles coupera ce casier en deux parties : au nord le casier du Grand Trébon, au sud la zone urbaine de Monplaisir qui sera protégée et donc « sortie » du casier.

Casier des anciens marais d'Arles et des Baux. Ce casier de 36,6 km² est limité au sud par le verrou naturel de Fourchon et par la route RD 453^N qui le surélève. En l'absence d'arrivée d'eaux provenant du Rhône ou du Vigueirat, et s'il pleut très fort sur son bassin propre, l'écoulement se fait bien entendu de l'amont vers l'aval, c'est-à-dire de l'est vers l'ouest : le marais des Baux se remplit avant celui d'Arles. Mais, en cas d'arrivée d'eaux extérieures, venant soit du Rhône par trop plein du casier du Trébon, soit du Vigueirat par déversement sur sa digue sud ou par brèche, ce casier peut fonctionner à l'envers : il est envahi par l'aval, et l'écoulement remonte le canal de la vallée des Baux vers l'amont. Cela s'est produit en 2003 suite à la brèche de la digue gauche du Vigueirat à Fort Hébral. La séparation hydraulique entre le marais d'Arles (21,6 km²) et celui des Baux (15 km²) est faite par la RD 33 à Barbegal qui se comporte comme un barrage à pertuis ouvert dans les deux sens (figure 1). **En 2003, le casier des marais ne s'est pas complètement rempli et n'a pas déversé sur le verrou de Fourchon (fort heureusement, car cela aurait inondé toute la zone tertiaire de Fourchon).** Cf. figure 2. Mais cela pourrait se produire en cas de crue encore plus forte, ou bien même en cas de crue plus faible et de grosse brèche dans la voie ferrée.

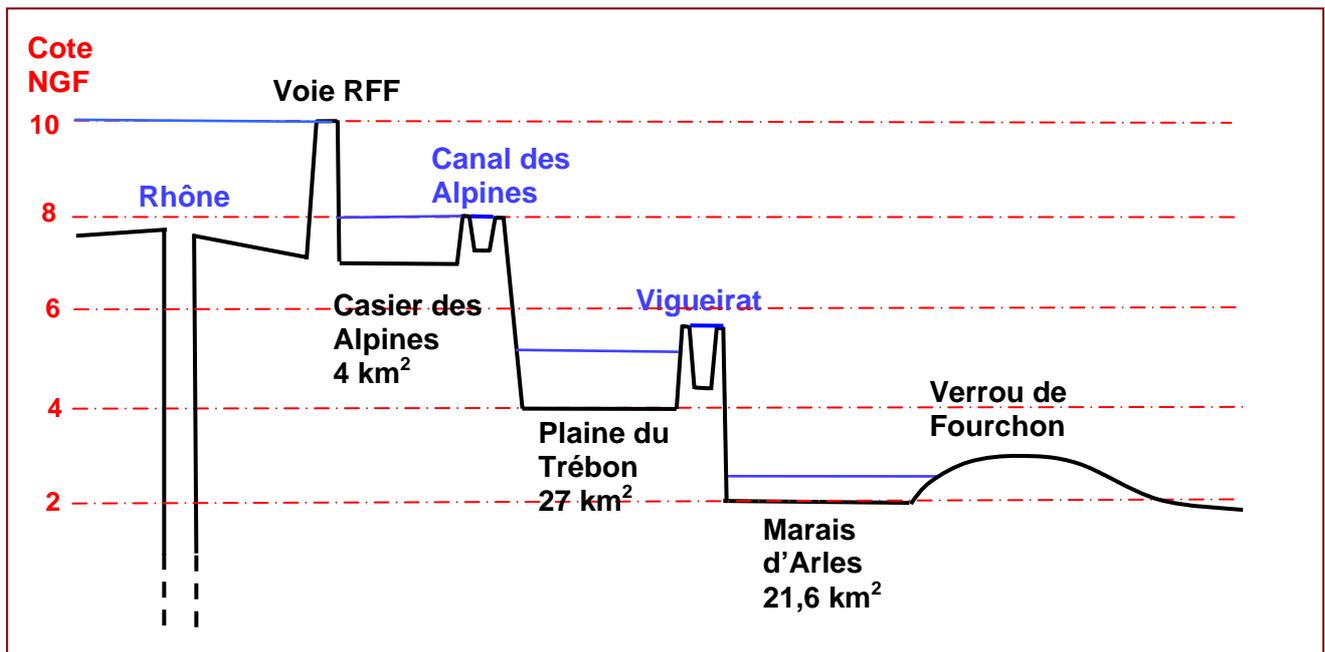


Figure 2 - section schématique de la vallée du Rhône rive gauche, sud de Tarascon (sens des débordements amont aval). Les niveaux d'eau (en bleu) sont ceux observés en 2003.

2 - Les références de débits de crue à Beaucaire

Nous résumons ici les valeurs de débits de pointe à la station de référence de Beaucaire des crues historiques, en les comparant aux débits de pointe de différentes périodes de retour obtenus par ajustement statistique (loi de Gumbel). Un débat avait eu lieu pour estimer la valeur du débit maximum observé en décembre 2003. Il a été tranché en 2005 par une conférence de consensus, dont nous admettons les conclusions [13]⁵. Cette conférence avait aussi validé les ajustements fréquentiels

- Ajustements (source EGR à partir des données 1920-2000) :
 - Q1000 = 14 160 m³/s
 - Q500 = 13 300 m³/s
 - Q100 = 11 300 m³/s
 - Q10 = 8 400 m³/s
- Crues historiques :
 - novembre 1840 : 13 000 m³/s (d'après Pardé)
 - mai 1856 : 12 500 m³/s (d'après Pardé) ; cf. hydrogramme noir de la figure 3 ;
 - octobre 1993 : de l'ordre de 9 500 m³/s
 - janvier 1994 : de l'ordre de 10 500 m³/s (11 000 ± 10 % selon CNR, 10 000 ± 10 % selon D. Duband) ; cf. hydrogramme vert ;
 - décembre 2003 : 11 500 m³/s ± 5 % selon conférence de consensus [13] ; cf. hydrogramme rouge ;

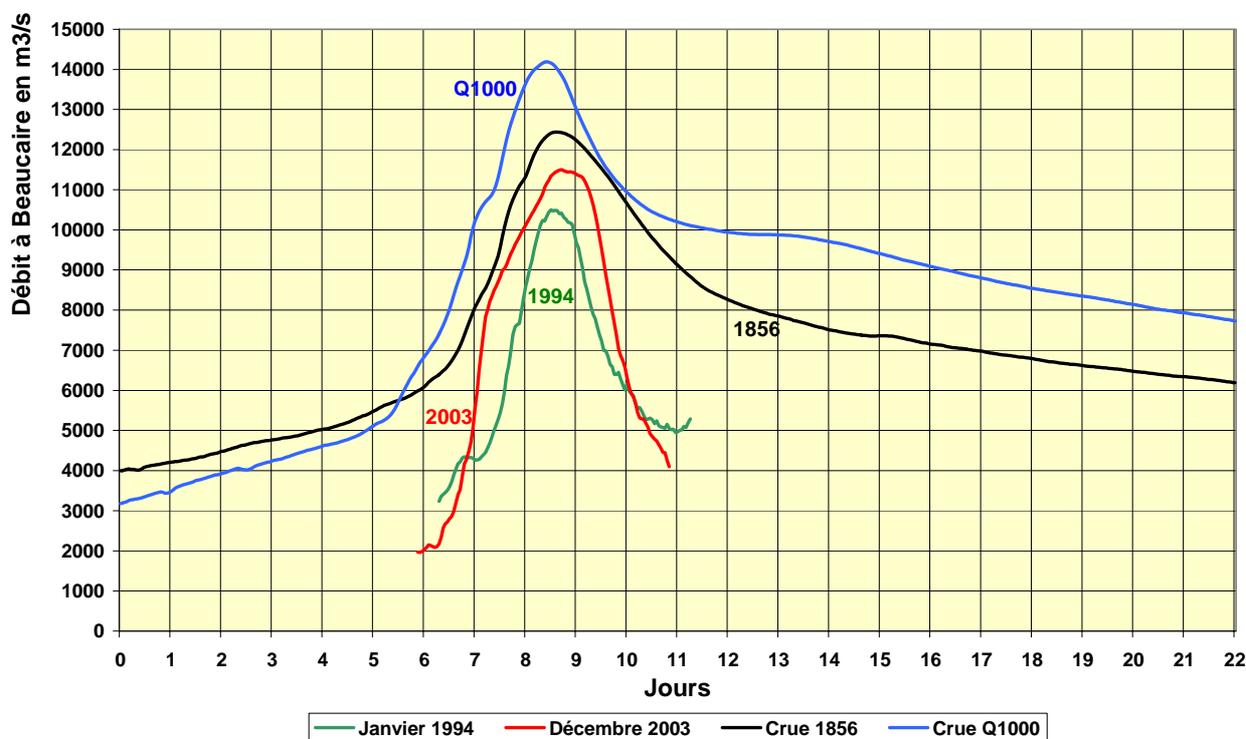


Figure 3 - hydrogrammes de crues historiques ou de crues de référence à Beaucaire

⁵ Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie en fin de rapport.

Si l'on raisonne sur le débit de pointe (et non sur le volume), la crue de 2003 est un peu plus que centennale ; celle de 1840 serait environ cinq-centennale et celle de 1856 serait entre centennale et cinq-centennale. Il n'est pas utile de chercher à donner une période de retour précise à ces crues historiques du XIXe siècle pour trois raisons :

- le climat était différent : en 1840 et 1856, c'était la fin du petit âge glaciaire ;
- le Rhône en amont de Beaucaire a été très fortement aménagé depuis ;
- les estimations de débit de cette époque sont entachées d'une grande incertitude, d'autant que des brèches lors de ces crues ont dérivé et retardé une partie des débits.

Par la suite, la crue de 1856 sera baptisée crue de référence.

3 - La crue de décembre 2003

La crue de décembre 2003 fut la plus forte connue depuis 1856. Elle a provoqué deux grosses brèches sur le Petit-Rhône au Mas d'Argence et à Claire-Farine. En amont d'Arles, le remblai RFF et la digue de rive droite étaient en limite de débordement. Voir photo de couverture. Les passages routiers sous la voie ferrée, appelés trémies, sont fermés côté Rhône par des cavaliers (ou digues) en terre en forme de bec de canard (photo 1). Ces cavaliers et la voie ferrée elle-même forment une ligne de défense continue contre les crues du Rhône de Tarascon à Arles, mais les cavaliers constituent des points bas. Ils sont sensiblement calés à la cote de la plateforme ferroviaire, c'est-à-dire au niveau de la base du ballast. Les dos d'âne des routes sont presque à la même cote (entre 0 et 20 cm plus bas), mais de toutes façons, ils ont été fermés par des cordons de terre ou des sacs posés pendant la crue par des riverains. De son côté, RFF tentait de limiter les surverses sur les cavaliers en faisant poser des sacs de sable par hélicoptère. Le 3 décembre au soir, les cavaliers des deux trémies des Ségonnaux et du mas Tessier ont déversé et se sont rompus par l'érosion provoquée par la surverse, celle-ci se concentrant sur des points bas. Ces cavaliers étaient aussi affaiblis par des circulations d'eau internes, déjà révélées par la crue de 1994 et traitées par injection. Pendant la crue de 2003 et avant formation des brèches, on a observé des écoulements d'eau claire au pied des cavaliers de la trémie de mas de Teissier. À la trémie des Ségonnaux, on a observé un écoulement d'eau chargée et un début de glissement du cavalier nord [11]. Le soir, la SNCF déversait des blocs dans la trémie à partir d'un train spécial pour tenter de l'obstruer.



Photo 1 - Trémie du mas Tessier le 3/12/2003.

Côté Rhône en haut de la photo, côté casier des Alpines en bas. Deux brèches sont en cours de formation sur le cavalier en forme de bec de canard. Elles débitent environ 100 m³/s. La section du pont routier contrôle l'écoulement. Par effet de remous, elle provoque l'enneigement par l'aval de la section déversante et évite ainsi l'approfondissement des brèches.

La crue de 2003 a tangé le niveau de la plateforme, sans dépasser le niveau inférieur des rails. Des témoignages indiquent effectivement des infiltrations à travers le ballast. Le remblai a donc

déversé par écoulement au travers du ballast [11]. Celui-ci n'a pas été emporté du fait du faible gradient hydraulique auquel il était soumis (grande largeur de la plateforme). Le remblai limoneux sous le ballast a pu résister à ces surverses grâce à la carapace constituée par les pierres concassées du ballast qui ont « imprégné » le haut du remblai. En tout état de cause, la tenue du remblai RFF pendant la crue de 2003 était limite.

Sans les brèches des trémies, la ligne d'eau du Rhône aurait été plus haute de 10 à 15 cm et aurait entraîné une plus forte sollicitation du ballast. Peut-être des brèches se seraient-elles produites dans la voie ferrée elle-même. N'étant pas contrôlées à leur aval, ces brèches auraient pu se développer jusqu'à la base du remblai ferroviaire, libérant alors des débits et des volumes sans commune mesure avec ceux qui ont été libérés en fait.

Le débit maximum qui a transité par les trémies est estimé à 200 m³/s environ (entre 170 et 240⁶). Elles ont évacué un volume de 15,4 hm³ qui s'est ajouté à celui (1,3 hm³) provenant du Vigueirat⁷ pour stocker 16,7 hm³ dans la plaine du Grand-Trébon et dans le casier délimité par le canal des Alpines [11]. Le volume ainsi déversé via les trémies ne représente que 0,45 % du volume de la crue du Rhône. Le canal du Vigueirat voit arriver 45 m³/s de son propre bassin versant, mais en aval de Saint-Gabriel il est endigué et sa capacité est limitée à 35 m³/s, provoquant un déversement de 10 m³/s sur sa berge droite, c'est à dire dans la plaine du Grand-Trébon. La digue opposée cède au milieu de la journée du 4/12 au fort d'Herval (en face Fontvieille), contribuant à remplir le casier des marais d'Arles et des Baux, et cessant la contribution du Vigueirat au remplissage du casier du Grand Trébon-Monplaisir.

La plaine d'inondation de rive gauche du Rhône est en fait un véritable escalier en quatre marches, dont les trois premières ont été franchies en décembre 2003 (figure 2) :

- le lit endigué du Rhône limité par le remblai ferroviaire avec un niveau d'eau maximal entre 11 et 9 m en 2003 ;
- le casier du canal des Alpines, limité par les digues de ce canal, avec de l'eau à la cote 8 m ;
- la plaine du Grand Trébon-Monplaisir, limitée à l'est par les digues du canal du Vigueirat et au sud par la roubine du Roy, avec de l'eau à la cote 5,2 m en 2003 ;
- le marais d'Arles et le marais des Baux (limités au nord par les contreforts des Alpilles et au sud par la costière de la Crau et le verrou de Fourchon) où le niveau de l'eau est de 2 à 3 m, ces eaux provenant quasi exclusivement de la vallée des Baux et de celle du Vigueirat (plus les eaux du Rhône provenant des deux siphons sous le Vigueirat). Le marais des Baux a été inondé dans un premier temps par son propre bassin versant. Ce canal est en relief et les canaux de drainage du marais rejoignent le canal principal par pompage. Les pompes se sont noyées lors de l'inondation et les marais se sont remplis puis ont déversé dans le canal par surverse sur ses digues qui se sont endommagées. Dans un second temps, ce canal a été alimenté « à l'envers » par l'eau provenant du Rhône via le marais d'Arles. La RD 33 (de Fontvieille à Raphèle) fait barrage et a limité cette intrusion par l'aval. Le siphon de Flèche s'effondre le 5/12 en fin de matinée, limitant l'apport au casier des marais d'Arles et des Baux, et retardant la vidange du casier du Grand-Trébon-Monplaisir. Le Vigueirat après s'être partiellement délesté dans les deux marais poursuit son chemin au droit du quartier de Fourchon. Il l'épargne mais de justesse, et c'est heureux car ce quartier se serait retrouvé piégé par le remblai de la RD 453^N, voie rapide Arles-Salon. Seul un débordement ponctuel se produit à la station de pompage de pont de Crau.

Côté gardois, le Rhône n'a pas franchi ses digues, mais la marge était faible. Et même, il y a eu un début de surverse en rive droite du Rhône en amont de Fourques au niveau du point bas occasionné

⁶ Valeurs cohérentes avec l'estimation BCEOM de 243 m³/s, page 33 de l'étude d'impact du barreau.

⁷ Ainsi que les volumes provenant du canal des Alpines, négligeables car les vannes de tête de ce canal, au niveau de la Durance avaient été fermées dès le 3/12 au matin.

par une rampe d'accès à la piste de service. L'écoulement a été stoppé au plus fort de la crue par apports de matériaux en crête [9']. Voir aussi photo de couverture. Mais le Petit Rhône les a franchies en rive droite au Mas d'Argence et à Claire Farine. Sans ces brèches, il serait également sorti en rive droite au droit du pont suspendu de Fourques. L'inondation de la plaine a été très étendue, franchissant le canal BRL puis le canal de navigation du Rhône à Sète, venant ainsi aux abords de la ville de Bellegarde puis, ayant franchi l'A54, aux abords de Saint-Gilles. Par effet de remous, la zone inondée s'est rapprochée à l'est de la digue droite du Rhône aux environs de la prise BRL et de Saujean.

Au bilan, la **crue de décembre 2003** a été une crue-test montrant à la fois :

- que certaines protections en rive gauche étaient (malheureusement) dépassées, mais de peu (cavaliers des trémies, berge du canal des Alpines), d'où l'inondation de la plaine rurale du Grand-Trébon et du quartier de Monplaisir ;
- que le Petit Rhône endigué a débordé, côté gardois ;
- que d'autres protections des deux rives étaient à la limite d'être dépassées et donc de rompre : à droite digue entre Fourques et Beaucaire, à gauche remblai RFF, digue de la roubine du Roy, digues du Vigueirat, et qu'ainsi d'autres quartiers d'Arles (Griffeuille, Genouillade, Alyscamps, Fourchon, Trinquetaille) et la plaine de Beaucaire à Fourques, ont évité l'inondation de justesse ; le remblai du musée d'Arles antique (IRPA) était aussi en limite de débordement.

4 - Modélisations hydrauliques en aval de Beaucaire

4.1 - Historique des études

Les crues de 1993, 1994 et plus récemment de 2003 ont confirmé la nécessité d'une action concertée pour lutter contre les inondations du Rhône. Ainsi l'Etat et les Collectivités ont entrepris différentes phases d'études sur le Rhône et en particulier sur le secteur qui nous concerne (à l'aval de Beaucaire).

L'Etude Globale Rhône (EGR) portée par l'établissement public Territoire Rhône a permis de faire la synthèse des connaissances et de définir plusieurs pistes d'aménagement. Cette étude a été reprise dans le cadre du Plan Rhône (validé en 2006) qui fixe les grands principes d'aménagement et en prévoit les financements. Le plan Rhône a ensuite été décliné sur le secteur en aval de Tarascon dans un « Pré-schéma Sud » établi par la DIREN de Bassin.

Le Syndicat Mixte Interrégional d'Aménagement des Dignes du Delta du Rhône et de la Mer (SYMADREM) est maintenant le principal maître d'ouvrage des travaux de protection définis dans le pré-schéma Sud du Plan Rhône.

Nous nous intéresserons ici aux aspects hydrauliques de ces différentes études et présenterons plus particulièrement les modélisations numériques construites pour définir et étayer les différents scénarios d'aménagements contre les inondations.

4.2 - Principes de modélisation retenus

Les principales phases d'études, ont suivi un ordre logique : les premières étapes (EGR, Plan Rhône et pré-schéma Sud) avaient pour but de synthétiser les connaissances sur les inondations et leurs conséquences, d'établir les grands principes de lutte contre ces inondations et d'en évaluer la pertinence ; la deuxième phase (études du SYMADREM) consiste à étudier en détail les solutions d'aménagements répondant aux principes fixés.

Les solutions retenues pour la modélisation se sont inscrites dans cette logique : la première étape nécessitait l'établissement d'un modèle global permettant de simuler un grand nombre de scénarios ; la phase la plus récente avait pour sa part besoin d'un modèle plus détaillé permettant de dimensionner précisément les ouvrages.

Dès lors, les choix d'une modélisation monodimensionnelle pour la première phase, et d'une modélisation bidimensionnelle pour les études de projet n'appellent pas de remarque particulière.

Voici les deux différences principales entre ces deux types de modélisation.

➤ La modélisation monodimensionnelle (1D) simplifie la représentation de l'espace, en la réduisant à une seule dimension, et en moyennant dans cette dimension les différentes composantes des équations de l'hydraulique. Elle schématise les principaux axes d'écoulement : l'écoulement en lit mineur est ainsi considéré comme monodirectionnel. Ce type de modélisation suppose donc que l'on puisse négliger les vitesses des écoulements transversaux devant celles de l'écoulement principal. Dans les modèles 1D à casiers, le champ d'inondation est également décrit, sous la forme de « casiers » interconnectés qui représentent les différentes zones de stockage des volumes débordés dans le lit majeur. Ce type de modèle a l'avantage d'être robuste, plus facile à mettre en œuvre qu'un modèle 2D, et permet d'effectuer les simulations dans un temps de calcul réduit.

➤ La modélisation bidimensionnelle (2D) représente les écoulements en deux dimensions. Elle permet ainsi une modélisation plus détaillée, et en particulier dans les zones singulières (difffluence Grand Rhône-Petit Rhône, goulet d'Arles). Elle est plus adaptée pour décrire le champ des vitesses dans le lit majeur. Ces vitesses sont moyennées le long d'une verticale. La modélisation 2D nécessite un plus grand nombre de données d'entrée et entraîne des temps de calcul sans commune mesure avec ceux d'une modélisation 1D.

4.3 - Présentation des principaux modèles utilisés

Nous nous intéresserons ici uniquement aux modélisations mises en place pour étudier le Rhône et sa plaine à l'aval de Beaucaire.

4.3.1 - Le modèle 1D construit dans le cadre de l'Étude Globale Rhône

Objectifs de la modélisation

Ce modèle a été conçu par la société EGIS (anciennement BCEOM) pour le compte de l'établissement public Territoire Rhône. Il a été utilisé pour deux phases d'études distinctes: d'abord dans le cadre de l'EGR sur la base de crues de référence établies avant l'évènement de 2003, puis pour une étude complémentaire (2005) commandée par la DIREN de bassin pour l'établissement du pré-schéma sud du Plan Rhône. Enfin, il a été utilisé toujours par EGIS, mais pour le compte du SYMADREM pour étudier l'impact du barrage de protection nord d'Arles (voir chapitre 7).

La construction de ce modèle répondait aux objectifs suivants :

- afficher les risques d'inondation ;
- fournir des éléments d'aide à la décision pour une stratégie d'aménagement.

Les études ont ainsi suivi deux étapes :

- la connaissance de « l'état actuel », c'est-à-dire sans travaux d'aménagement. Les simulations ont ainsi permis d'évaluer les niveaux de protection offerts par les endiguements, ainsi que les conséquences éventuelles de différents scénarios (hypothèses de rupture des digues, type de crues, niveaux marins) ;
- la simulation de plusieurs types d'aménagement afin d'évaluer leurs bénéfices par rapport à la situation actuelle.

Description du modèle 1D à casiers

Le modèle a été construit à partir du logiciel STREAM, il s'agit d'un modèle 1D à casiers. Le secteur modélisé couvre environ 180 000 ha (en tenant compte des casiers) sur environ 60 km de Beaucaire à la mer (figure 4). La topographie et la bathymétrie ont été représentées à partir de profils établis tous les 100 à 500 m (selon les zones).

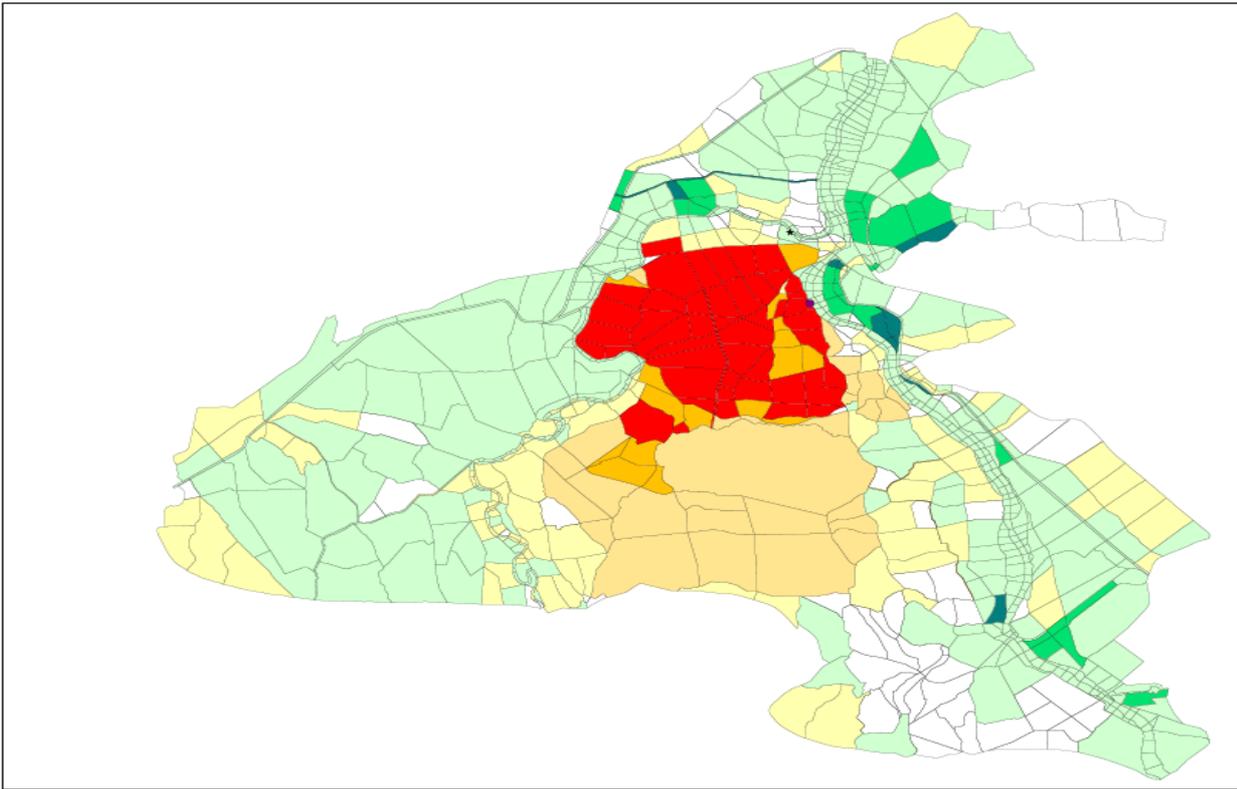


Figure 4 - emprise du modèle 1D à casiers (EGIS)

Source : schéma de prévention des inondations du Rhône à l'aval de Beaucaire ; modélisations complémentaires, BCEOM, juin 2005 [12]

Calage du modèle 1D à casiers

Le modèle, initié avant la crue de 2003, a été calé sur les crues de novembre 1994 (9 700 m³/s à Beaucaire) et de janvier 1995 (4 700 m³/s), en simulant différentes possibilités de brèches.

Ce calage (paramétrage du modèle) a ensuite été confronté aux mesures et aux étendues inondées (en simulant les brèches) pour les crues d'octobre 1993 (9 800 m³/s à Beaucaire) et de janvier 1994 (11 000 m³/s). Ces valeurs de débit doivent être revues légèrement à la baisse, pour être en cohérence avec la réévaluation du débit de décembre 2003 par la conférence de consensus [13], mais comme il en est de même pour la crue de calage de novembre 1994, le modèle est cohérent avant 2003.

Cet échantillon de crue représentait alors (avant la crue de 2003), les crues les plus importantes sur lesquelles des données suffisamment précises étaient disponibles.

Les différents scénarios étudiés

1. Scénarios de l'EGR

Pour la partie « connaissance de l'aléa » :

n° du scénario	Type de crue	Débit de pointe considéré	Niveau marin (en m NGF)
1	Crue 10 ans à fort volume	8 340 m ³ /s	0,6
2	Crue 50 ans	10 440 m ³ /s	0,6
3	Crue 100 ans de type cévenole (hydrogramme pointu)	10 890 m ³ /s	0,6
4	Crue 100 ans à fort volume	11 860 m ³ /s	0
5	Crue 100 ans à fort volume	11 860 m ³ /s	1,3
6	Crue 500 ans	13 300 m ³ /s	1,3
7	Crue 1000 ans	14 370 m ³ /s	0
8	Crue 1000 ans	14 370 m ³ /s	1,3

Toutes les simulations ont été faites en tenant compte de différentes hypothèses de brèches dans les digues. Les scénarios 4 et 6 ont également été simulés sans rupture.

Pour la simulation des aménagements :

Les crues de débits de pointe 11 860, 12 500 et 13 300 m³/s à Beaucaire ont été utilisées.

2. Scénarios du pré-schéma sud

Les crues de débits de pointe 11 860, 12 500, 13 300 et 14 370 m³/s à Beaucaire furent mises à profit pour :

- évaluer la capacité de protection des digues (dans leur configuration post-2003) et les débits éventuels débordés ;
- analyser les impacts de nouveaux aménagements.

3. Scénarios de l'étude du barreau par le SYMADREM

Les scénarios hydrologiques envisagés pour l'étude de la protection nord d'Arles [35] ont été choisis dans la logique de l'étude EGR en tenant compte de la crue 2003 survenue entre temps.

- ◆ la situation dite actuelle pour la crue de décembre 2003 (11 500 m³/s en pointe, niveau marin observé, soit 0,4 m en moyenne avec une pointe à 0,95 m ; deux brèches dans les cavaliers des trémies sous la voie RFF et deux sur le Petit Rhône côté Gard à Mas d'Argence et à Claire Farine) ;
- ◆ le scénario 6 de l'EGR correspond à une situation encore plus grave à tous points de vue : crue cinq-centennale (hydrogramme synthétique mono-fréquence) soit 13 300 m³/s, durée plus longue que la crue de 2003, + niveau marin à 1,3 m + grosse brèche au mas de Ranchier (au droit de la confluence au Rhône du canal des Alpines) sur le Rhône débitant 980 m³/s alors que les brèches 2003 avaient débité environ 200 m³/s (cf. chapitre 3) ; pas de brèches sur le Petit-Rhône ; ce scénario se décline en deux : brèches du Vigueirat s'il déverse ou confortement des digues du Vigueirat et ouvrage de transfert ;
- ◆ le scénario dit 750 du pré-schéma sud qui prend en compte une crue dite extrême, la crue millénaire de 14 160 m³/s en pointe (hydrogramme bleu), supposée provoquer un lâcher de 750 m³/s via le remblai RFF vers le Grand-Trébon et provoquant à son tour une rupture du Vigueirat au moment de la surverse maximale.

Si l'on se limite à l'examen de la situation en crue de la vallée rive gauche, du Trébon à Fourchon, l'importance de la crue du Rhône n'est pas un facteur prépondérant devant l'hypothèse de déversement ou de formation de la brèche. Le tableau ci-dessous résume les paramètres clé.

	Débit déversé depuis le Rhône	Volume déversé depuis le Rhône	Apports des BV Vigueirat et Baux
Scénario 2003	243 m ³ /s page 34	18,7 hm ³ page 44	40 hm ³
Scénario 6	984 m ³ /s page 47	200 hm ³ page 95	90 hm ³
Scénario 750	750 m ³ /s	90 hm ³	40 hm ³

Les numéros de page en petits caractères sont ceux de l'étude EGIS [35].

Il apparaît que le scénario 750, bien que sous-tendu par la crue du Rhône la plus forte, est moins pénalisant que le scénario 6.

Les tests de sensibilité réalisés

Le modèle 1D à casiers de l'EGR a été soumis à plusieurs tests de sensibilité afin d'évaluer les incertitudes à prendre en compte dans l'analyse des résultats des différentes simulations.

- L'influence du niveau marin sur les lignes d'eau. Les simulations effectuées ont permis de montrer que le niveau marin a beaucoup plus d'influence sur le Grand Rhône que sur le Petit Rhône. Son effet sur la ligne d'eau est négligeable en amont de la défluece.
- L'influence de la rugosité des lits (coefficient de Strickler). Ce coefficient a un impact important sur la ligne d'eau simulée. Une variation de l'ordre de 15 % (pour le lit mineur) fait varier d'environ 50 cm la ligne d'eau sur le Grand Rhône (légèrement moins entre Beaucaire et Arles) et de 30 à 40 cm celle du Petit Rhône (pour une hypothèse de débit à Beaucaire de 11 300 m³/s).
- La loi de répartition des débits entre le Petit et le Grand Rhône en fonction du débit à Beaucaire. Ce test a permis de mettre en évidence une relative constance de cette répartition (entre 11 et 13 % des débits sont dérivés vers le Petit Rhône).

4.3.2 - Le modèle 2D construit dans le cadre des projets du SYMADREM

Objectifs de la modélisation 2D

Afin d'évaluer l'incidence des différents travaux préconisés par le pré-schéma Sud, le SYMADREM a confié en 2008 à la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), une « étude de calage précis entre Beaucaire et Arles », qui doit se dérouler en quatre phases (collecte et analyse des données ; construction et calage du modèle ; calage des ouvrages déversants ; scénarios d'aménagement). À ce jour, la phase 3 est en cours de validation.

Pour ce faire, un nouveau modèle a été conçu pour :

- étudier plusieurs solutions d'aménagement en tenant compte du débit maximum acceptable en Arles ;
- proposer un calage précis des digues, cohérent avec les objectifs de protection du Plan Rhône.

Les étapes furent les mêmes que pour la modélisation 1D : 1- une simulation de l'état « initial » (avant aménagements) ; 2 - le test de plusieurs solutions d'aménagements.

Principes de la modélisation 2D du Rhône endigué

Le modèle mis au point par la CNR s'appuie sur le code de calcul TELEMAC. Il s'agit d'une modélisation bidimensionnelle aux éléments finis du lit mineur endigué. Cela sous-entend que si le modèle est capable d'évaluer les éventuels volumes débordés et les débits associés, il n'est pas prévu pour représenter les débordements hors du lit endigué.

Des études spécifiques, en cours ou en projet, seront ainsi nécessaires pour préciser les conséquences de ces débordements éventuels et prévoir, le cas échéant, les solutions appropriées pour les gérer. Ces études nécessiteront d'autres modèles, étroitement liés au modèle 2D « lit mineur » qui leur fournira des données d'entrée.

Ce choix de « modèles imbriqués » peut paraître complexe, mais est courant, du fait de la lourdeur de la constitution et du calage d'un modèle global 2D. Par ailleurs, les temps de calcul nécessaires à un tel modèle seraient extrêmement lourds (à titre d'exemple, la modélisation d'une situation par le modèle « lit mineur » nécessite déjà plus de 24 heures de calcul avec plusieurs ordinateurs en parallèle). Il permet aussi de raccourcir les délais d'étude, par recours à plusieurs cabinets d'ingénierie pouvant travailler simultanément.

La construction de deux (ou plusieurs) modèles pour représenter de façon séparée le lit mineur et le lit majeur repose toutefois sur une hypothèse qu'il faut au préalable vérifier : les conditions d'écoulement dans le lit majeur n'influent pas sur l'écoulement dans le lit mineur. Cette hypothèse est vérifiée à condition que :

- les débits circulant dans le lit majeur ne retournent pas dans le lit mineur (dans notre cas, la protection par des digues l'assure) ;
- les écoulements éventuels par-dessus les digues se fassent en condition dénoyée, c'est-à-dire que la charge hydraulique à l'aval de la digue n'influence pas la charge à l'amont (dans le lit mineur). Cette condition est vérifiée dans le cas présent, car le lit mineur du Rhône est à une altitude plus élevée que les plaines constituant le lit majeur (vallée en toit).

L'emprise du modèle (figure 5) s'étend depuis l'aval du barrage CNR de Vallabrègues (modélisation du Gardon et des plaines de Comps/Aramon/Montfrin et de Vallabrègues/Boulbon) jusqu'à la « mer » (le modèle s'arrête en fait un peu avant les embouchures sur le Petit et le Grand Rhône, faute de données bathymétriques disponibles).

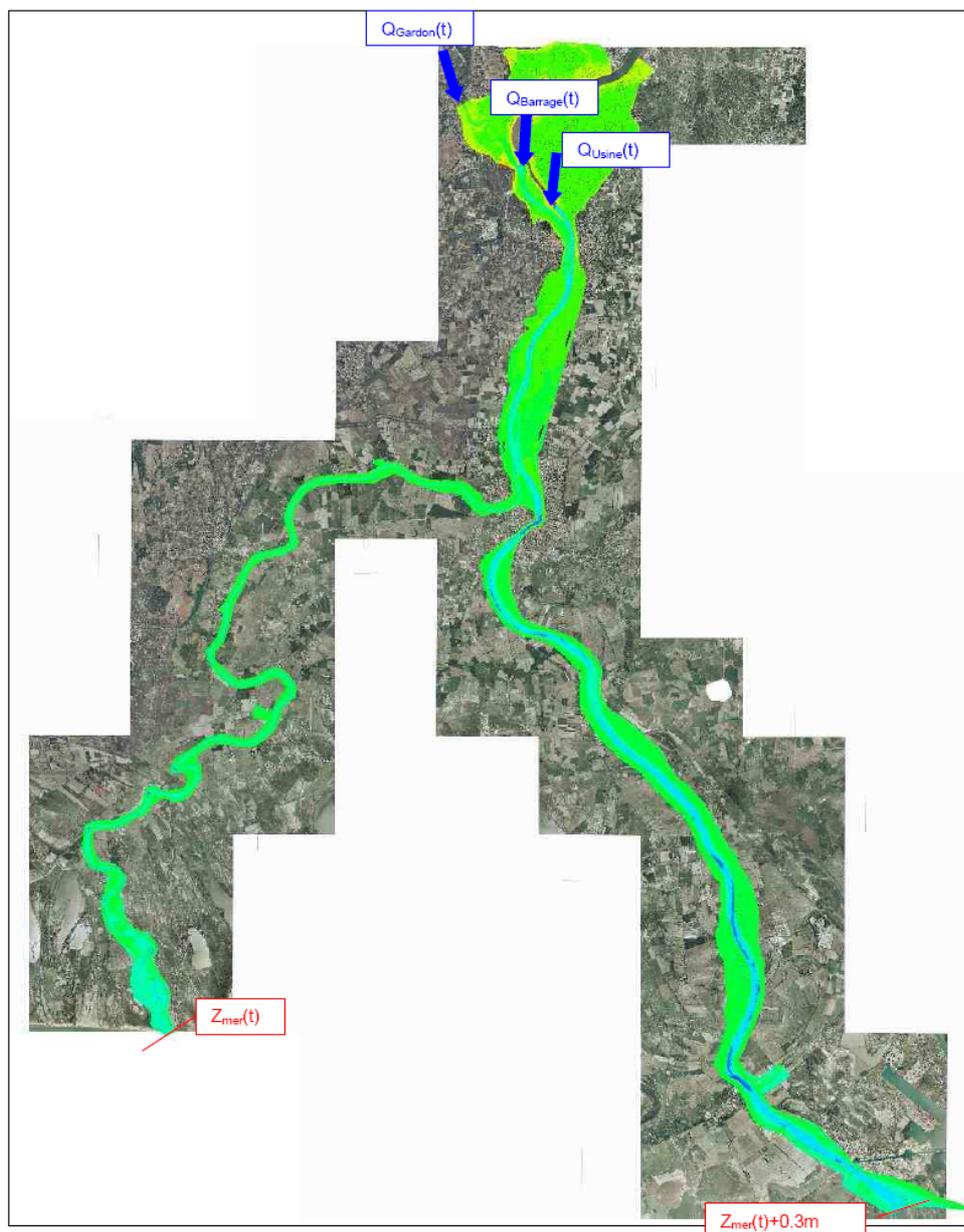


Figure 5 - emprise du modèle 2D (CNR)

Source : étude de calage précis entre Beaucaire et Arles / Rapport de phase 3 – CNR – Octobre 2008 [36]

Le maillage de ce domaine comporte 222 000 éléments, avec des tailles de maille entre 30 et 125 m.

Les données bathymétriques utilisées sont postérieures à la crue de 2003.

Les conditions aux limites sont représentées sur la figure 5. Il s'agit des débits sur le Gardon, à l'aval de l'usine de Beaucaire et au barrage de Vallabrègues et des cotes aux limites aval du modèle sur le Petit et le Grand Rhône (tenant compte de l'influence marine⁸).

⁸ ... ainsi que d'un décalage de cote de 30 cm pour le Grand Rhône pour compenser l'absence de données bathymétriques des 4 derniers kilomètres.

Calage du modèle 2D

Le modèle « lit mineur » a été calé en quatre sous-parties : Gardon-Beaucaire, Beaucaire-Arles, Grand Rhône et Petit Rhône.

Cette méthodologie de calage, consistant à caler les différents biefs indépendamment les uns des autres, a l'avantage de ne pas répercuter les incertitudes liées aux différentes données d'entrée et les approximations liées au calage d'un secteur sur les autres. Le calage d'un modèle « global » cumulerait les différentes incertitudes de l'aval vers l'amont.

Ce modèle a été calé sur la crue de 2003, en tenant compte des brèches des digues de rive droite du Petit Rhône à Claire Farine et au mas d'Argence. Si le calage n'a été possible que sur un seul évènement (faute de suffisamment de données sur les autres situations), on peut toutefois noter que la crue de 2003 a atteint des débits significatifs (durée de retour légèrement supérieure à 100 ans), en relation avec les problématiques étudiées.

Nous ne parlerons pas ici des valeurs des coefficients de Strickler retenues lors de la phase de calage. En effet, ce coefficient intègre plusieurs phénomènes physiques. Il représente ainsi plus un coefficient de calage qu'une véritable grandeur physique. Sa valeur numérique est donc difficile à évaluer de façon intrinsèque

Les différents scénarios étudiés par CNR

Les simulations effectuées supposent qu'il ne se forme pas de brèches, même si les digues sont submergées. Mais elles tiennent compte des débits déversés dans cette éventualité.

Les situations modélisées sont les suivantes (voir hydrogrammes à Beaucaire en figure 3) :

Type de crue	Débit maximum à Beaucaire	Niveau marin considéré (en m NGF)
Type janvier 1994	10 500 m ³ /s	1,3
Type décembre 2003	11 500 m ³ /s	0,98 (niveau maximum observé en 2003)
Crue de référence (1856)	12 500 m ³ /s	1,3
Crue exceptionnelle (Q1000)	14 160 m ³ /s	1,3

Les tests de sensibilité réalisés par CNR

Différents tests de sensibilité ont été réalisés, afin d'évaluer les incertitudes du modèle calé :

- ◆ sur les débits de pointe ; ainsi une variation de $\pm 5\%$ du débit à Beaucaire (pour un débit de 11 500 m³/s), influe en moyenne de ± 20 cm sur la ligne d'eau entre Beaucaire et Arles ainsi que sur le Grand Rhône, et de ± 60 cm sur le Petit Rhône jusqu'à St Gilles (valeur moindre en aval) ;
- ◆ relatives aux coefficients de Strickler considérés ; une variation de 10 à 18 % (selon les secteurs) de ce coefficient engendre une variation de la ligne d'eau de l'ordre de ± 40 cm entre Beaucaire et Arles (localement plus dans Arles) ainsi que sur le Grand Rhône, de ± 20 cm sur le Petit Rhône ;
- ◆ liées à la bathymétrie ; la prise en compte d'une bathymétrie antérieure à la crue de 2003 (type 2002) a pour conséquence d'augmenter la ligne d'eau de manière générale (de 3 cm à Beaucaire à 16 cm en Arles) ;
- ◆ liées à l'évolution du niveau marin ; ces simulations ont été réalisées en régime permanent. Les tests ont permis de montrer que l'évolution (entre 0,22 et 1,5 m NGF) de ce niveau n'avait d'influence sur la ligne d'eau dans le Grand Rhône qu'à l'aval d'Arles (pour un débit à Beaucaire de 11 500 m³/s) et sur le Petit Rhône qu'à l'aval de Saint-Gilles.

Notons au passage en ce qui concerne l'influence du changement climatique, que la conséquence hydraulique la plus notable, l'élévation du niveau de la mer, sera sans influence sur le problème qui nous concerne. Il n'en ira malheureusement pas de même pour les secteurs plus en aval comme Salin de Giraud et Port-Saint-Louis-du-Rhône.

4.4 - Avis sur les différentes phases de modélisation

4.4.1 - Comparaisons entre les résultats des deux principales modélisations

Bien qu'il soit délicat de comparer les résultats de modèles 1D et de modèles 2D, dont les principes de modélisation et les données bathymétriques diffèrent (cf. § 4.3.2), quelques éléments permettent de s'assurer de la cohérence des résultats obtenus à partir des deux modélisations.

Niveau de protection offert par les digues sur le tronçon Tarascon-Beaucaire/Arles-Fourques

La protection actuelle (c'est-à-dire dans l'état post 2003) affichée par le modèle 1D est de 10 500 à 11 000 m³/s en rive gauche et de 11 500 m³/s en rive droite entre Tarascon et Arles. Le modèle 2D prévoit, pour sa part, une protection légèrement inférieure à la crue de 2003 (11 500 m³/s) en rive gauche et légèrement supérieure à 11 500 m³/s en rive droite. Les débits de début de débordements sont donc légèrement supérieurs avec le modèle 2D (bien qu'étant globalement du même ordre que ceux obtenus avec le modèle 1D), ce qui s'explique par le fait que les résultats ont été obtenus avec des principes de modélisation différents (pour un niveau d'eau donné, la modélisation en régime permanent donne toujours, en phase de montée de crue, un débit inférieur à celui obtenu avec une modélisation en régime transitoire⁹).

Débit maximum acceptable (avant débordement) dans la traversée d'Arles

Les deux modèles donnent des résultats comparables, en évaluant ce débit maximum autour de 12500 m³/s à Beaucaire.

4.4.2 - Conclusion générale sur les phases de modélisation

L'ensemble des éléments présentés concernant la modélisation, aussi bien 1D que 2D permettent de considérer que ces deux phases de modélisation, sur lesquelles se sont adossées la plupart des études menées sur le tronçon de Beaucaire à la mer, s'appuient sur des bases solides.

Les différents choix effectués (phasage 1D/2D – modélisation « lit mineur »/ « lit majeur »), tout comme les méthodologies employées (calage, tests de sensibilité) apparaissent cohérents. La précision absolue du modèle est de l'ordre de 20 cm en cote, mais on peut estimer que la précision relative entre deux aménagements comparés est de l'ordre du centimètre.

Les modèles utilisés par le SYMADREM sont donc tout à fait adaptés pour évaluer les différents scénarios d'aménagement envisagés et pour les études en cours et à venir.

Ces conclusions valident donc les grands principes de continuité entre les études EGR puis celles du SYMADREM.

⁹ ...si l'écoulement est à très faible pente, ce qui est le cas ici (on dit que l'onde est diffusive : la crue s'amortit lors de sa propagation).

5 - Actions prévues au pré-schéma sud entre Tarascon et Arles

Le pré-schéma sud [17] concerne la vallée du Rhône en aval de Viviers, et nous nous intéressons plus spécialement à l'aval de Tarascon jusqu'à Arles. « *Les objectifs (pour cette partie la plus aval de la zone) du pré-schéma sud sont :*

- ◆ *éviter les ruptures de digues ;*
- ◆ *assurer une protection élevée dans les secteurs les plus sensibles ;*
- ◆ *ajuster la protection entre Beaucaire et Arles en fonction du débit capable en Arles ;*
- ◆ *sur le Petit Rhône et le Grand Rhône, ajuster le niveau de protection pour limiter au maximum les ruptures de digues et tendre vers une protection centennale au droit des agglomérations et si possible pour la majorité des secteurs d'habitat diffus ;*
- ◆ *gérer le comportement du système pour les crues entre le débit de protection et la crue millénale : c'est-à-dire organiser le devenir des débits excédentaires sans risque de rupture de digue et en assurant le ressuyage rapide des terres inondées. »*

Le pré-schéma sud du plan Rhône a identifié une liste d'actions, dont le montant des travaux a été estimé à 300 M€ Nous reprenons celles qui nous concernent plus particulièrement (figure 6). Les codes signifient BA = Beaucaire-Arles, GR = Grand Rhône. Source [17], actualisée en ce qui concerne la maîtrise d'ouvrage, suite aux décisions récentes du conseil syndical du SYMADREM. Il doit en particulier être noté que les six actions BA4a à BA4g sauf BA4e seront toutes portées par le SYMADREM, alors que le pré-schéma sud envisageait aussi le syndicat intercommunal de la vallée des Baux et la ville d'Arles pour trois d'entre elles. La cohérence des actions n'en sera que renforcée. L'action BA4e sera portée par l'ASA du canal des Alpines, en cohérence avec les actions du SYMADREM, en particulier pour l'action BA4b qui consiste à édifier une levée basse en amont du casier des Alpines pour éviter l'inondation du quartier sud de Tarascon par le remous depuis l'aval. Il serait aussi possible, qu'après accord avec l'ASA du canal des Alpines, le SYMADREM porte également l'action BA4E, et donc en fait toutes les actions BA4.

		Tranche	Maître d'ouvrage
BA1	Renforcement digue rive droite Beaucaire à Fourques	1	SYMADREM
BA2	Sécurisation remblai RFF	1	RFF ? SYMADREM ?
GR1	Renforcement des quais d'Arles	1	SYMADREM
BA4a	Protection rapprochée Arles nord	1	SYMADREM
BA4b	Protection rapprochée sud Tarascon	1	SYMADREM
BA4c	Amélioration ressuyage casier du Trébon	1	SYMADREM
BA4d	Amélioration ressuyage casier des marais	2	SYMADREM
BA4f	Franchissement du Vigueirat	2	SYMADREM
BA4e	Transparence canal des Alpines	3	ASA canal Alpines
BA4g	Digue amont Fourchon	3	SYMADREM

Il convient de noter que la réalisation de ces opérations (BA1 et BA2) nécessite également de traiter des risques de contournement des crues par les sites industrialo-portuaires (SIP) d'Arles, Beaucaire et Tarascon localisées sur les plateformes CNR et aujourd'hui submersibles dès une crue centennale du Rhône (soit par rehausse des plateformes CNR soit par rehausse ou création d'endiguements). Ces opérations auront un impact sur la ligne d'eau amont. Nous y reviendrons au chapitre 7.

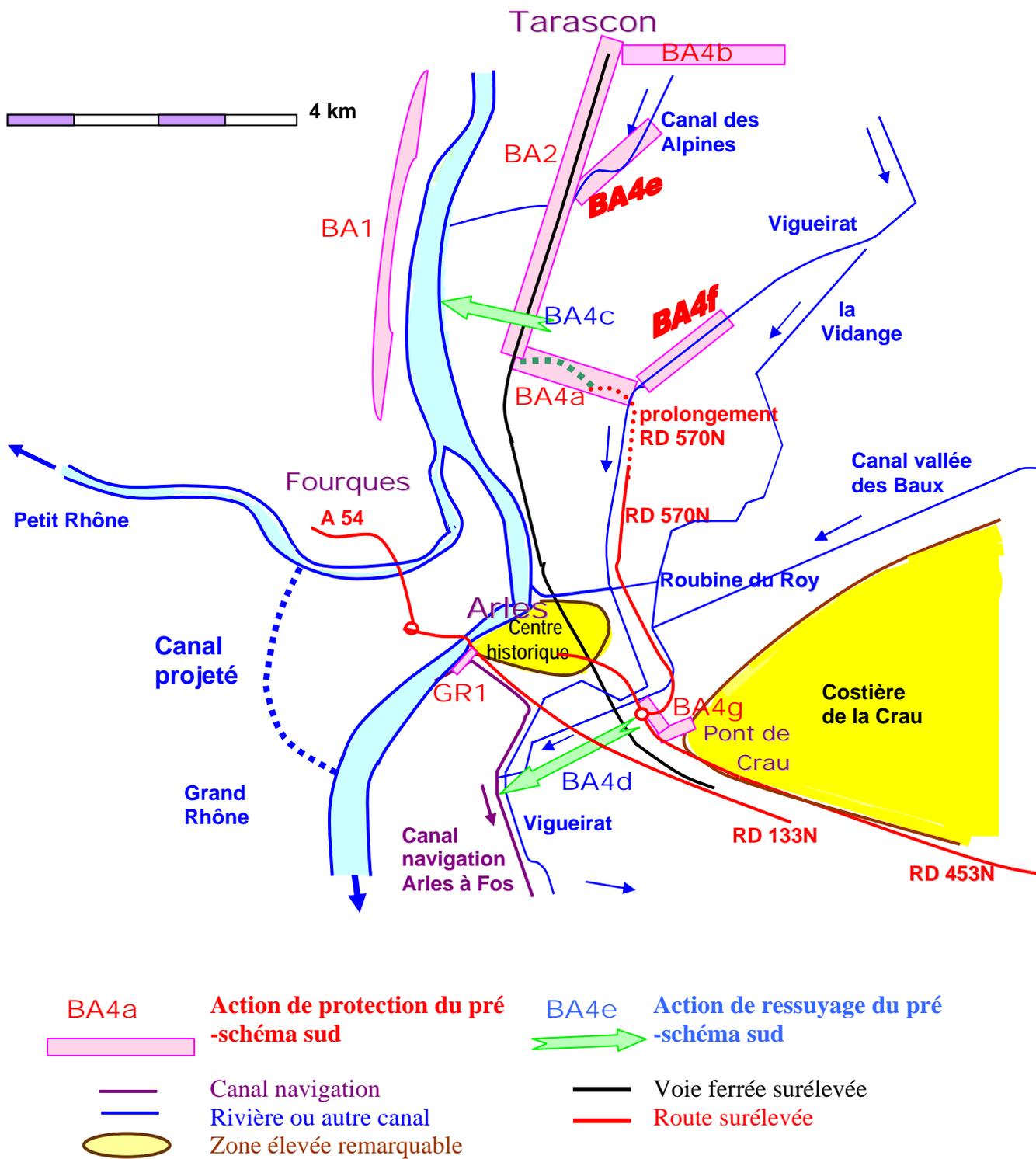


Figure 6 - actions prévues par le pré-schéma sud dans le secteur Arles Tarascon

6 - Étude de calage ; confortement de la voie RFF

6.1 - L'étude de calage

6.1.1 - Objectifs du modèle et du projet sous tendu

L'étude de calage confiée par le SYMADREM à la CNR a pour objectifs principaux de [21] :

- ✚ construire un modèle hydraulique du Rhône endigué, calé sur la crue de décembre 2003 (modèle présenté au § 4.3.2) ;
- ✚ déterminer le débit acceptable en traversée d'Arles (compris entre 11 000 m³/s et 12 500 m³/s) en prenant en compte une revanche ;
- ✚ définir le calage et l'implantation des tronçons déversants en rives droite et gauche du Rhône entre Beaucaire et le défluent suivant les objectifs de protection et les principes de calage définis ci-après ;
- ✚ déterminer les impacts hydrauliques du projet, au droit des zones à enjeux, en amont et en aval ;
- ✚ définir les paramètres nécessaires au dimensionnement des ouvrages hydrauliques et déterminer pour les différents scénarios d'aménagements, les hydrogrammes de déversement en rives gauche et droite, qui permettront de modéliser la propagation des débordements, dans le cadre d'une autre étude à venir, celle de la gestion des eaux déversées en rive gauche.

Pour le tronçon Beaucaire Arles, les objectifs de protection retenus par le SYMADREM sont [21] :

- le maintien des protections à cote identique en traversée d'Arles, à l'exception de point bas localisés qui seront rehaussés (remblai de l'IRPA) ;
- l'aménagement de tronçons de digue renforcés pour résister à la surverse, dimensionnés pour :
 - éviter de solliciter les tronçons résistants à la surverse jusqu'à une crue identique à celle de 2003 supposée sans brèche, soit une crue légèrement supérieure à la crue centennale ;
 - limiter pour une crue millénale le niveau d'eau en Arles au niveau maximum acceptable ;
 - assurer une égale répartition des déversements en rives gauche et droite du Rhône ;
 - limiter les impacts des travaux au droit des zones à enjeux, situées en amont et aval des tronçons à aménager ;
- l'aménagement du reste des digues pour admettre sans surverser la crue millénale avec une revanche de l'ordre de 50 cm.

6.1.2 - Résultats du modèle en situation actuelle

Le modèle 2D utilisé pour cette étude a été présenté au § 4.3.1 ainsi que les bénéfices de la seconde dimension. En situation actuelle il confirme les connaissances antérieures en les affinant grâce à la fois à des données bathymétriques plus récentes et au calage sur la crue de 2003, supérieures aux précédentes crues de calage et donc plus proche des crues contre lesquelles il faut se protéger. Pour les crues supérieures à celle de 2003, les digues du Rhône en amont d'Arles déversent largement (plus précisément en amont du PK 277 (Saxy) en rive gauche et du PK 279 (Fourques amont) en rive droite. Le modèle devient théorique, pour la situation dite actuelle, en supposant que ces digues résistent. En réalité, pour ces crues, il y aurait rupture totale de digue sur au moins une rive, les débits dérivés entre Tarascon et Arles seraient bien plus élevés et la ligne d'eau serait plus basse aussi bien en aval (moins de débit) qu'en amont (abaissement de ligne d'eau sur une certaine

distance amont). Mais si on rehaussait les digues pour les empêcher de déverser, par raison symétrique, il y aurait au contraire une ligne d'eau plus haute en aval comme en amont.

Nous ne commenterons qu'un résultat fondamental. En butant sur l'affleurement calcaire de la cité antique d'Arles, le Rhône opère un brutal virage à droite (figure 7). Le coude prononcé, joint à un resserrement du lit, crée une forte perte de charge singulière dont le modèle 2D montre bien les conséquences. Tout se passe ici comme s'il y avait un seuil avec une hauteur de chute de l'ordre de 80 cm à 1 mètre pour les fortes crues (décembre 2003 à millénale). Cette chute avait effectivement été constatée en décembre 2003 au pont de Trinquetaille. Ce resserrement (ou goulet) constitue presque une section de contrôle de l'écoulement. Par voie de conséquence, des aménagements qui abaisseraient la ligne d'eau aval n'auraient qu'un bénéfice limité à l'amont. A contrario, des aménagements qui surélèveraient la ligne d'eau aval, la surélèveraient plus faiblement en amont. Nous reviendrons sur ce point au chapitre 10.

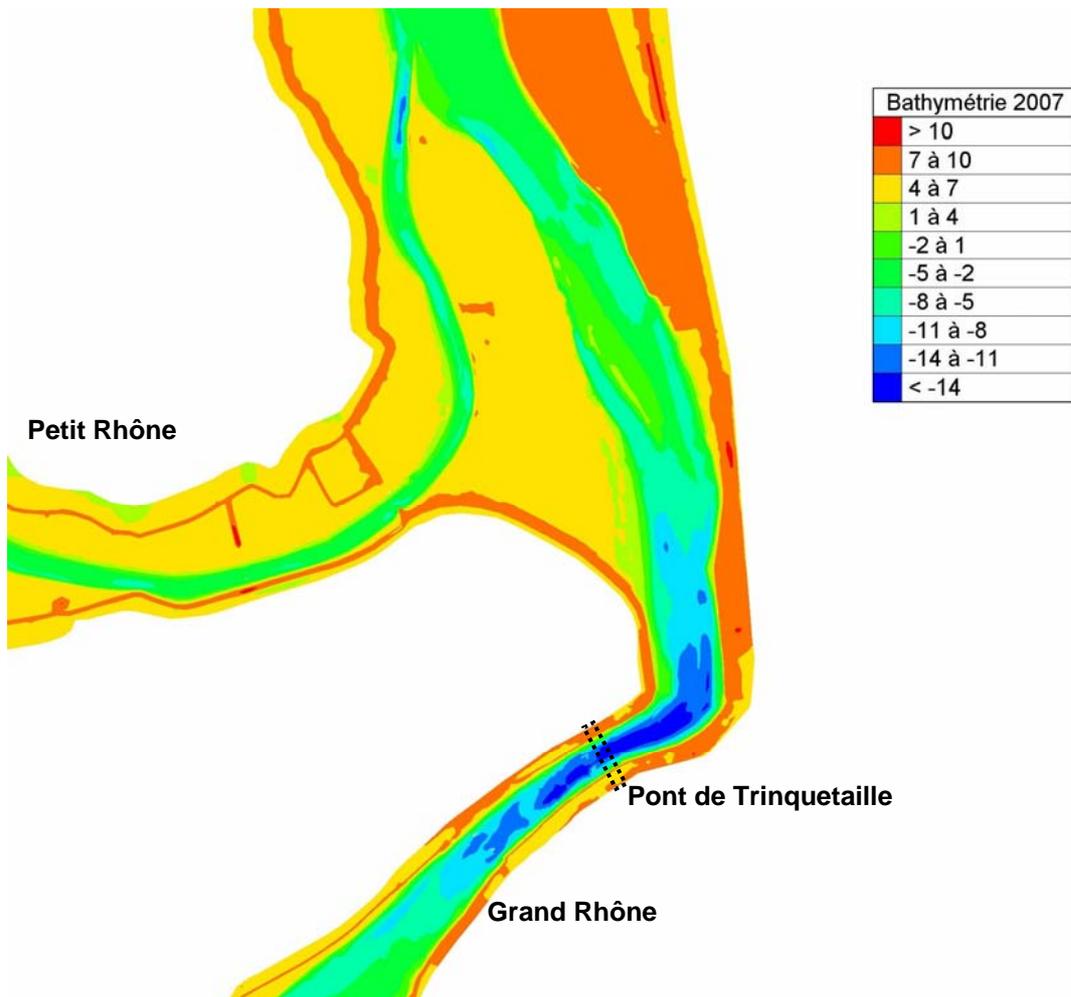


Figure 7 - relevé bathymétrique secteur Fourques Arles (source SYMADREM)

6.1.3 - Résultats du modèle en situation aménagée

Après diverses simulations d'aménagement, la solution retenue à ce jour consiste à établir deux zones aptes au déversement de grande longueur (qui pourraient représenter 5 km sur chaque rive). Deux hypothèses ont été testées, le calage de ces tronçons pour la crue 2003 sans brèches, *ou la même chose + 10 cm (texte en bleu italique)*. Les autres tronçons de digues seraient calés plus haut dans les deux cas à la crue millénale avec une revanche de 50 cm.

Avec le calage de la cote des tronçons aptes au déversement au niveau de la crue de 2003, le tableau 1 montre les gains obtenus en Arles, de l'ordre de 10 cm pour les crues 1856 et millénale (par rapport à la situation dite actuelle tenant compte des actions réalisés après 2003 et supposant que les digues résistent). *Ces gains ne sont plus que de 4 cm environ si l'on rehausse de 10 cm les zones aptes au déversement (tableau 2).*

Dans les deux cas, les déversements sont équivalents en débit et en volume sur les deux rives (les petites différences sont comparables à la précision des calculs, et, si nécessaire, un léger ajustement de longueur permettrait de les rendre identiques) :

Déversoir calé à 2003	Débit déversé depuis le Rhône		Volume déversé depuis le Rhône	
	rive droite	rive gauche	rive droite	rive gauche
Pour la crue de référence (12500 m ³ /s)	425 m ³ /s	406 m ³ /s	33 hm ³	33 hm ³
Pour Q1000 (14180 m ³ /s)	1 079 m ³ /s	1 008 m ³ /s	115 hm ³	109 hm ³

<i>Déversoir calé à 2003 + 10 cm</i>	<i>Débit déversé depuis le Rhône</i>		<i>Volume déversé depuis le Rhône</i>	
	<i>rive droite</i>	<i>rive gauche</i>	<i>rive droite</i>	<i>rive gauche</i>
<i>Pour la crue de référence (12500 m³/s)</i>	<i>330 m³/s</i>	<i>318 m³/s</i>	<i>23 hm³</i>	<i>23 hm³</i>
<i>Pour Q1000 (14180 m³/s)</i>	<i>972 m³/s</i>	<i>909 m³/s</i>	<i>97 hm³</i>	<i>92 hm³</i>

En se référant au § 4.3.1, nous constatons qu'il se trouve que les déversements en rive gauche obtenus par CNR pour Q1000 sont comparables à ceux du scénario 6 de l'étude du barreau en termes de débit (1 008 m³/s contre 984 m³/s) et deux fois moindres en termes de volume (115 hm³ contre 200 hm³). **Or nous verrons au chapitre 7 que l'étude EGIS montre que la gestion des volumes déversés dans le Trébon pour le scénario 6 est réalisable. On peut donc conclure par anticipation, que le traitement des volumes déversés après sécurisation du remblai RFF sera également réalisable, moyennant ajustement.**

Il est intéressant de noter que dans les trois villes, après aménagements, la crue millénale ne provoque pas de débordement au-delà des digues (il y a bien sûr des débordements à Beaucaire pour les parkings et bâtiments situés entre le fleuve et la digue) :

	Arles	Beaucaire	Tarascon	Montagnette
Revanche pour Q1000 avec digues aptes au déversement calées à 2003	49 cm	65 cm	88 cm	45 cm
<i>Perte de revanche si digues aptes au déversement calées à 2003 + 10 cm</i>	<i>7 cm</i>	<i>3 cm</i>	<i>4 cm</i>	<i>3 cm</i>

Ces valeurs de revanche intègrent des aménagements ponctuels en cours ou prévus à court terme (création d'un parapet de 80 cm à l'IRPA, traitements légers au quai de la Roquette et aux abords du pont « des lions » en Arles, remontée de 25 cm pour 50 m de parapet en amont de Beaucaire, reprise des deux portes coulissantes trop basses à Beaucaire, rehausse de 37 cm du parapet le long de la RD 81 à Tarascon).

Site	PK	Protection Rive Gauche	Etat initial - crue 1856	Etat initial -Q1000	Calé sur 2003 - Crue 1856	Calé sur 2003 - Q1000	Ecart initial/projet crue 1856	Ecart initial/projet Q1000
Usine de Beaucaire	265,0	14,33	12,82	13,21	12,82	13,31	0,00	0,10
Beaucaire Amont	265,5	10,52	12,82	13,21	12,82	13,30	0,00	0,10
Déversoir de Boulbon		10,49	12,82	13,20	12,82	13,30	0,00	0,10
Château de Tarascon	267,3	13,70	12,46	12,79	12,46	12,90	0,00	0,11
Amont pont routier		13,70	12,37	12,68	12,37	12,79	0,00	0,11
Aval pont routier		13,70	12,34	12,65	12,34	12,76	0,00	0,11
Amont Pont VF		13,70	12,22	12,51	12,21	12,62	0,00	0,11
Aval Pont VF	268,0	13,70	12,17	12,45	12,16	12,56	-0,01	0,11
Ecluse Beaucaire	268,0	12,04	12,03	12,31	12,02	12,41	-0,01	0,10
SIP Beaucaire amont	268,5	12,53	11,88	12,12	11,86	12,21	-0,02	0,09
Amont nouveau pont	269,5	11,32	11,82	12,06	11,80	12,14	-0,02	0,08
Aval nouveau pont		11,16	11,73	11,96	11,70	12,03	-0,03	0,07
TEMBEC aval	270,5	11,21	11,10	11,28	11,03	11,27	-0,07	-0,01
Trémie mas de Teissier	272,0	10,87	10,83	10,99	10,73	10,91	-0,10	-0,08
Trémie des ségonnaux	274,0	10,57	10,54	10,68	10,42	10,55	-0,12	-0,13
RFF canal Alpines	275,5	10,17	10,17	10,30	10,03	10,14	-0,14	-0,17
Port d'Arles	279,0	10,11	9,36	9,50	9,23	9,35	-0,13	-0,15
Aval SIP Arles	280,5	9,66	8,71	8,85	8,59	8,71	-0,12	-0,14
Amont coude	282,0	9,38	8,45	8,57	8,34	8,45	-0,11	-0,12
Pont de Trinquetaille	282,5	8,48	7,51	7,62	7,43	7,52	-0,09	-0,10
Pont RN 113		7,82	7,02	7,11	6,95	7,03	-0,07	-0,08
IRPA		7,04	7,31	7,41	7,22	7,32	-0,09	-0,10
Ecluse d'Arles		7,37	7,26	7,37	7,17	7,26	-0,09	-0,11
Barriol	284,0	7,76	7,25	7,36	7,16	7,25	-0,09	-0,11

Tableau 1 - tronçon résistant au déversement calé sur la crue de 2003, sans brèche

Les débordements sont surlignés en bleu. Le vert traduit une amélioration, le rose une aggravation. La situation dite actuelle tient compte des actions réalisés après 2003 et suppose que les digues résistent. Source CNR [36].

Nota : des écarts de 1 cm peuvent provenir des arrondis.

On constate donc que, pour la crue millénale, le projet améliore la situation en aval de l'usine TEMBEC mais l'aggrave faiblement en amont. L'aggravation amont est à relativiser, car pour tous les secteurs disposant d'une revanche, comme à Tarascon, elle n'a pas de conséquence négative. Le point le plus important à noter est que, pour la crue de référence (1856), le projet améliore la situation en aval de la voie ferrée à Tarascon, et ne l'aggrave en aucun point.

Site	PK	Protection Rive Gauche	Etat initial - crue 1856	Etat initial - Q1000	Calé sur 2003 +10 cm - Crue 1856	Calé sur 2003 +10 cm - Q1000	Ecart initial/projet crue 1856	Ecart initial/projet Q1000
Usine de Beaucaire	265,0	14,33	12,82	13,21	12,85	13,33	0,03	0,13
Beaucaire Amont	265,5	10,52	12,82	13,21	12,85	13,33	0,03	0,13
Déversoir de Boulbon		10,49	12,82	13,20	12,85	13,33	0,03	0,13
Château de Tarascon	267,3	13,70	12,46	12,79	12,50	12,94	0,03	0,14
Amont pont routier		13,70	12,37	12,68	12,40	12,83	0,03	0,15
Aval pont routier		13,70	12,34	12,65	12,37	12,80	0,03	0,15
Amont Pont VF		13,70	12,22	12,51	12,25	12,66	0,03	0,15
Aval Pont VF	268,0	13,70	12,17	12,45	12,20	12,60	0,03	0,15
Ecluse Beaucaire	268,0	12,04	12,03	12,31	12,06	12,45	0,03	0,14
SIP Beaucaire amont	268,5	12,53	11,88	12,12	11,90	12,25	0,02	0,13
Amont nouveau pont	269,5	11,32	11,82	12,06	11,84	12,18	0,02	0,12
Aval nouveau pont		11,16	11,73	11,96	11,74	12,07	0,01	0,11
TEMBEC aval	270,5	11,21	11,10	11,28	11,09	11,33	-0,01	0,05
Trémie mas de Teissier	272,0	10,87	10,83	10,99	10,79	10,98	-0,04	-0,01
Trémie des ségonnaux	274,0	10,57	10,54	10,68	10,50	10,63	-0,05	-0,05
RFF canal Alpines	275,5	10,17	10,17	10,30	10,11	10,23	-0,06	-0,08
Port d'Arles	279,0	10,11	9,36	9,50	9,30	9,43	-0,05	-0,07
Aval SIP Arles	280,5	9,66	8,71	8,85	8,66	8,79	-0,05	-0,06
Amont coude	282,0	9,38	8,45	8,57	8,41	8,52	-0,04	-0,05
Pont de Trinquetaille	282,5	8,48	7,51	7,62	7,48	7,59	-0,03	-0,03
Pont RN 113		7,82	7,02	7,11	7,00	7,09	-0,02	-0,02
IRPA		7,04	7,31	7,41	7,28	7,38	-0,03	-0,03
Ecluse d'Arles		7,37	7,26	7,37	7,23	7,32	-0,04	-0,04
Barriol	284,0	7,76	7,25	7,36	7,22	7,32	-0,04	-0,04

Tableau 2 - tronçon résistant au déversement calé sur la crue de 2003 + 10 cm, sans brèche.

Les débordements sont surlignés en bleu. Le vert traduit une amélioration, le rose une aggravation. La situation dite actuelle tient compte des actions réalisés après 2003 et suppose que les digues résistent. Source CNR [36].

Nota : des écarts de 1 cm peuvent provenir des arrondis.

On constate que pour les crues de référence comme pour les crues extrêmes, cette fois-ci le projet améliore toujours la situation en aval de l'usine TEMBEC mais un peu moins. Par contre, il l'aggrave en amont y compris pour la crue de référence.

Le tableau 3 ci-après compare les différences entre les deux projets.

Site	PK	Protection Rive Gauche	Calé sur 2003 - Crue 1856	Calé sur 2003 - Q1000	Calé sur 2003 +10 cm - Crue 1856	Calé sur 2003 +10 cm - Q1000	Ecart 2003/ 2003+ 10cm crue 1856	Ecart 2003/ 2003+ 10cm Q1000
Usine de Beaucaire	265,0	14,33	12,82	13,31	12,85	13,33	0,03	0,03
Beaucaire Amont	265,5	10,52	12,82	13,30	12,85	13,33	0,03	0,03
Déversoir de Boulbon		10,49	12,82	13,30	12,85	13,33	0,03	0,03
Château de Tarascon	267,3	13,70	12,46	12,90	12,50	12,94	0,03	0,03
Amont pont routier		13,70	12,37	12,79	12,40	12,83	0,03	0,03
Aval pont routier		13,70	12,34	12,76	12,37	12,80	0,03	0,03
Amont Pont VF		13,70	12,21	12,62	12,25	12,66	0,03	0,04
Aval Pont VF	268,0	13,70	12,16	12,56	12,20	12,60	0,03	0,04
Ecluse Beaucaire	268,0	12,04	12,02	12,41	12,06	12,45	0,04	0,04
SIP Beaucaire amont	268,5	12,53	11,86	12,21	11,89	12,25	0,04	0,04
Amont nouveau pont	269,5	11,32	11,80	12,14	11,84	12,18	0,04	0,04
Aval nouveau pont		11,16	11,70	12,03	11,74	12,07	0,04	0,04
TEMBEC aval	270,5	11,21	11,03	11,27	11,09	11,33	0,05	0,06
Trémie mas de Teissier	272,0	10,87	10,73	10,91	10,79	10,98	0,07	0,07
Trémie des ségonnaux	274,0	10,57	10,42	10,55	10,50	10,63	0,07	0,08
RFF canal Alpines	275,5	10,17	10,03	10,14	10,11	10,23	0,08	0,09
Port d'Arles	279,0	10,11	9,23	9,35	9,30	9,43	0,08	0,08
Aval SIP Arles	280,5	9,66	8,59	8,71	8,66	8,79	0,07	0,08
Amont coude	282,0	9,38	8,34	8,45	8,41	8,52	0,07	0,07
Pont de Trinquetaille	282,5	8,48	7,43	7,52	7,48	7,59	0,06	0,07
Pont RN 113		7,82	6,95	7,03	7,00	7,09	0,05	0,06
IRPA		7,04	7,22	7,32	7,28	7,38	0,06	0,06
Ecluse d'Arles		7,37	7,17	7,26	7,23	7,32	0,06	0,06
Barriol	284,0	7,76	7,16	7,25	7,22	7,32	0,06	0,06

Tableau 3 - surélévation de ligne d'eau due au calage à + 10 cm. Source [36].

Nota : des écarts de 1 cm peuvent provenir des arrondis.

L'aggravation due à la hausse de 10 cm est la même pour les deux scénarios de crue, de l'ordre de 5 cm.

Au total, la surélévation des tronçons de digue résistant à la surverse présente un inconvénient sur l'ensemble du secteur, y compris à Tarascon et en amont. Ces inconvénients sont à mettre en balance avec l'avantage de solliciter le Grand Trébon pour une crue un peu plus rare (environ à partir de 11 800 m³/s au lieu de 11 500) et d'y déverser des volumes légèrement plus faibles.

Regard global sur la sécurisation des digues entre Beaucaire et Arles

En raisonnant pour le calage des digues résistantes à la surverse sur la base de la crue de 2003 (sans brèche), on observe :

- pour la plaine du Grand Trébon, l'absence de tout déversement jusqu'à la crue de 2003 sans brèche, soit une augmentation du niveau de protection théorique de 15 à 20 cm (théorique, car en l'état actuel, des ruptures sont hautement probables pour de telles crues) ;
- pour la plaine du Grand Trébon, pour les anciens marais et pour Fourchon, la garantie de l'absence d'inondation brutale par rupture de remblai jusqu'à la crue millénale (ce bénéfice commençant pour des crues inférieures à celle de 2003) ;
- le même bénéfice en rive droite, en particulier pour Bellegarde et Saint-Gilles ;
- pour le Petit Rhône et pour le Grand Rhône, une diminution de débit de 17 % sur la crue de référence (1856) et de 26 % pour la crue millénale ;
- pour la ville d'Arles, un abaissement de ligne d'eau de 10 cm pour la crue millénale ;
- pour Fourques, un abaissement de ligne d'eau de 13 cm pour la crue millénale ;
- à Arles comme à Fourques, cela revient à ramener la pointe de la crue millénale à celle de la crue de référence ;
- la mise hors d'eau des sites industrialo-portuaires (SIP) d'Arles, Tarascon et Beaucaire ;
- à Tarascon et Beaucaire et à la plaine de Boulbon une augmentation de ligne d'eau de 10 cm pour la crue millénale, mais une situation inchangée pour la crue de référence (du fait de la mise hors d'eau des SIP situés en aval des deux cités) ;
- et, bien sûr, les conséquences de ces déversements restent à étudier (étude encours rive droite, à lancer rive gauche). Mais les résultats de l'étude d'impact du barreau montrent que la solution technique est réalisable en rive gauche, y compris en ce qui concerne Fourchon.

6.2 - Sécurisation du remblai RFF

6.2.1 - La faiblesse du remblai ferroviaire vis-à-vis des crues

La sécurisation du remblai ferroviaire est une affaire très importante car le risque encouru est à la fois plus fréquent que ce que l'on peut imaginer et plus grave, nous allons tenter de l'expliquer.

Le risque de rupture par surverse est relativement bien connu. Même si l'on ne sait pas exactement prédire quelle hauteur de déversement sur la plateforme ferroviaire et quelle durée de déversement provoquera une brèche. Instruit par la crue de 2003, on peut prédire qu'une crue un peu plus forte que la centennale provoquera à coup sûr au moins une brèche. Tous les travaux de recherche et d'expérimentation et toutes les observations de cas réels montrent que lorsque une brèche s'initie au sommet d'un barrage ou d'une digue, et si le déversement ne s'arrête pas, la brèche se développe verticalement jusqu'à la base du remblai. Ensuite, elle s'élargit par érosion sur ses deux faces, d'une largeur qui dépend de la durée de surverse et aussi de la montée du niveau aval qui peut limiter l'énergie de l'eau. La débitance d'une brèche qui s'est développée jusqu'au niveau du terrain est sans commune mesure avec celle des brèches de faibles hauteurs constatées en 2003 sur deux trémies (dont on a expliqué plus haut que le débit avait été limité par la section du pont). Les débits et les volumes sont alors très élevés, par exemple de l'ordre de ceux du scénario 6 (200 millions de m³ soit plus de 10 fois plus qu'en 2003).

Mais nous voulons insister aussi sur le risque de rupture par érosion interne qui peut survenir pour des crues sensiblement inférieures à la crue de début de surverse, donc sensiblement inférieures à la crue centennale. C'est ainsi que les digues de Camargue s'étaient rompues en 1993 et en 1994 pour des débits de pointe à Beaucaire de l'ordre $9\,500\text{ m}^3/\text{s}$ et $10\,500\text{ m}^3/\text{s}$ soit des crues dont la fréquence est entre décennale et cinquantennale. En 1994, la crue était plus basse qu'en 2003 de 0,6 à 1 m au droit du remblai ferroviaire et des circulations d'eau internes avaient déjà été repérées au niveau des trémies [11]. En 2003, on a observé aussi des écoulements d'eau claire au pied des cavaliers d'une trémie et d'eau chargée avec début de glissement d'un cavalier de l'autre trémie. Le remblai ferroviaire lui-même présente des fontis en crête, glissements, renards¹⁰, gros terriers, souches pourries. On note en particulier entre la trémie du mas de Teissier et l'usine TEMBEC un début de renard avec un fontis en crête et des sols fins sortant du débouché aval [11]. Les cavaliers des trémies ont été confortés depuis 2003, mais nul doute que le remblai ferroviaire lui-même présente de nombreux risques d'érosion interne. Une érosion interne a une cinétique encore plus rapide qu'une érosion par surverse, à partir du moment où le renard s'est initié. La brèche est de forme analogue à celle d'une brèche de surverse, avec des conséquences exactement similaires. Il doit être ajouté que dans ce genre de remblai médiocre, chaque forte crue développe un peu plus les entraînements de grains et affaiblit un peu plus le remblai. Il en résulte qu'un remblai ayant résisté à une crue pourra très bien ne pas résister à une crue identique ou même inférieure.

6.2.2 - L'étude de sécurisation du remblai RFF

Les conclusions de l'étude de calage (§ 6.1), lorsqu'elle sera complètement achevée et validée, conduiront à fixer la cote, la longueur, et la loi de débitance des tronçons résistants à la surverse. Elles fourniront aussi les cotes, plus élevées, des crêtes des digues ne résistant pas à la surverse.

Le projet de ces digues fait l'objet d'autres études en cours. Côté rive droite, le SYMADREM les a confiées à ISL. Côté rive gauche, RFF assure la maîtrise d'ouvrage des études et a confié l'étude à un groupement comportant Coyne et Bellier pour la partie génie civil-hydraulique et INEXIA pour la partie ferroviaire. On a donc, dans les deux cas, des organismes d'ingénierie parfaitement qualifiés. Côté gauche, la maîtrise d'ouvrage des travaux n'est pas encore décidée entre RFF et le SYMADREM. Nous évoquerons ce sujet au § 6.3.

Au-delà de l'aspect ferroviaire, l'étude RFF comporte un aspect génie civil, le dimensionnement des digues du point de vue de leur stabilité et de leur résistance aux sollicitations (crues, séismes..) et du point de vue hydraulique (par exemple le dimensionnement des dissipateurs d'énergie).

Nous avons pu constater la bonne concertation technique entre les deux études de calage et de sécurisation du remblai RFF et, à ce jour, un accord de principe sur les éléments suivants :

- ◆ le tracé de la voie ferrée et la cote du remblai ferroviaire restent inchangés ;
- ◆ la digue résistante à la surverse aurait une longueur de 5 km, comprise approximativement entre les PK 271 et 276 du Rhône, soit entre l'amont de la trémie du mas Teissier au sud de l'usine TEMBEC et le barreau prévu au nord d'Arles ; elle serait située parallèlement à la voie ferrée et écartée de 10 à 15 m (entre le pied côté plaine de la digue et le pied côté Rhône du remblai ferroviaire) ;
- ◆ la voirie publique située approximativement dans l'emprise de la digue projetée serait décalée côté Rhône ;

¹⁰ Conduit continu entre l'amont et l'aval d'un ouvrage hydraulique en terre formé par l'entraînement de grains de sol arrachés à l'ouvrage par un mécanisme d'érosion interne dû à l'eau. L'écoulement dans ce conduit arrache des grains sur son pourtour, ce qui amplifie le mécanisme d'érosion qui peut aller jusqu'à la création d'une brèche si l'alimentation en débit ne s'interrompt pas entre temps.

- ◆ du fait de la grande longueur du tronçon apte au déversement, les tronçons de digues plus hautes et qui font le raccordement aux sites industriels d'Arles et de Tarascon (usine TEMBEC) sont relativement courts ; ils seront plus ou moins accolés au remblai ferroviaire en fonction des résultats de l'étude géotechnique en cours de réalisation ;
- ◆ l'évacuation des débits déversés pour les crues supérieures à celle de 2003 (sans brèches) se fera par de nombreux passages (10 à 20) sous voie ferrée de dimension moyenne et par les trois trémies existantes (les deux qui ont lâché en 2003 et celle des Prêcheurs) ; cf. figure 8 ;
- ◆ chaque passage, large de 10 à 15 m, serait préfabriqué et pourrait être réalisé avec une très courte interruption du trafic (de l'ordre de deux jours) ;
- ◆ le cheminement des déversements vers les passages sous remblai ferroviaire sera organisé dans l'espace inter remblais tout en permettant la circulation d'engins d'entretien de ces deux remblais ;
- ◆ la dissipation de l'énergie lors des déversements sera réalisée en partie dans l'espace entre remblais et à l'aval du remblai ferroviaire ; le talus du remblai ferroviaire côté Rhône devra être protégé.

La suite de l'étude permettra de dimensionner les nouveaux ouvrages, en particulier avec les données issues de la campagne de reconnaissance géotechnique qui sera finalisée fin 2008. La plus ou moins grande proximité de la digue sans surverse et du remblai ferroviaire sera décidée au vu des résultats de cette campagne en fonction de l'aptitude du remblai ferroviaire à supporter ou non des contraintes supplémentaires. Elle permettra aussi de préciser la conception de la digue apte au déversement afin que les tassements différentiels soient aussi faibles que possible.

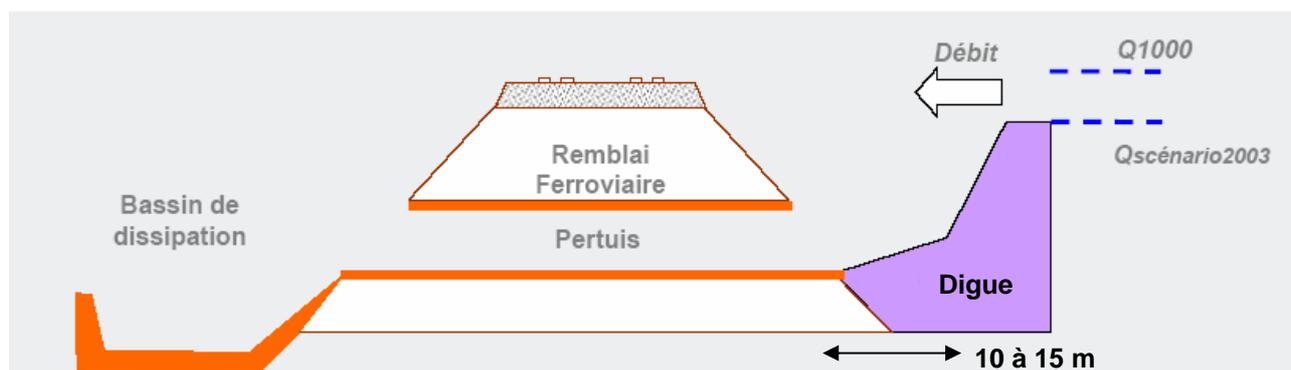


Figure 8 - schéma de principe envisagé pour le passage en sous-verse sous la voie ferrée
(source RFF, étape préparatoire de l'étude, comité technique du 30/09/08)

Nous avons envisagé un temps que la digue déversante puisse servir de support à la voie ferrée. Cela aurait permis d'éviter toute interruption du trafic pendant les travaux et surtout d'éviter la construction des passages sous remblai. Mais après échange avec RFF et la SNCF, nous ne mettons plus cette solution en avant car elle entraînerait une digue déversante beaucoup plus large, donc plus coûteuse et plus consommatrice d'espace dans le ségonnal, et car elle ne permettrait plus l'usage de la voie ferrée en situation de crise.

On voit donc se dessiner très nettement une configuration où le remblai ferroviaire devient transparent vis-à-vis des crues et où digue et voie ferrée deviennent deux ouvrages relativement distincts. La situation a bien progressé depuis l'établissement du pré-schéma sud.

Ces options techniques nous semblent tout à fait pertinentes. En particulier le parti d'un déversement long est judicieux car il permet, même pour une crue millénaire, de faibles lames d'eau dont le pouvoir érosif est limité. Dans le même esprit, le choix de nombreux orifices sous la voie ferrée permet d'éviter des afflux d'eau trop concentrés dans la plaine. Le positionnement rectiligne (le pré-schéma sud envisageait des demis cercles) et très rapproché de la digue apte à la surverse permet de ne presque pas restreindre l'emprise du ségonnal, bénéfique pour l'écrêtement des crues.

Il ne crée pas une perte de charge singulière supplémentaire lorsque le ségonnal est sollicité par les eaux du Rhône. Enfin, les solutions actuellement étudiées de passage en « sous verse » sont infiniment préférables au passage en surverse qui avait été cité dans le pré-schéma sud comme une variante possible. Cette solution s'avère non réalisable compte tenu de la perméabilité du ballast et serait de toute façon risquée.

Nous attirons l'attention sur le fait que les portions aptes au déversement pourront connaître des tassements différents sur les deux rives du Rhône, et pour chacune d'elles dans le sens de leur longueur. Ce qui compromettrait le bon fonctionnement général en crue. L'étude de génie civil de ces deux ouvrages doit donc être soignée sous cet aspect. Un contrôle topographique devra être organisé qui permettra de programmer d'éventuels réajustements de cote si nécessaire.

Nous suggérons que le passage en « sous verse » des débits de débordement soit acté dès maintenant afin de ne pas perdre du temps à étudier les avantages ou inconvénients du passage en surverse sur la voie ferrée, solution qui apparaît maintenant tout à fait irréaliste.

Si la coordination entre RFF et SYMADREM nous semble sur de très bons rails pour ce qui concerne la gestion des endiguements, la coordination pour ce qui concerne la gestion de la plaine reste à faire. Il importe donc que le calendrier de réalisation de l'étude de la gestion des eaux déversées soit respecté pour qu'il y ait plusieurs mois de chevauchement avec l'étude de sécurisation du remblai ferroviaire. Il faut en effet positionner les débouchés sous le remblai ferroviaire en relation avec la problématique du ressuyage. Le fait que la DDE 13 soit l'AMO de RFF et soit aussi, avec la DDAF 13, l'AMO de l'étude de ressuyage est évidemment un élément facilitateur.

Conclusion du § 6.2 regroupée avec celle du paragraphe suivant

6.3 - Maîtrise d'ouvrage pour le confortement du remblai RFF

Nous abordons ce sujet sous l'aspect de la cohérence des actions hydrauliques, le rapport général l'abordant d'une façon plus globale.

Il nous semble préférable de clarifier dès que possible ce point, afin que la poursuite des études (étude de calage et surtout étude de sécurisation du remblai RFF) ne reposent pas sur des malentendus potentiels.

Cette clarification nous paraît devoir s'imposer sur la base suivante : le SYMADREM a une vocation hydraulique, la RFF a une vocation ferroviaire. La maîtrise d'ouvrage de la partie de confortement du remblai RFF (zones calées à Q1000 + 50 cm) et du tronçon nouveau de digue résistant à la surverse nous paraît devoir être celle du SYMADREM. De son côté, RFF aurait la maîtrise d'ouvrage de tous les passages sous son remblai. En ce qui concerne l'entretien, il assurera l'entretien de la totalité du tronçon résistant à la surverse et l'entretien du confortement dans les zones protégées jusqu'à Q1000 + 50 cm. RFF assurera l'entretien de son ouvrage pour les seuls besoins ferroviaires, et donc sera évidemment déchargé de l'entretien du talus côté Rhône dans les portions qui seraient épaulées par un nouveau remblai surélevé. Une convention définissant les domaines physiques d'intervention du SYMADREM et de RFF, les procédures de concertation pour la suite des études et les procédures de concertations pour certains travaux d'entretien devrait être initiée sans attendre la fin de l'étude de sécurisation. Ainsi, celle-ci pourrait s'achever sur des bases clarifiées.

Ce partage des tâches et des maîtrises d'ouvrage, s'impose d'autant plus qu'il apparaît maintenant plus clairement que l'on se dirige vers une solution où le remblai ferroviaire devient transparent au sens hydraulique.

À ce stade des études et, compte tenu à la fois des principes techniques et du constat de bonne collaboration des acteurs, il nous paraît que le choix du maître d'ouvrage devient possible sans délais.

Regard global sur le mode de sécurisation du remblai ferroviaire (§ 6.2 et 6.3)

Le remblai ferroviaire peut être l'objet de brèches qui se développent jusqu'à sa base par surverse, ou par renard, même pour des crues inférieures à celle de 2003, peut être pour des crues du type de celles de 1993 et 1994.

Les études actuellement menées par le SYMADREM pour le calage des digues résistantes à la surverse et par RFF pour le confortement de son remblai avancent en bonne synergie et permettent de dégager une vision claire sur un mode de confortement réaliste et efficace. La présence de l'État dans les groupes de pilotage est un garant de la bonne synergie entre les actions en cours, et celles, nombreuses, à venir.

Le remblai RFF deviendra en fait transparent et sera équipé de nombreux petits passages inférieurs en plus des trois grands existents (trémies). Le tronçon de digue apte au déversement représente environ 80 % de la longueur de remblai ferroviaire. Ce sera une nouvelle digue rectiligne parallèle au remblai RFF.

Pour le bon achèvement des études hydrauliques et ferroviaires de tout ce secteur, y compris la plaine du Grand Trébon, il conviendrait :

- que puisse être fait rapidement le choix d'un maître d'ouvrage pour la digue aussi bien partie déversante que partie surélevée accolée au remblai ferroviaire ; ce maître d'ouvrage devrait être le SYMADREM et une convention avec RFF traiterait des problèmes communs pour la fin des études, le déroulement des travaux et l'entretien ultérieur. Elle ne devrait pas présenter de difficulté technique ;
- que le SYMADREM puisse engager aussi vite que possible l'étude de gestion des eaux déversées pour qu'elle puisse avancer de pair avec la fin de l'étude RFF.

7 - Protection des quartiers nord d'Arles

Ce paragraphe se réfère essentiellement à l'étude EGIS [35]. Les numéros de page en petits caractères sont ceux de cette étude (version juillet 2008) qui complète le volet hydraulique de l'étude d'impact de la protection nord d'Arles [20] par l'étude du scénario 750.

7.1 - Principe de la protection par ajout d'un « barreau »

Le tronçon de digue projeté pour protéger les quartiers nord d'Arles (Monplaisir) relie la digue du Vigueirat et la voie ferrée. Il comporte deux parties :

- un remblai routier déjà édifié destiné à prolonger la rocade RD 570^N et qu'il est prévu de transformer en digue par un dispositif d'étanchéité (une géomembrane est prévue, mais ce pourrait être aussi un masque en argile) ;
- un remblai à construire, souvent appelé barreau. Par extension, c'est l'ensemble des deux que nous appellerons barreau (référéncé 1 sur la figure 3 ci-après et BA4a dans le pré-schéma sud).

Cette digue (ou barreau) est orientée sensiblement est-ouest, perpendiculairement à la voie ferrée. Elle vient se refermer à l'ouest sur le remblai de la voie RFF, à très faible distance du terre-plein de la gare d'Arles. À l'est, elle se referme sur le remblai de rive droite du Vigueirat. La protection rapprochée est donc constituée du barreau, de la digue du Vigueirat, des hauts quartiers d'Arles et d'un court tronçon de voie ferrée (en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre).

Cette protection rapprochée concerne 7 000 personnes (Monplaisir) et la ZI nord. Le barreau prévu est calé à la cote 6,8 m NGF et s'étend sur 1 130 m de long. Il retire 3,5 km² aux 27 km² du casier du Grand Trébon.

Cette protection rapprochée intervient en second rideau en cas de défaillance du remblai de la voie RFF (ou de ses trémies). Elle constitue donc ce qui est classiquement appelé une digue de second rang. Ce double rideau de protection est classique dans de nombreuses vallées. La digue de **premier rang** est la première qui est sollicitée par la montée des eaux, ici le remblai de la voie RFF. La digue de **second rang**, lorsqu'elle existe, est sollicitée lorsque la digue de premier rang ne suffit plus, soit qu'elle déverse par des tronçons résistants à la surverse (s'ils existent), soit qu'elle déverse par dessus sa crête, soit qu'elle soit victime d'une brèche avant ou après avoir surversé. Classiquement, la digue de premier rang longe le cours d'eau sur une grande longueur, et une digue de second rang, généralement bien plus courte, protège, en second rideau, des zones de superficie limitée et plus densément habitées. Mais il est tout à fait possible de construire des protections rapprochées s'il n'y a pas de digue longitudinale. On ne peut plus parler dans ce cas de digue de second rang, mais bien de protection rapprochée.

En cas de défaillance de la digue de premier rang, la protection rapprochée doit pouvoir jouer son rôle de manière autonome, sans compter sur la digue de premier rang. Elle n'est donc viable que si le petit tronçon de voie ferrée situé entre le barreau et la zone industrielle reste pérenne et de même pour la digue du Vigueirat. Le petit tronçon en cause de la voie ferrée est très surélevé et ne va pas risquer une surverse. Il ne va en principe pas non plus présenter un risque d'érosion interne car les gradients hydrauliques qu'il devra subir seront très faibles. Mais même s'il présentait un tel risque, il serait très facile, vu sa très faible longueur, de le sécuriser dans le cadre du chantier d'édification du barreau.

Le caractère autonome de la protection de Monplaisir suppose aussi que la digue du Vigueirat située en aval du barreau ne se rompe pas. Après 2003, un imposant rideau de palplanches avait été battu entre la RD 453^N et le siphon de Flèche. Il doit être prolongé en 2009 jusqu'à l'emplacement du barreau par la ville d'Arles.

Deux autres remblais peuvent subir des désordres en cas de défaillance de la voie RFF ou de ses trémies. Le canal des Alpines, s'il se rompt, ce qui a été subi en 2003, vient légèrement augmenter les hauteurs d'eau dans le casier du Trébon et ne provoque pas de désordre sur la digue projetée. Le remblai du Vigueirat, s'il se rompt en amont du barreau, ne peut que le soulager (mais aggrave alors la situation dans le casier des anciens marais).

En conclusion au stade des principes, on doit concevoir la protection nord d'Arles comme une **protection rapprochée autonome** et non comme une **digue de second rang dépendant d'une digue de premier rang**. Cela implique que les autres remblais qui referment la protection soient sûrs en crue, ce qui est en principe le cas. Cela ne change donc rien en pratique, mais cette différence d'appellation éviterait des malentendus.

7.2 - Situation actuelle (2008, barreau non réalisé)

Voir les lignes en bleu des tableaux de synthèse n° 4 à 6.

Pour la crue 2003 (compris brèches RFF et Vigueirat et nouveau siphon de Flèche), le modèle calé sur cette crue confirme les déversements par les trémies (243 m³/s), le remplissage du casier du Trébon entre 5,42 m NF (amont) et 5,22 m (aval), l'absence de débordement sur Vigueirat et roubine du Roy, le remplissage des marais d'Arles et des Baux à 2,06 m NGF et l'absence d'eau au verrou de Fourchon (avec une revanche de 2,44 m par rapport à la route qui surélève le verrou à la cote 5,5 m NGF). La hauteur d'eau à Monplaisir est comprise entre 0 et 1,5 m (pages 34 à 38, plan 5).

Pour le scénario 6 avec tenue au déversement des digues du Vigueirat¹¹, le casier du Trébon (6,31 m NGF à l'aval soit 1,09 m plus haut que le scénario 2003) déborde cette fois dans le Vigueirat ; le casier des anciens marais d'Arles et des Baux (5,28 m) est à la limite de déborder sur la RD 453^N (environ 5,5 m) ; le quartier de la Genouillade (figure 9) est inondé par débordement sur la digue droite du Vigueirat (5,42 m) ; du même côté du Vigueirat, le quartier des Alyscamps est inondé à 5,25 m. Page 47. La RD 453^N protège (sans marge de sécurité) la zone tertiaire de Fourchon, mais celle-ci est quand même inondée par le canal des Baux (tronc commun) qui déborde, et de beaucoup, sur ses deux berges (4,59 m). La hauteur d'eau est de l'ordre de 2,50 m dans Fourchon, et de 2 m à la Genouillade et aux Alyscamps.

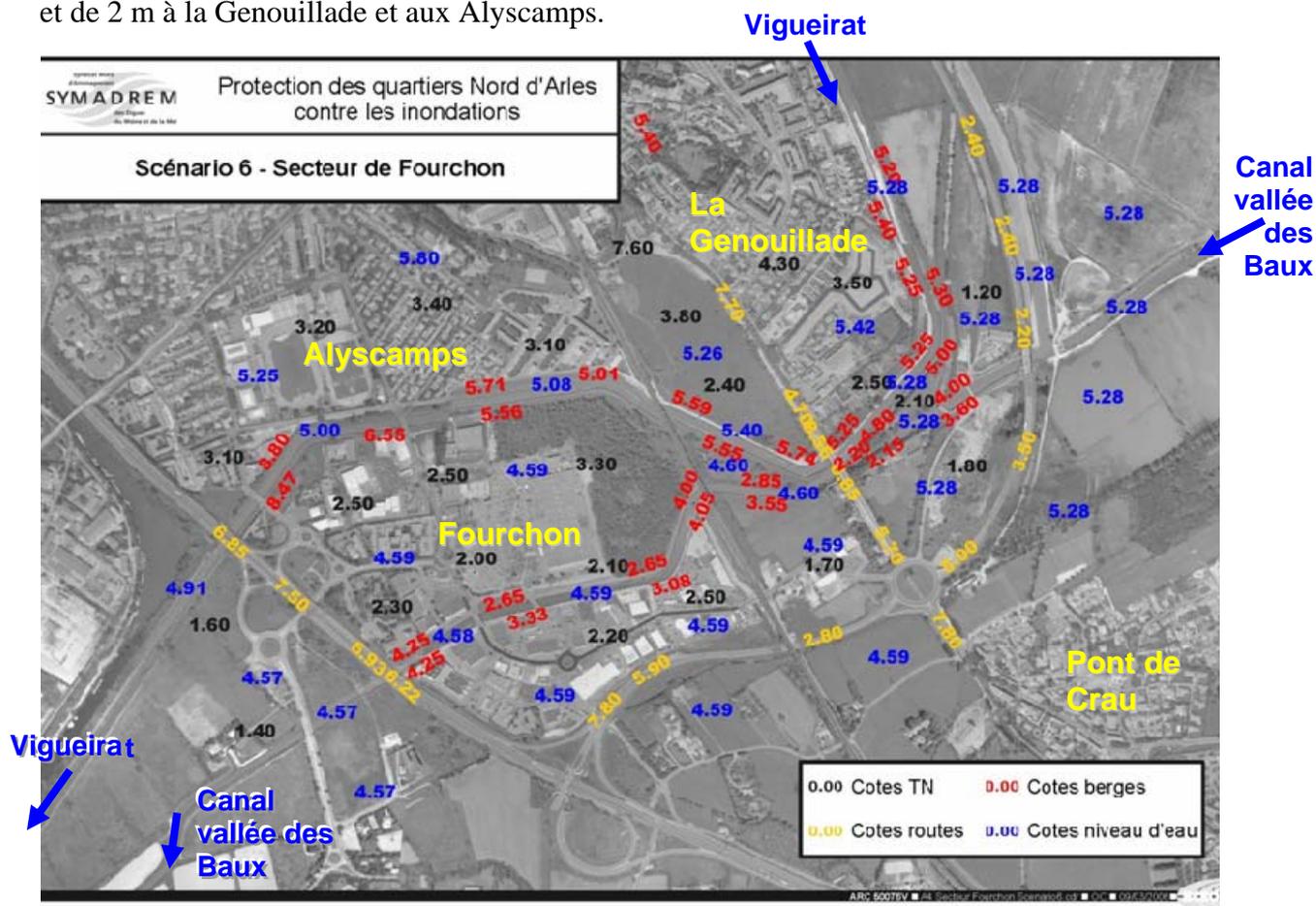


Figure 9 – le secteur de Fourchon et la proximité du Vigueirat et du canal de la vallée des Baux : la Genouillade, Alyscamps (au nord du Vigueirat), Fourchon (au sud du Vigueirat), Pont de Crau (à l'est de Fourchon). Extrait de [35].

¹¹ Il s'agit de la digue droite du Vigueirat, celle qui ferme le casier du Grand Trébon. L'autre digue est supposée avoir la même brèche qu'en 2003 à Fort Hébral, qui envoie les eaux du Vigueirat dans le casier des anciens marais d'Arles.

Scénario 6 sans tenue au déversement des digues du Vigueirat

Une hypothèse pessimiste de brèche est prise en compte : longueur cumulée de 270 m et abaissement jusqu'au terrain naturel. La situation est améliorée pour le casier du Trébon (5,78 m NGF soit -53 cm au vu du plan 10), et bien entendu aggravée à l'aval : 5,51 m soit + 23 cm aux marais d'Arles, 4,75 m soit + 16 cm à Fourchon, 5,50 m soit + 9 cm à Genouillade, 5,29 m soit + 4 cm aux Alyscamps. Source plan 10, page 95.

Scénario 750 avec brèche du Vigueirat (page 150)

Le niveau de l'eau est nettement plus élevé que pour le scénario 6 (6,31 m NGF contre 5,78), et nous pensons que les hypothèses sur la durée de formation de la brèche sur la digue du Vigueirat en sont la cause. Pour la même raison sans doute, la durée de vidange du casier des marais est nettement plus courte. Fourchon est inondé, moins que dans le scénario 6 (4,01 m NG contre 4,75 m). La hauteur d'eau y est de l'ordre de 2 m (contre 2,5 m dans le scénario 6), et le début de débordement se produit 30 h après le début de déversement sur la voie ferrée. La hauteur maximale à Monplaisir augmente de 50 cm par rapport à la crue 2003 et passe donc à environ 2 m.

On constate que la zone tertiaire de Fourchon est menacée selon les scénarios de crue :

- ⚡ soit par le débordement du casier des marais ;
- ⚡ soit par le débordement du Vigueirat ;
- ⚡ soit par le débordement du canal de la vallée des Baux.

Sa protection en cas de gros épisode de crue du Rhône et/ou des bassins versants locaux est donc une affaire complexe, où il faut jouer finement à la fois sur les volumes stockés dans les casiers et sur la capacité des exutoires de vidange de ces casiers.

7.3 - Avec barreau seul

Ce cas n'est pas un cas de projet, mais il permet de mettre en évidence l'apport des mesures dites compensatoires (pompage...) des paragraphes suivants. Voir lignes rouges des tableaux de synthèse n° 4 à 6.

Pour le scénario 2003 (page 97), le niveau dans le Trébon est augmenté de 55 cm du fait de sa perte de superficie (18,5 km² avec Monplaisir, 15 km² après édification du barreau) et de la tenue des digues du Vigueirat qui ne déversent pas et résistent. Il reste néanmoins une revanche de 1,03 m sur le barreau. Le casier du Trébon étant plus sollicité, il lamine mieux et à l'aval, le marais d'Arles voit 8 cm de moins.

Pour le scénario 6, (page 105), les digues du Vigueirat déversent et se rompent. La présence du barreau augmente les cotes de 5 à 8 cm dans tous les secteurs (+ 8 cm au Trébon, + 7 cm au marais d'Arles et à Genouillade, + 6 cm à Fourchon, + 5 cm aux Alyscamps). Le niveau dans le Trébon est de 5,86 m laissant une revanche sur le barreau de 94 cm.

Même si les digues du Vigueirat ne se rompaient pas (page 113), le niveau dans le Trébon s'élèverait à 6,48 m laissant encore une revanche de 32 cm.

Le scénario 750 (brèche de 750 m³/s) n'est pas étudié.

7.4 - Avec protection nord d'Arles, et ouvrage de transfert sur Vigueirat

Voir lignes vertes des tableaux de synthèse n° 4 à 6.

L'aménagement fait donc en sorte de rendre impossible la rupture de digue du Vigueirat. Il comporte, en plus du barreau (1) huit actions numérotées (1) à (5) et (a) à (e) sur la figure 10 ; les lettres correspondent aux actions dites d'accompagnement. Ce sont :

✚ des ouvrages d'évacuation sous la voie ferrée vers le Rhône :

- (2) station de pompage de 10 m³/s ;
- (4) optimisation de la martelière existante ;
- (c) ouvrage gravitaire supplémentaire de section 20 m² ;

✚ des ouvrages sur le Vigueirat :

- (3) ouvrage de régulation plafonnant le débit dans le Vigueirat pour le cas où le casier du Trébon surverserait dans le lit du Vigueirat ;
- (a) ouvrage de transfert sur le Vigueirat par renforcement des deux digues sur 2 km, calées à 5,89 m en amont et 5,65 m en aval, soit 1,15 m sous la crête du barreau ;
- (b) surélévation des deux digues du Vigueirat en amont de l'ouvrage de transfert pour éviter les déversements dans le Vigueirat ;
- (e) clapet anti-retour sur le siphon de Flèche qui vidange le casier du Trébon par dessous le remblai du Vigueirat et busage du contre fossé du Vigueirat qui conduit au siphon ;
- (f) amélioration gestion des vannes du contre canal liées au prolongement de la rocade.

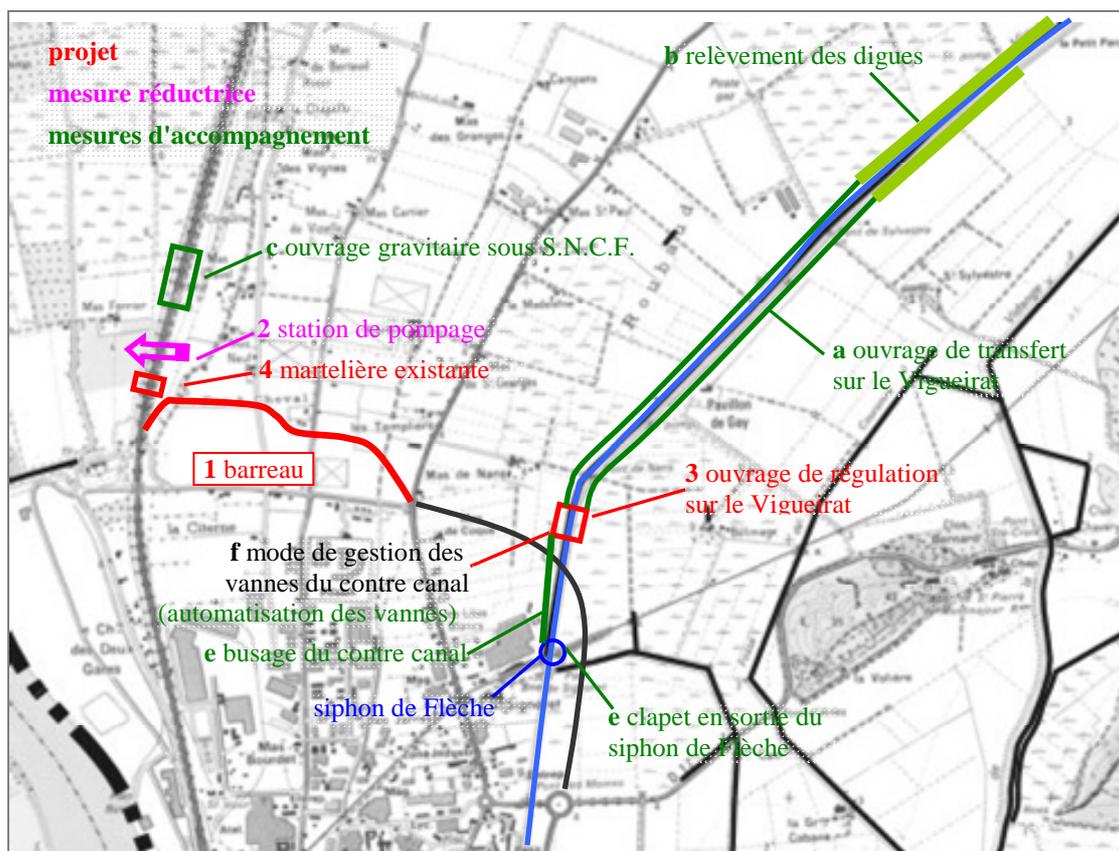


Figure 10 - schéma du barreau et des mesures complémentaires avec transparence du Vigueirat (plan 9 page 79 de l'étude EGIS [35])

Les nouveaux exutoires permettent que le casier Grand Trébon stocke moins d'eau que dans la **situation 2003** : $12,7 \text{ hm}^3$ au lieu de $14,5 \text{ hm}^3$; la réalisation du barreau permet que le quartier de Monplaisir (aval du barreau projeté) ne soit plus inondé alors qu'il recevait $3,1 \text{ hm}^3$. Cf. colonnes 3 des tableaux 4 à 6. Du fait de la suppression de l'étalement de la crue dans le quartier de Monplaisir, le Grand Trébon (sans Monplaisir) voit un volume supplémentaire ($12,7 \text{ hm}^3$ au lieu de $11,4$) correspondant à une surcote modérée (8 cm). Page 79. Le temps de vidange passe de 20 jours à 8 jours (cf. colonnes 5 des tableaux 4 à 6).

Pour le **scénario 6 (brèche de $984 \text{ m}^3/\text{s}$)**, le quartier de Monplaisir reste hors d'eau. La cote maximale dans le Trébon est cette fois diminuée (de 4 cm). Page 81. Le temps de vidange passe de 40 jours environ à 14 jours. Le quartier de Fourchon reste inondé (avec 4 cm de plus, mais avec un temps de vidange diminué d'une semaine).

On note donc qu'un aménagement modéré (un barreau assez court) permet de mettre hors d'eau le quartier de Monplaisir même pour le scénario 6 d'une très grosse brèche. Le quartier de Fourchon, qui est plus bas, est hors d'eau pour la crue 2003, mais pas pour le scénario 6, sauf à faire une protection spécifique. Il sera parlé de cette protection au chapitre 8.

La revanche sur le barreau est importante, mais justifiée vu les enjeux, (53 cm pour le scénario 6 ; 1,50 m pour la crue 2003).

Le **scénario 750 (brèche de $750 \text{ m}^3/\text{s}$)** n'est pas étudié (ce qui n'est pas gênant, car moins pénalisant que le scénario 6).

7.5 - Avec protection nord d'Arles, sans transfert sur Vigueirat

Voir lignes noires des tableaux de synthèse n° 4 à 6.

Ce projet a été étudié dans le cadre du pré-schéma sud (comité de pilotage du 7/7/06). Il ne comporte pas les aménagements du Vigueirat sauf le limiteur et l'ouvrage gravitaire de 20 m^2 . Restent donc (1), (2), (3), (4) et (f), voir figure 11. Cela permettait, au moment de cette étude, de séparer les aménagements sous maîtrise d'ouvrage SYMADREM (liés au barreau) et ceux qui étaient prévus sous une autre maîtrise d'ouvrage au moment de cette étude. Il ne s'agit pas en fait d'une option de projet, mais l'intérêt est de montrer ainsi le bénéfice des autres aménagements. Cela peut aussi constituer une étape intermédiaire, car tous les aménagements ne pourront raisonnablement pas être réalisés la même année. Aujourd'hui, il est acquis que la responsabilité des études de toutes les actions dans la plaine sera portée par le SYMADREM (déjà évoqué au chapitre 5).

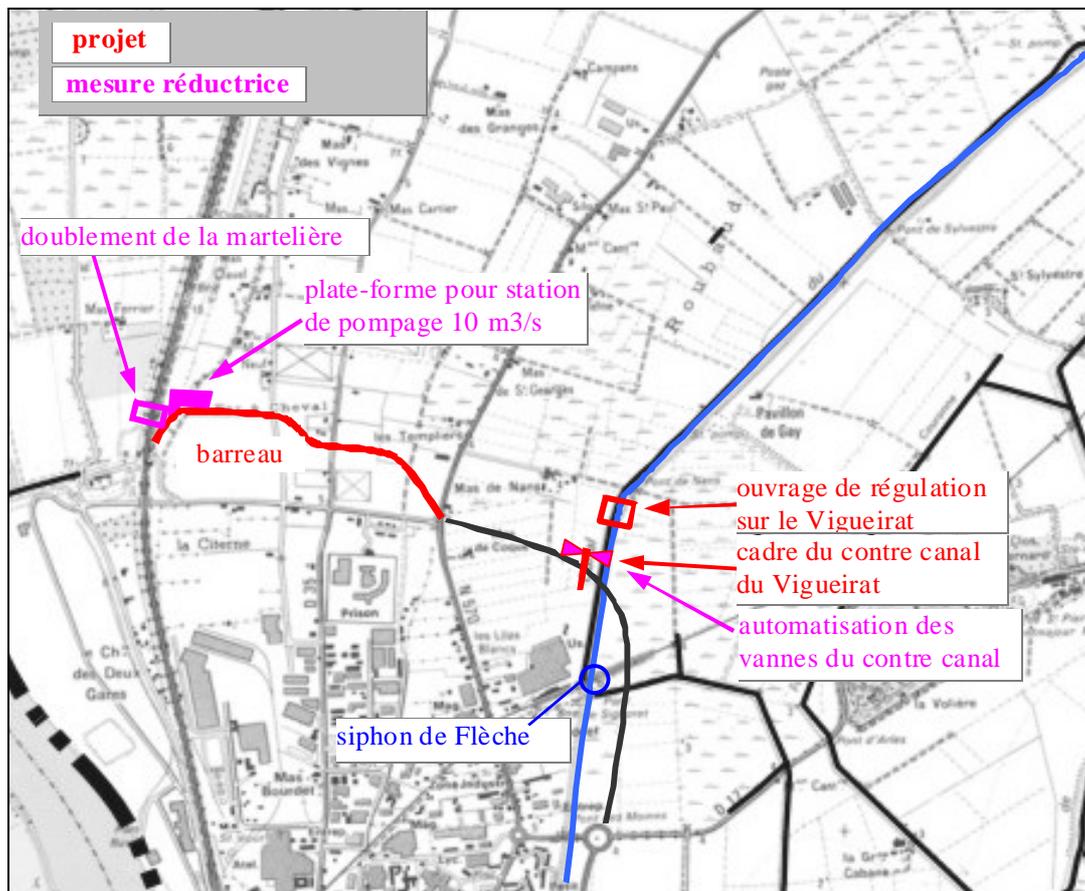


Figure 11 - schéma du barreau et des mesures complémentaires sans transparence du Vigueirat (plan 16 page 123 de l'étude EGIS [35])

Pour le scénario 2003 (page 125), le niveau dans le Trébon est augmenté non plus de 55 cm mais de 13 cm seulement, grâce au pompage. Le marais d'Arles voit 2 cm de moins, celui des Baux 36 cm de moins. Il reste une revanche de 1,45 m sur le barreau.

Scénario 750 (déversement de 750 m³/s dans le Grand Trébon et ruine du Vigueirat)

Les tableaux suivants (4 à 6) synthétisent les conséquences de cet aménagement. Le temps de vidange du casier du grand Trébon est très inférieur à celui du scénario 6. Il augmente de 4 à 6 jours du fait du barreau.

L'écoulement à travers les arches de la RD 453^N (Arles à Saint-Martin) provoque l'inondation de la zone tertiaire de Fourchon, avec ou sans barreau. Le canal du tronc commun déborde d'abord sur sa rive gauche puis sa rive droite et inonde la zone centrale de Fourchon, seulement avec 3 cm de plus qu'en situation actuelle.

D'où le projet de construire une digue en amont de la RD 453^N (et de son rond-point) et de surélever les digues du tronc commun jusqu'au siphon de Moncalde. Nous la présentons au chapitre 8 car ce n'est pas une mesure compensatoire du barreau, mais bien une protection de Fourchon à part entière. Cette digue augmente légèrement le temps de vidange du casier qui passe de 6 à 8 jours.

Cette digue en amont de la RD 453^N aggrave l'inondation du marais des Baux. La réalisation d'un canal de ressuyage dans « le col » de Fourchon à partir du rond-point de la RD 453^N permet d'améliorer la vidange de ce marais (qui sera présenté au chapitre 8). Ce canal de vidange permet de gagner un jour sur la vidange du casier.

Cette digue aggrave aussi l'inondation du quartier de Pont de Crau (11 cm sans le canal de ressuyage cité ci-dessus, 8 cm avec). Une digue de 1 km et d'environ 2 m de haut supprime cette aggravation.

Puisque le barreau possède une revanche (32 cm) pour le scénario 6, même s'il n'y a pas de brèche sur le Vigueirat amont, il en possèdera une après sécurisation du remblai RFF, puisque les volumes déversés pour la crue millénale sont en gros moitié moindre.

COMPARAISON DES COTES DANS LES CASIERS ET REVANCHE SUR BARREAU

	Casier Alpines	Casier Trébon Monplaisir			Revanche sur barreau	Casier Arles	Genouillade	Alyscamps	Fourchon
	Cote aval	Volume hm ³	Cote aval	Durée vidange		Cote	Cote	Cote	Cote
Actuel (sans brèche Vigueirat)	7,71 m	11,4 + 3,1	5,22 m	20 j page 99	/	2,06 m	vide	vide	vide
Actuel (brèche Vigueirat)	situation non susceptible de se produire (digues Vigueirat non déversantes)								
Barreau seul, sans brèche Vigueirat	7,71 m	16,6	5,77 m (+ 55 cm) page 97	> 50 j page 99	1,03 m	1,98 m (- 8 cm)	vide	vide	vide
Barreau seul, brèche Vigueirat	situation non susceptible de se produire (digues Vigueirat non déversantes). Page 97								
Barreau + ressuyage avec transfert Vigueirat	7,71 m	12,7 page 80	5,30 m (+ 8 cm) page 79	8 j (-12 j) page 79	1,50 m	2,11 m (+ 5 cm)	vide	vide	vide
Barreau + ressuyage sans transfert Vigueirat	7,71 m	13,1 page 125	5,35 m (+ 13 cm) page 124	10 j (- 10 j) page 129	1,45 m	2,04 m (- 2 cm) page 127	vide	vide	vide

Tableau 4 - premier cas : crue 2003 sans brèches

	Casier Alpines	Casier Trébon Monplaisir			Revanche sur barreau	Casier Arles	Genouillade	Alyscamps	Fourchon
	Cote aval	Volume hm ³	Cote aval	Durée vidange		Cote	Cote	Cote	Cote
Actuel (sans brèche Vigueirat)	8,02 m	29,2 + 6,2	6,31 m page 47	> 40 j page 49	/	5,28 m	5,42 m	5,25 m	4,59 m
Actuel (brèche Vigueirat) plan 10 page 95	8,02 m	20,6 + 4,7	5,78 m (- 53 cm)	34 j page 109	/	5,51 m (+ 23 cm)	5,50 m (+ 9 cm)	5,29 m (+ 4 cm)	4,75 m (+ 16 cm)
Barreau seul, sans brèche Vigueirat	8,02 m		6,48 m (+17 cm)		0,32 m page 113				
Barreau seul, brèche Vigueirat	8,02 m	21,9 page 106	5,86 m (+ 8 cm)	35 j page 109	0,94 m	5,58 m (+ 7 cm)	5,57 m (+7 cm)	5,34 (+5 cm)	4,81 (+6 cm)
Barreau + ressuyage avec transfert Vigueirat	8,02 m	29,9 page 82	6,27 m (- 4 cm) page 81	14 j page 82	0,53 m	5,35 m (+ 7 cm) page 81			4,63 m (+ 4 cm) page 82

Tableau 5 - deuxième cas : scénario 6 (brèche 984 m³/s ; 200 hm³)

COMPARAISON DES COTES DANS LES CASIERS ET REVANCHE SUR BARREAU

	Casier Alpines	Casier Trébon Monplaisir			Revanche sur barreau	Casier Arles	Genouillade	Alyscamps	Fourchon
	Cote aval	Volume hm ³	Cote aval	Durée vidange		Cote	Cote	Cote	Cote
Actuel (brèche Vigueirat) p135		29,2 + 6,2	6,31 m page 150	4 j page150	/	4,25 m			4,01 m
Barreau + ressuyage sans transfert Vigueirat			6,49 m (+ 18 cm) page 150	6 j page150	31 cm	4,30 m (+ 5 cm)			4,04 m (+ 3 cm)
Idem + digue amont RD 453 ^N			6,48 m (+ 17 cm)	8 j page150	32 cm	4,35 m (+ 10 cm)	vide	vide	vide
Idem + digue amont + canal ressuyage			6,48 m (+ 17 cm)	7 j page150	32 cm	4,32 m (+ 7 cm)	vide	vide	vide

Tableau 6 – troisième cas, scénario 750 (brèche 750 m³/s ; 90 hm³)

En conclusion du chapitre 7 :

- ✚ le barreau conserve une revanche satisfaisante sur les plus hautes eaux, avant comme après les travaux de sécurisation du remblai RFF, avec ou sans effacement des digues du Vigueirat ;
- ✚ le barreau réalisé seul est utile pour la protection du quartier de Monplaisir, jusqu'à un cas plus grave que la crue 2003 et sans doute moins grave que le scénario 6 ; au-delà, un aménagement complémentaire des digues du Vigueirat à son aval doit être étudié, puis, si nécessaire, réalisé ;
- ✚ le Vigueirat doit avoir un aménagement cohérent avec la présence du barreau et donc différent à l'amont et à l'aval :
 - en amont du barreau, la rupture des digues du Vigueirat porterait préjudice au quartier de Fourchon et aux routes, d'où le projet de le sécuriser par un ouvrage de transfert sur les deux digues (action BA4f) ;
 - en aval du barreau, il doit fermer la protection du quartier de Monplaisir, au moins jusqu'à la roubine du Roy ; la nécessité de rehausser ses digues (ou au moins l'une d'elle) reste à étudier ; cette étude doit envisager les deux étapes, avant puis après sécurisation du remblai ferroviaire, ou celle qui est la plus pénalisante des deux (a priori, avant sécurisation) ;
- ✚ la zone tertiaire de Fourchon peut être protégée par une digue basse placée en amont de la RD 453^N (action BA4g) ; cette protection n'est pas dictée par la construction du barreau nord ;
- ✚ la vidange du casier des anciens marais peut être améliorée par un nouveau chenal qui traverse le verrou de Fourchon pour rejoindre le canal de navigation (action BA4d) ;
- ✚ il reste à étudier de manière coordonnée ou regroupée l'éventuelle transparence partielle ou totale du canal des Alpines (BA4e) et dans le cadre de l'étude de gestion des eaux déversées en rive gauche la réalisation d'une digue de protection des quartiers sud de Tarascon (action BA4b) ;
- ✚ nous insistons sur le fait que la future étude de gestion des eaux déversées en rive gauche, qui va correspondre aux actions BA4a à BA4g, doit envisager deux hypothèses :
 - le remblai RFF n'est pas encore sécurisé et une brèche peut se produire, comme dans les scénarios 6 ou 750 du pré-schéma sud ;
 - le remblai RFF est sécurisé, et il faut gérer les déversements.

8 - Protection de Fourchon

Pour protéger la zone tertiaire de Fourchon, il est prévu une digue en amont de la RD 453^N et la surélévation de la digue gauche du tronc commun (de la RD 453^N jusqu'au siphon de Moncalde). Cette protection est souhaitable, même en l'absence de la protection nord d'Arles. Deux options sont possibles, soit de s'appuyer sur l'actuelle route, soit de créer une digue en parallèle de la route, côté amont (figure 12 en rose). La cote de la digue serait de l'ordre de 5,0 m selon l'étude pour le scénario 750, ce qui ferait une digue de l'ordre de 2,5 m de hauteur. Cette digue aggrave aussi l'inondation du quartier de Pont de Crau (11 cm sans le canal de ressuyage cité ci-dessous, 8 cm avec). Une digue de 1 km et d'environ 2 m de haut supprime cette aggravation (figure 12 en jaune). Position et cote de cet endiguement devront être ajustées dans l'étude de gestion des débits déversés en rive gauche. C'est l'ensemble de ces deux digues qui constitue l'action BA4g du pré-schéma sud.

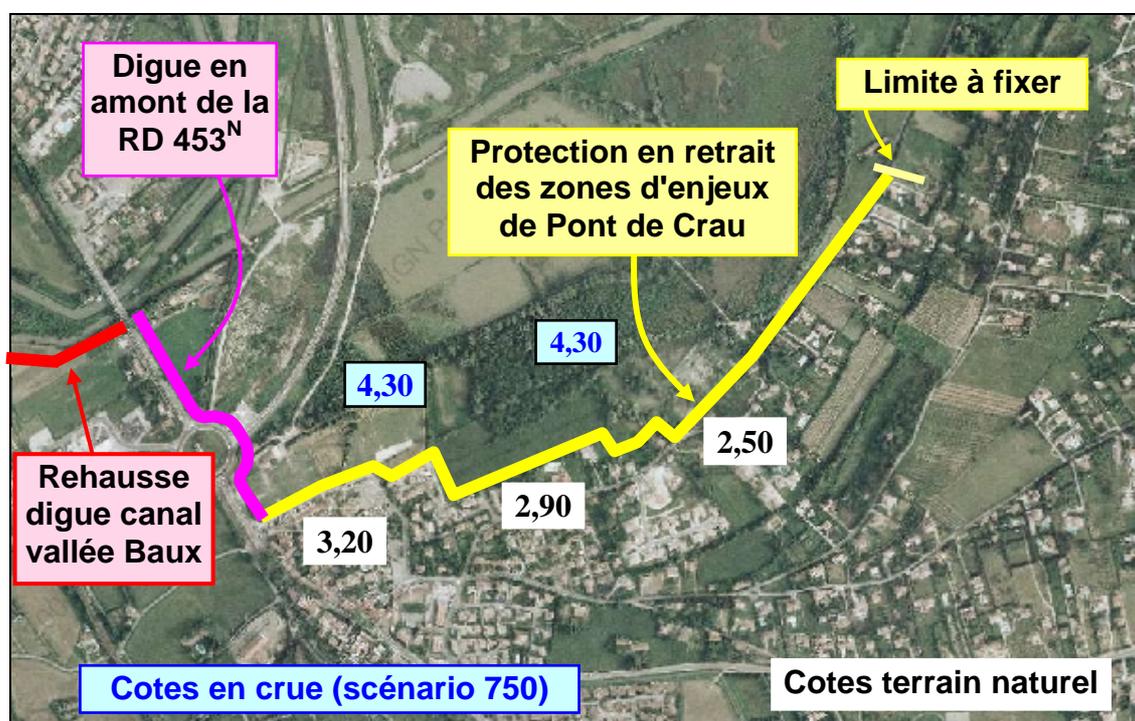


Figure 12 : localisation schématique de la protection de Fourchon (source EGIS, figures 70, 71)

Cette digue en amont aggrave l'inondation du casier des anciens marais d'Arles et des Baux. D'où le projet d'un nouveau canal de ressuyage dans « le col » de Fourchon à partir du rond-point de la RD 453^N pour contribuer à vidanger le casier. Comme le canal du marais des Baux (tronc commun), il rejoint le canal de navigation (figure 13). Il s'agit de l'action BA4d du pré-schéma sud.

L'impact de ces deux actions a été étudié pour le scénario 750. La présence du barreau n'aggrave la situation à Fourchon que de 3 cm. Le projet de digue de protection de Fourchon est donc bien une action autonome.

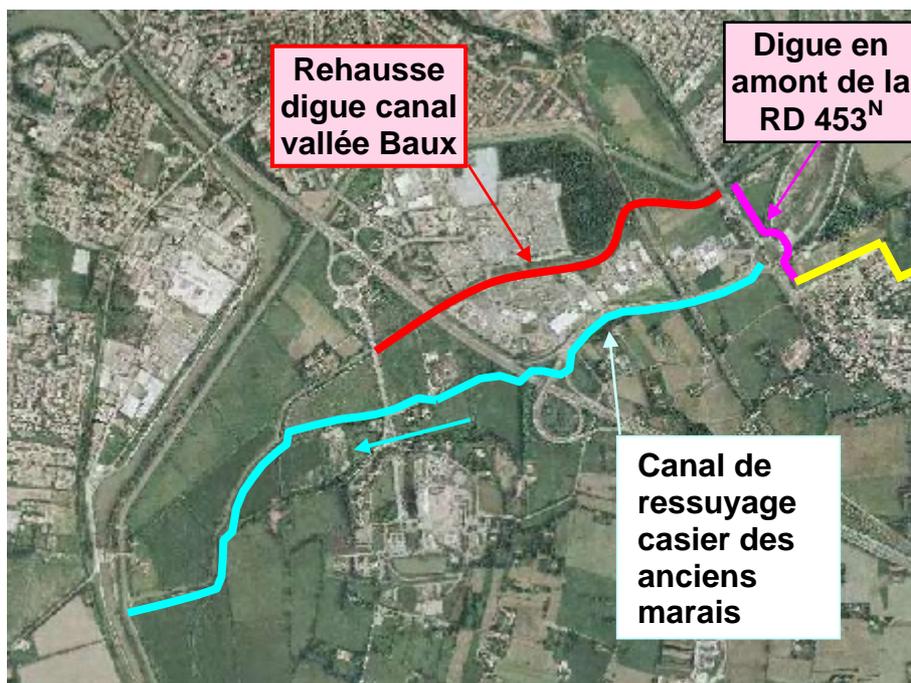


Figure 13 - localisation schématique du projet du canal supplémentaire de ressuyage dans Fourchon (source EGIS, figures 70 à 72)

Les travaux de protection de Fourchon seront à revoir en fonction des aménagements prévus pour sécuriser le remblai ferroviaire. C'est l'objet de la future étude de gestion des eaux déversées dans la plaine rive gauche que le SYMADREM s'apprête à lancer. L'étude réalisée à ce jour a l'intérêt de montrer que pour le scénario 750, la protection de Fourchon est une affaire possible. Pour le scénario 6, plus pénalisant, n'ont été regardées que les aggravations (fort modérées dues au barreau, mais pas les parades). Le tableau ci-dessous compare les conditions de déversement prévues à l'issue de l'étude de calage de CNR (résultats provisoires) en les comparant aux scénarios 6 et 750. La protection de Fourchon après sécurisation du remblai RFF est donc tout à fait réalisable techniquement pour le cas d'une crue de référence type 1856, nettement moins pénalisante que le scénario 750. Pour la crue millénale, cela devrait l'être aussi moyennant un ajustement, puisque le volume à traiter est plus élevé de 20 % (109 hm³ contre 90). Le débit de pointe est plus fort de 30 %, mais à Fourchon, c'est bien le volume qui constitue la difficulté.

	Débit déversé	Volume déversé
Scénario 6 (avec brèche)	984 m ³ /s	200 hm ³
Scénario 750 (avec brèche)	750 m ³ /s	90 hm ³
Déversement contrôlé pour 1856 (12500 m ³ /s)	406 m ³ /s	33 hm ³
Déversement contrôlé pour Q1000	1 008 m ³ /s	109 hm ³

9 - Protection sud de Tarascon

Cette action est prévue au pré-schéma sud sous le code BA4b (voir chapitre 5 et figure 6).

En décembre 2003, les brèches sur les trémies en inondant le canal des Alpines ont fait craindre que les quartiers sud de Tarascon ne soient inondés depuis l'aval par effet de remous.

Avant sécurisation du remblai RFF, les études d'impact de la protection nord d'Arles montraient que le barreau prévu a une incidence sur le casier du Grand Trébon. Pour le scénario 6, le niveau de l'eau au sud du Grand Trébon est augmenté de 17 cm si les digues du Vigueirat tiennent ou de 8 seulement si elles lâchent (tableau 5). Par contre, l'incidence du barreau sur le casier des Alpines est nulle.

Après sécurisation du remblai RFF, des déversements se produiront dans l'ensemble formé par les casiers des Alpines et du Grand Trébon. L'étude de gestion des eaux déversées sur la rive gauche permettra de voir les conséquences sur le casier des Alpines. Ces résultats dépendront de la façon dont la transparence du canal des Alpines sera assurée, c'est-à-dire qu'elle dépendra de l'action BA4e qui est à mener sous la maîtrise d'ouvrage de l'ASA du canal des Alpines.

La solution technique de transparence du canal des Alpines n'est pas un sujet délicat. Elle est possible par exemple par une large échancrure et un passage en siphon sous cette échancrure. C'est ainsi que le canal du bas Rhône Languedoc traverse la vallée du Vidourle ;

En cas de transparence totale du canal, il est possible que les quartiers sud de Tarascon n'aient pas à subir d'inondation venant du sud, l'étude le dira. Dans le cas contraire, une petite digue est-ouest éviterait l'inondation du sud de Tarascon, à l'est de l'usine Tembec, par effet de remous.

Il était important que l'étude de la protection sud de Tarascon fasse partie intégrante de l'étude de gestion des eaux déversées en rive gauche, ce qui est maintenant acquis. Nous prenons aussi note que l'étude de transparence du canal des Alpines (BA4e) sera intégrée à cette étude de gestion des eaux déversées. Le choix de la maîtrise d'ouvrage des travaux sur ce canal pourra être vu ultérieurement entre le SYMADREM et l'ASA du canal des Alpines.

10 - Projet de canal de contournement d'Arles

10.1 - Comment est née l'idée d'un canal de contournement ?

10.1.1 - Chronologie

Le processus d'études (cf. figure 14) qui a conduit au Plan Rhône, et à sa déclinaison sous forme de pré-schéma Sud (à l'aval de Beaucaire), a duré plusieurs années. La ville de Tarascon a proposé une autre piste, sous la forme d'un canal de contournement de la ville d'Arles, en août 2007. La définition précise de la géométrie de ce canal et de ses objectifs a été confiée par la commune de Tarascon au Bureau d'Etudes Delft Hydraulics.

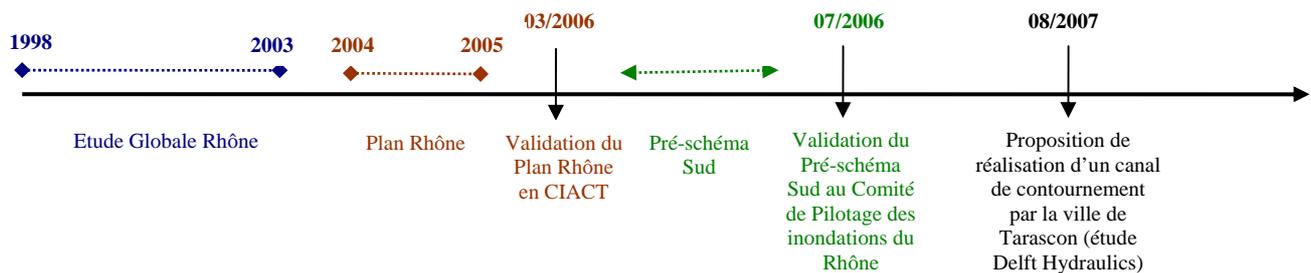


Figure 14 - historique simplifié des études

10.1.2 - Les raisons de cette proposition

Le Plan Rhône pose comme principe de protéger les secteurs les plus densément peuplés (zones urbanisées de Tarascon, Beaucaire et Arles). Afin d'assurer une protection contre la crue millénaire des quartiers urbains d'Arles, le Plan définit une protection moindre (supérieure à la crue centennale toutefois) dans les secteurs avec moins d'enjeux. Parmi ces zones se trouvent la Plaine du Trébon (secteur inondé lors de la crue de 2003), située pour partie sur la commune de Tarascon.

La commune considère que la protection offerte pour la zone du Trébon n'est pas satisfaisante. Elle a donc pris le parti d'étudier une solution complémentaire au Plan Rhône, sous forme d'un canal de contournement de la ville d'Arles.

10.1.3 - L'objectif du canal de contournement

La faisabilité de la solution proposée par la ville de Tarascon, a fait l'objet d'une première approche par le Bureau d'Etudes Delft Hydraulics entre les mois d'août et d'octobre 2007.

L'objectif principal affiché par l'étude serait d'abaisser les lignes d'eau entre Tarascon et Arles suffisamment pour éviter les débordements dans l'hypothèse d'une crue supérieure à celle de 2003. Dans cette perspective, le canal reliant le Petit Rhône et le Grand Rhône aurait pour rôle de minimiser les conséquences hydrauliques du goulet d'Arles. En effet, le rétrécissement du Rhône dans la traversée d'Arles offre un obstacle à l'écoulement.

Le canal de contournement dériverait ainsi une partie du débit directement à l'aval d'Arles, via le Petit Rhône.

10.2 - La modélisation numérique du canal de contournement

10.2.1 - L'intégration dans la modélisation 2D de la CNR

La première étude (niveau faisabilité) réalisée par Delft Hydraulics ([25] et [27]) laissait entrevoir des résultats intéressants. En effet, elle prévoyait un abaissement de la ligne d'eau entre Tarascon et Arles de 65 cm pour une crue millénale et concluait sur la nécessité d'affiner les résultats préliminaires à l'aide d'une modélisation numérique.

Le SYMADREM, en accord avec la ville de Tarascon et avec Delft, a demandé à la CNR d'étudier la solution du canal de contournement, en l'intégrant dans le modèle 2D qui venait d'être mis au point. Après l'étude par CNR d'un premier scénario défini par Delft, il a été prévu de pouvoir étudier un second scénario, également défini par Delft au vu des résultats du premier.

Les deux solutions définies par Delft proposent une implantation identique du canal. Les différences concernent le profil en long (pente, altitude des déversoirs en entrée et en sortie, ouvrages annexes), la géométrie (largeur différente) et la définition des ouvrages complémentaires (deux déversoirs sur le Grand Rhône dans le premier cas, un seul pour le second). Une autre différence, essentielle, réside dans le fait que le deuxième scénario envisage la réalisation complémentaire d'un ouvrage déversant (de 48 m de longueur), fonctionnant à l'aide de clapets, sur le tronçon entre Tarascon et Arles.

L'intégration du canal et de ses aménagements connexes (cf. ci-dessous) a nécessité plusieurs aménagements du modèle CNR initial :

- le premier scénario prévoyant de dériver (déversoir n°1) une partie des eaux du Grand Rhône vers la Camargue insulaire à l'aide d'un canal complémentaire (à réaliser), la zone comprise entre les deux bras du Rhône a du être modélisée ; elle a ainsi été considérée comme un ensemble de casiers (comme pour une modélisation monodimensionnelle) uniquement reliés au modèle 2D via le déversoir n°1 et son canal d'amenée (cf. figure 15) ; au-delà de la cote 2 NGF, les eaux sont réputées se déverser vers la mer par-dessus la digue existante ;
- les deux scénarios projettent de dériver également les eaux du Grand Rhône par un deuxième déversoir en aval du déversoir n°1. Là encore, un canal serait nécessaire, il relierait le déversoir n°2 à un ancien canal existant (canal du Japon), évacuant les débits jusqu'à la mer.

Ces aménagements du modèle initial ont pour conséquence de rendre optimistes les résultats des simulations intégrant le canal pour ce qui concerne les volumes (et donc les niveaux atteints) déversés dans la Camargue insulaire (les échanges entre la rive gauche du Petit Rhône, la rive droite du Grand Rhône et la Camargue, autres que ceux qui passent par le déversoir n°1, ne sont pas représentés). De même, les débits transitant par l'ancien canal du Japon sont supposés se déverser directement dans la mer. Toutefois, les conditions d'évacuation de ces débits vers la mer (dans le cas de niveau marin élevé notamment) pourraient s'avérer délicates dans certaines situations.

Les objectifs de ces simulations n'étaient toutefois pas d'étudier en détail toutes ces conséquences, mais d'évaluer la faisabilité de la solution « canal de contournement ».

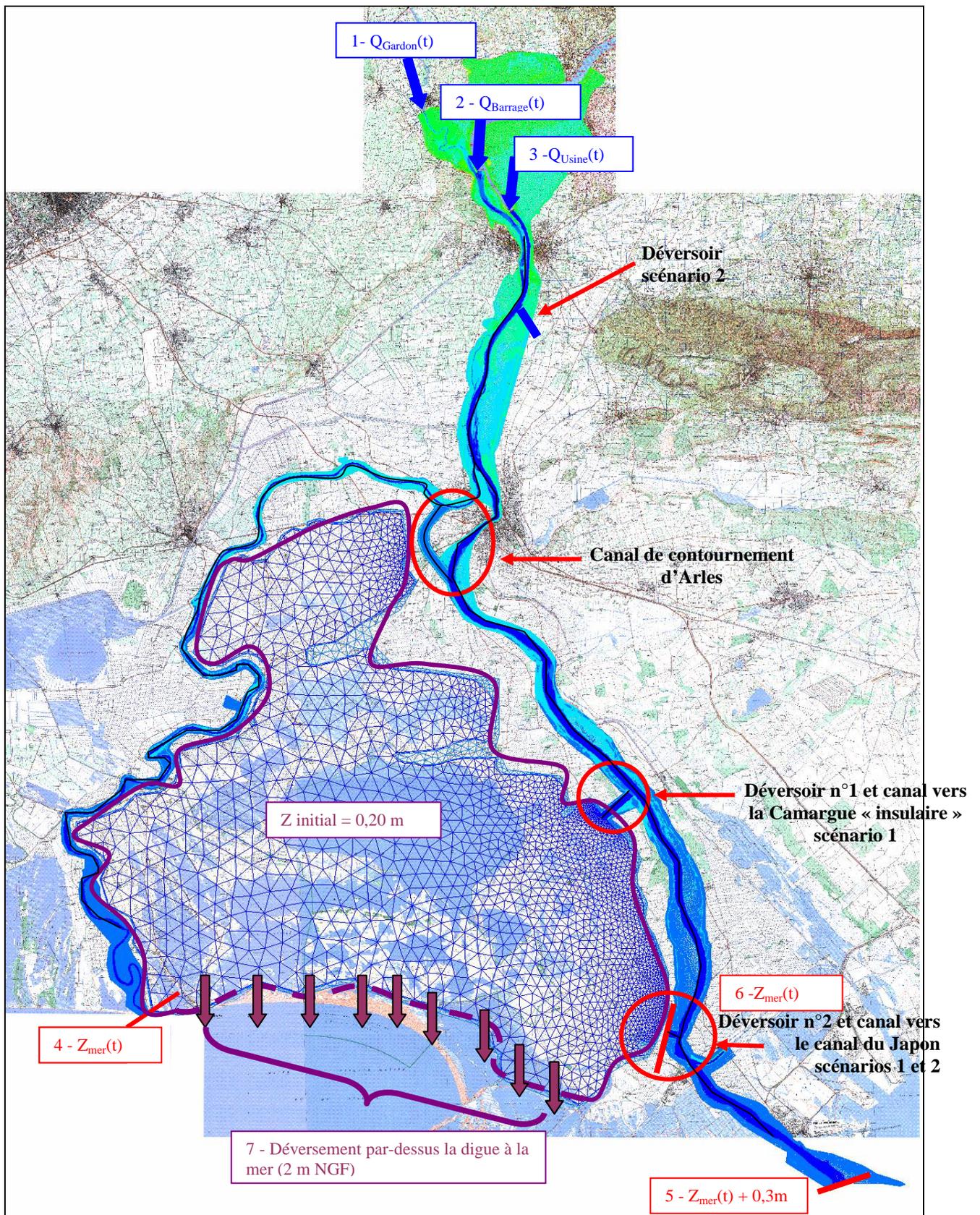


Figure 15 - emprise du modèle CNR (avec le canal et les aménagements complémentaires) et conditions aux limites. Source CNR [35]

10.2.2 - Le premier scénario

Principes de dimensionnement

La première proposition de dimensionnement, faite par Delft Hydraulics pour la commune de Tarascon, fixait les caractéristiques suivantes (figure 16) :

- largeur du canal : 400 m ;
- cote du fond : de 2 m NGF (en amont à l'amorce avec le Petit Rhône) à 0 NGF (à l'aval à la confluence avec le Grand Rhône) ;
- débit de début de déversement du Petit Rhône vers le canal : 4 000 m³/s à Beaucaire, soit un calage du déversoir à la cote 3,85 NGF (estimation CNR) ;
- largeur du déversoir sur le Petit Rhône : 600 m.

Par ailleurs, pour assurer un fonctionnement hydraulique cohérent, des aménagements complémentaires seraient nécessaires :

- abaissement des ségonnaux de 2 m entre la défluence et l'entrée du canal (sur le Petit Rhône) ;
- transparence hydraulique à assurer au droit de la RD 113^N, de la RD 572^N et du pont suspendu ;
- construction d'un déversoir (n°1) sur le Grand Rhône (PK 301) et d'un canal de jonction pour évacuer les débits supplémentaires (à partir de 4 000 m³/s à Beaucaire) vers l'étang du Vaccarès ;
- construction d'un déversoir de 400 m de long (n°2), toujours en rive droite, en amont de la ville des Salins de Giraud (PK 315), calé lui-aussi pour fonctionner à partir de 4 000 m³/s à Beaucaire (soit à partir d'une cote de 1,3 NGF au PK 315 selon CNR). Ce déversoir nécessitera également la construction d'un canal pour évacuer les débits supplémentaires vers l'ancien canal du Japon.

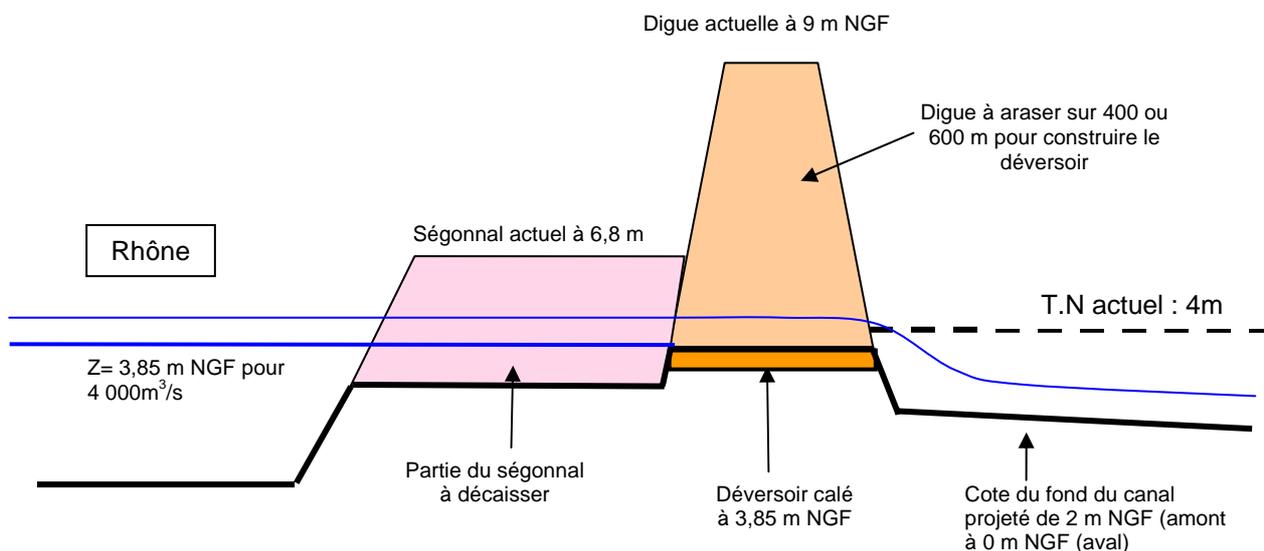


Figure 16 - coupe du projet au niveau du déversoir amont sur le Petit Rhône (d'après note CNR)

Les résultats obtenus

Débits à Beaucaire	11 500 m ³ /s		12 500 m ³ /s		14 160 m ³ /s	
	Sans canal	Avec canal	Sans canal	Avec canal	Sans canal	Avec canal
Difffluence	11 390 m ³ /s	11 390 m ³ /s	11 890 m ³ /s	12 240 m ³ /s	12 200 m ³ /s	12 790 m ³ /s
Petit Rhône amont du canal	1 400 m ³ /s	2 770 m ³ /s	1 530 m ³ /s	3 060 m ³ /s	1 600 m ³ /s	3 250 m ³ /s
Traversée d'Arles	9 990 m ³ /s	8 620 m ³ /s	10 360 m ³ /s	9 180 m ³ /s	10 610 m ³ /s	9 540 m ³ /s
Canal	/	1 780 m ³ /s	/	1 975 m ³ /s	/	2 100 m ³ /s
Grand Rhône aval canal	9 860 m ³ /s	10 315 m ³ /s	10 340 m ³ /s	11 070 m ³ /s	10 540 m ³ /s	11 530 m ³ /s

Tableau 7 - répartition des débits pour le scénario 1 (d'après étude CNR)

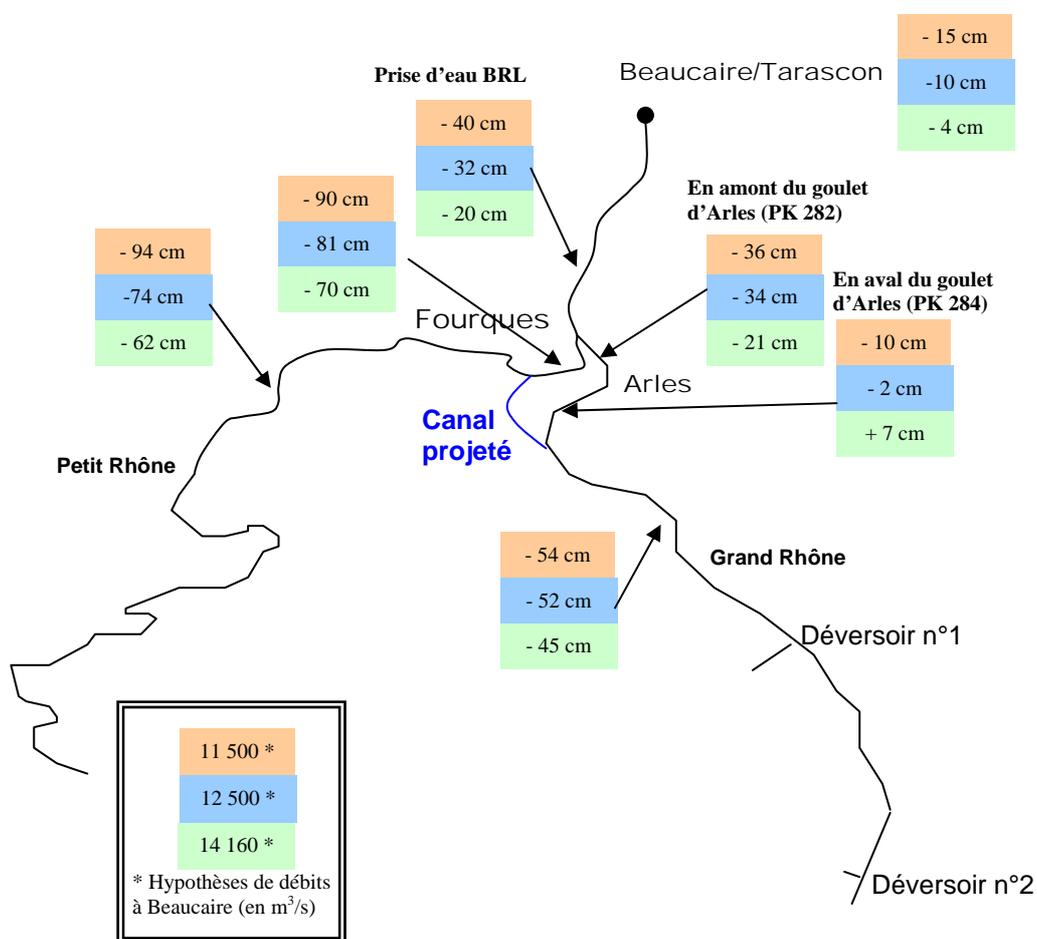


Figure 17 - impact du scénario n°1 sur les niveaux maximum

Quelle que soit la situation modélisée, le projet conduirait à (figure 17) :

- une meilleure débitance dans le tronçon Beaucaire/Tarascon – Fourques. La ligne d'eau (par rapport à celle de l'état « initial » de l'étude de calage [36]) serait ainsi réduite :
 - à Beaucaire, de 15 cm (2003), de 10 cm (1856) et de 4 cm (crue millénale) ;
 - au niveau de la prise d'eau BRL, de 40 cm (2003), de 32 cm (1856) et de 20 cm (crue millénale) ;
 - et à Fourques, de 90 cm à 70 cm.Cependant, même avec cet abaissement de la ligne d'eau, la crue type 1856 (crue de référence) déborderait sur ce tronçon ;
- une réduction du débit dans le Petit Rhône à l'aval de Fourques ; la ligne d'eau serait ainsi significativement réduite à St-Gilles (entre 62 et 94 cm selon les cas) ;
- une augmentation du débit du Grand Rhône à l'aval du canal de contournement, puis une réduction grâce aux déversoirs aval ; la ligne d'eau augmenterait de 7 cm en Arles au PK 284 (à l'aval du pont de la RD 113^N), mais serait réduite de 21 cm au PK 282 (en amont du pont de Trinquette) pour la situation millénale ; pour les deux autres situations, la ligne d'eau serait réduite en Arles d'environ 35 cm en amont et de 2 (1856) à 10 cm (2003) en aval ;
- des volumes importants déversés dans la Camargue insulaire (entre 320 et 2 400 millions de m³) et dans le canal du Japon et donc une surélévation du niveau dans la Camargue de 67 cm à 5 m.

On peut donc conclure que le scénario n°1 :

- contribuerait à réduire de manière sensible les niveaux depuis la prise d'eau BRL vers l'aval à la fois sur le Petit et le Grand Rhône, sauf pour la traversée d'Arles (en aval du PK 282,5) ;
- aurait un effet plus limité en traversée d'Arles (où la ligne d'eau serait même augmentée pour la crue millénale) et à Beaucaire ;
- ne permettrait pas d'éviter les débordements pour la crue de référence (12 500 m³/s à Beaucaire) entre Tarascon/Beaucaire et Arles/Fourques.

10.2.3 - Le second scénario

Suite à la simulation du premier scénario, Delft Hydraulics s'est appuyé sur une modélisation monodimensionnelle sommaire pour définir le scénario n°2. La définition des nouvelles hypothèses a fait l'objet d'un document de Delft intitulé « Définition du second tir de calcul – Version 4 du 21 octobre 2008 », dont le texte est annexé à l'étude de CNR [37].

Il n'est plus question dans ce document d'empêcher les débordements entre Tarascon et Arles (toutes rives confondues) pour la crue millénale (14 160 m³/s). Ainsi, un déversoir latéral y est défini, déversoir localisé entre Tarascon et Arles et fonctionnant à partir de 12 500 m³/s (soit le débit maximum atteint par la crue de 1856). Les objectifs affichés à ce stade sont les suivants :

- « diminution ou même suppression des déversements amont du défluent par rehaussement ou rétrécissement du déversoir entre Beaucaire et Arles » ;
- « agrandissement de la débitance du Petit Rhône entre le défluent et le canal afin de « tirer » plus d'eau vers le Petit Rhône » ;
- « optimisation de l'écoulement du Petit Rhône (traitement de la végétation et décorsetage) ».

Principes de dimensionnement

La position ainsi que la largeur du canal de contournement et le déversoir n°2 sur le Grand Rhône (PK 315,6) resteraient inchangés. Les modifications par rapport au premier scénario sont :

- l'ensemble des digues de Beaucaire à la mer (y compris les protections d'Arles, de Beaucaire et de Tarascon) seraient rehaussées afin d'éviter tout débordement ;
- un déversoir entre Tarascon et Arles (PK 271) aurait pour objectif d'évacuer les débits vers le lit majeur à partir de 12 510 m³/s à Beaucaire (soit un débit juste supérieur au maximum de la crue

type 1856) ; ce déversoir calé à la cote 7,5 m NGF aurait une longueur de 48 m et un système de clapets contrôlerait son ouverture ;

- le profil en long du canal projeté change : la cote du fond varierait de -2 NGF (en amont à l'amorce avec le Petit Rhône) à -2,50 NGF (à l'aval à la confluence avec le Grand Rhône) pour la partie la plus profonde du canal (appelée lit mineur) ; une partie du canal pourrait être construite en risberme à + 2,50 NGF (appelée lit majeur) ;
- le débit de début de déversement du Petit Rhône vers le canal se situerait à 11 600m³/s (soit juste supérieur à la crue de 2003) à Beaucaire (au lieu des 4 000 m³/s initiaux) ; la longueur du déversoir serait réduite à 400 m (au lieu de 600) ;
- les ségonnaux seraient abaissés de 4,5 m (au lieu de 2 dans le scénario 1) entre la diffifluence (PK 280) et l'entrée du canal (PK 283 sur le Petit Rhône) ;
- le déversoir n°1 sur le Grand Rhône n'est plus prévu.

Les résultats obtenus

Débits à Beaucaire	11 500 m ³ /s		12 500 m ³ /s		14 160 m ³ /s	
	Sans canal	Avec canal	Sans canal	Avec canal	Sans canal	Avec canal
Diffifluence	11 270 m ³ /s	11 310 m ³ /s	11 890 m ³ /s	12 400 m ³ /s	12 270 m ³ /s	13 560 m ³ /s
Petit Rhône amont du canal	1 390 m ³ /s	1 370 m ³ /s	1 530 m ³ /s	3 500 m ³ /s	1 610 m ³ /s	3 920 m ³ /s
Traversée d'Arles	9 880 m ³ /s	9 940 m ³ /s	10 360 m ³ /s	8 900 m ³ /s	10 660 m ³ /s	9 640 m ³ /s
Canal	/	0 m ³ /s	/	2 300 m ³ /s	/	2 580 m ³ /s
Grand Rhône aval du canal	9 860 m ³ /s	9 920 m ³ /s	10 340 m ³ /s	11 100 m ³ /s	10 540 m ³ /s	11 900 m ³ /s

Tableau 8 - répartition des débits pour le scénario 2 (d'après étude CNR [37])

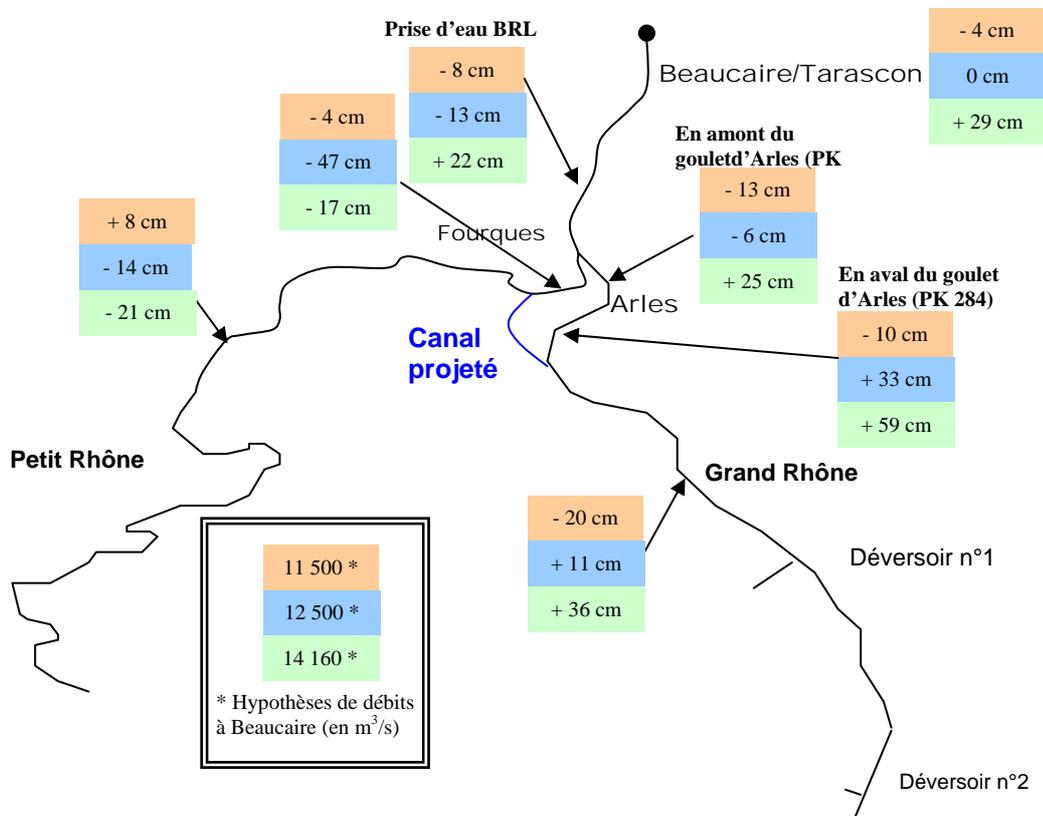


Figure 18 - impact du scénario n°2 sur les niveaux maximum

Les résultats de ce scénario 2 sont repris ci-dessous. On rappelle que les digues sont supposées être rehaussées sur tout le tracé. La comparaison s'effectue par rapport aux lignes d'eau obtenues dans l'état dit « initial » de l'étude de calage de la CNR [36], c'est-à-dire avec les digues à leur niveau actuel, supposées résistantes à la surverse (figure 18) :

- pour la crue de débit 10 500 m³/s à Beaucaire, seul le déversoir fixe sur le Grand Rhône fonctionne ; il a pour effet d'abaisser la ligne d'eau sur le Grand Rhône (de 40 cm au maximum) jusqu'à Arles (10 cm), abaissement qui continue en amont, en franchissant le goulet d'Arles puis en s'estompant progressivement (jusqu'à être nul au PK 269) ; la ligne d'eau sur le Petit Rhône est augmentée du fait de la rehausse des digues, alors qu'en état « initial » elles débordent déjà ;
- pour la crue de type 2003, les organes mobiles entre Beaucaire et Arles et vers le canal ne fonctionnent toujours pas ; dans l'état « initial », les débordements sont mineurs entre Tarascon et Arles ; on teste donc une situation quasiment analogue à la précédente ; les résultats le sont également : diminution de la ligne d'eau sur le Grand Rhône (50 cm) s'atténuant vers l'amont (10 cm à Arles et 0 au PK269), augmentation sur le Petit Rhône ;
- pour la crue type 1856, l'ouvrage de dérivation du Petit Rhône vers le canal entre en fonctionnement, le déversoir entre Beaucaire et Arles toujours pas ; la ligne d'eau du Grand Rhône serait diminuée sur environ 10 km de part et d'autre du déversoir vers le canal du Japon (PK 315), par contre elle serait augmentée au fur et à mesure que l'on se rapproche de la confluence avec le canal de contournement ; puis, la différence entre les deux lignes d'eau avoisinerait + 35 cm dans Arles ; cela correspondrait à une ligne d'eau, avec la solution canal, variant entre 7,6 et 7,75 m NGF dans Arles (Grand Rhône) en aval du pont de Trinquetaille et de 8,30 à 8,70 m NGF dans Arles (entre le PK 280 et le pont de Trinquetaille) [au niveau du « palier » observé sur la ligne d'eau au niveau du pont de Trinquetaille au goulet d'Arles, cf. partie 6.1.2] ; si l'on suppose que la protection dans Arles est rehaussée, pour les points les plus bas jusqu'à la cote 7,8 m NGF (hypothèse de l'étude CNR), la marge de sécurité (revanche) en rive gauche varierait alors entre 9 cm et 1,30 m (maximum au PK 280 au niveau du Port d'Arles) ; en rive droite, les débordements commenceraient très ponctuellement autour du PK 282,8, ailleurs la revanche varierait entre 20 cm et 1,30 m [rappel : la revanche considérée, dans la traversée d'Arles, par la CNR [36], pour le calage des digues aptes aux déversements est de 50 cm, pour la crue millénaire] ; pour la partie entre Beaucaire et Arles, la ligne d'eau avec la solution canal est légèrement plus basse que celle de l'état « initial » ; cela signifie que le canal « compense » la rehausse des digues simulée dans le scénario n°2 et qui, seule, aurait tendance à augmenter la ligne d'eau ; la ligne d'eau obtenue sur ce tronçon dépasse les cotes de protection actuelles d'une dizaine de cm en rive gauche, et jusqu'à 35 cm en rive droite.
- pour la crue millénaire, tous les organes mobiles seraient en fonctionnement. La situation serait aggravée presque partout (excepté au voisinage immédiat du déversoir sur le Grand Rhône et sur une portion du Petit Rhône), y compris en amont de Beaucaire jusqu'au barrage de Vallabrègues, la plaine d'Aramon-Montfrin et la plaine de Vallabrègues - Boulbon. Dans Arles, en aval du pont de Trinquetaille, la ligne d'eau varierait entre 7,90 et 8,10 m NGF (Grand Rhône). Le Rhône déborderait alors à plusieurs endroits dans Arles, et il faudrait rehausser les protections de l'ordre de 80 cm (au point le plus bas au PK 283), en incluant une revanche de 50 cm, en plus de la rehausse déjà envisagée jusqu'à la cote 7,8 m NGF (soit environ 70 cm). Sur le tronçon entre Beaucaire/Tarascon et Arles/Fourques, le volume déversé est de 55 millions de m³.

10.3 - Le canal de contournement : une solution intéressante ?

10.3.1 - Les premiers éléments de réponse apportés par la DIREN (avant la phase de modélisation numérique)

Les éléments repris ci-dessous sont issus d'une note rédigée par SOGREAH dans le cadre de sa mission d'Assistance à Maîtrise d'Ouvrage (DIREN) pour l'établissement du pré-schéma Sud au vu de la première version de la note de Delft Hydraulics concernant le projet de canal de contournement [27].

L'analyse de SOGREAH soulignait les deux points suivants.

1. « *Le projet va accroître les débits dans le Grand Rhône à l'aval d'Arles* ». Pour la crue millénale (14 160 m³/s à Beaucaire), et en considérant que les débits du canal projeté se rejetteraient intégralement dans le Grand Rhône (au PK 285.5), SOGREAH anticipait une majoration des débits dans le Grand Rhône (à l'aval d'Arles) de l'ordre de 1 200 m³/s. Ce surplus de débit, induirait, d'après le raisonnement, une surélévation de la ligne d'eau d'environ 60 cm qui se ferait ressentir dans Arles (par effet de remous), en aggravant les risques de débordement. Dans ce cas de figure, les déversements entre Tarascon et Arles (pour les deux rives confondues) sont considérés comme étant réduits de 60 % environ (soit 900 m³/s). Il est à noter que l'avis mentionne que pour éviter cet effet, il faudrait : « poursuivre le canal vers l'aval, éventuellement jusqu'à la mer » ou « assurer le déversement des débits renvoyés de l'amont vers la Grande Camargue par des déversoirs ». Cette dernière solution a finalement été retenue dans les scénarios proposés par Delft Hydraulics pour la modélisation numérique.
2. « *Le gabarit du Petit Rhône devra être augmenté entre la diffluence et le départ du canal* ». D'après les premiers éléments de dimensionnement (débit transitant par le canal de 1 000 à 1 400 m³/s), la note évaluait que le passage du débit supplémentaire entre la défluence et la prise d'eau du canal projeté nécessiterait une augmentation de 50 % de la section du Petit Rhône sur ce tronçon.

10.3.2 - Avis technique sur le canal de contournement

La première question est de savoir si, indépendamment des travaux qu'il impliquerait, la construction du canal améliorerait les conditions hydrauliques entre Beaucaire/Tarascon et Arles/Fourques sans dégrader celles des secteurs plus en amont ou en traversée d'Arles.

Effet du projet sur la ligne d'eau – apport vis-à-vis des débordements entre Tarascon et Arles – Conséquences en amont de Tarascon/Beaucaire

Les deux scénarios ne considèrent pas les mêmes hypothèses pour ce tronçon : le premier tient compte de cotes de protection similaires aux cotes des digues actuelles ; le second considère des protections rehaussées partout afin d'éviter tout débordement pour l'hypothèse d'une crue type 1856, et des débordements contrôlés (par un ouvrage de 48 m de long) pour les crues supérieures.

Pour le scénario n°2, il est donc important de distinguer les effets, opposés, du canal de contournement qui permettrait globalement de faire baisser la ligne d'eau sur ce secteur, et du rehaussement de toutes les protections qui aurait, lui, pour conséquence d'exhausser le niveau d'eau. La modélisation du scénario 2 montre les effets combinés des deux aménagements projetés (à partir de la simulation 12 500 m³/s puisqu'avant, le canal n'est pas en eau).

Quel que soit le scénario envisagé, le Rhône déborderait avec les cotes de protection actuelles, pour les crues type 1856 et millénale. Il faudrait rehausser ces protections (avec les hypothèses du scénario n°2 et pour la crue type 1856) d'environ 35 cm en rive droite et d'une dizaine de cm en rive gauche. Pour la rive gauche, cette valeur n'est que très théorique, car comme nous l'avons vu précédemment le remblai RFF ne résisterait probablement pas à une crue de ce type. Le scénario n°2 ne permettrait donc de toute façon pas de faire l'économie du confortement du remblai.

Il est également important de noter que, suite aux simulations réalisées lors du scénario n°1, **le scénario n°2 considère les débordements sur le tronçon Beaucaire/Tarascon – Arles/Fourques comme inévitables pour la crue millénale.**

Le rehaussement généralisé des protections (scénario 2), induirait une augmentation globale des lignes d'eau dans l'hypothèse d'une crue millénale (Q=14 160 m³/s). **Cette augmentation (plus de 30 cm) se ferait ressentir jusqu'en amont (plaine de Boulbon/Vallabrègues et d'Aramon/Montfrin et barrage de Vallabrègues).**

Conséquences pour Arles

Pour le scénario n°1, les lignes d'eau obtenues pour les scénarios avec et sans canal de contournement diffèrent d'environ 10 cm dans la traversée d'Arles (après le PK 282,5) et ce quelle que soit la situation étudiée (2003, 1856 ou crue millénale).

Pour le scénario n°2, le débit supplémentaire apporté par le canal dans le Grand Rhône à l'aval d'Arles et le rehaussement généralisé des digues ont pour conséquence d'augmenter sensiblement les lignes d'eau pour les crues type 1856 et Q₁₀₀₀. Cela imposerait des travaux de rehausse des protections dans le centre d'Arles dès la crue de 1856, rehausses pouvant atteindre 1,00 m sans aucune marge de sécurité (pour la protection de l'IRPA au PK 283, en crue millénale) et 1,50 m si l'on intègre la marge de 50 cm proposée dans l'étude CNR.

Conséquences pour la Camargue

Les volumes d'eau déversés en Camargue dans l'hypothèse du scénario n°1 seraient importants. Ils conduiraient à une inondation moyenne dépassant 3 m dans l'hypothèse de la crue de référence (1856). Le ressuyage de cette zone pourrait être très long.

Par ailleurs, le volume d'eau censé être évacué à la mer par le canal du Japon via le déversoir n°2, pourrait être bloqué, dans l'hypothèse la plus défavorable, par un niveau marin élevé. Cette hypothèse provoquerait une hausse de la cote sur une partie du profil qu'il y aurait, alors, lieu d'évaluer précisément. Cette remarque resterait valable dans l'hypothèse du scénario 2.

Les conséquences hydrauliques (amélioration ou dégradation) des différents projets proposés ne sont pas les seules à devoir être envisagées. L'évaluation des bénéfices attendus ne peut se faire qu'en relation avec les travaux que supposent ces projets et les coûts qu'ils engendreraient.

Sujétions de travaux

Le scénario 2 pose comme hypothèse le rehaussement de toutes les protections (de Tarascon/Beaucaire à la mer). Ce rehaussement concernerait à la fois les digues, mais également les ouvrages maçonnés de protection des quais d'Arles ou encore les ouvrages de protection de Beaucaire et de Tarascon.

Ce scénario préconise également la réalisation d'un ouvrage déversant, régulé par des clapets (le même système est prévu à l'entrée du canal sur le Petit Rhône). La mise en œuvre d'un tel système s'avèrerait difficile en cas de crue. D'autre part, les risques de dégradation volontaire d'un tel dispositif sont importants.

Par ailleurs, l'ouvrage de dérivation des eaux du Petit Rhône vers le canal serait un déversoir mobile de 400 m de long, qui ne fonctionnerait qu'à partir de la crue centennale, ce qui poserait des problèmes d'entretien et de maintenance.

Le profil de la figure 15 schématise les autres travaux qu'il faudrait entreprendre pour la réalisation du projet de canal de contournement (il reste valable pour les deux scénarios). Plusieurs sujétions importantes apparaissent :

- il serait nécessaire de décaisser les ségonnaux entre la défluence et la prise d'eau (en rive droite) du canal de dérivation ; ce décaissement représenterait des travaux importants (4,5 m sur environ 3 km) ;
- des terrassements seraient également nécessaires en rive gauche, au voisinage de la prise du canal pour assurer le fonctionnement hydraulique du canal (cote de début de déversement à 3,85 m NGF alors que les ségonnaux sont actuellement à 6,8 m NGF à cet endroit) ;
- la construction de l'ouvrage de déversement du Petit Rhône (de 400 m de longueur) vers le canal, nécessiterait de détruire la digue sur une hauteur de près de 6 m ;
- la construction du canal (qui occupe une emprise de 400 m sur 4,4 km) nécessiterait un décaissement de tout le profil de 1,5 à 6,5 m, soit environ 8 millions de m³ ;
- le projet inclut la construction d'un autre déversoir (sur le Grand Rhône), et d'un canal de dérivation vers le canal du Japon. La construction de cet ouvrage induirait le même type de travaux (terrassements et génie civil importants).

10.4 - Aspect géomorphologique

Le premier scénario entraîne une modification des répartitions de débit au-delà d'une crue grosso modo annuelle ($4\,000\text{ m}^3/\text{s}^{12}$) :

- sur le Petit Rhône en amont de l'entrée du canal (PK 282), une augmentation des débits ;
- sur le Petit Rhône en aval de l'entrée du canal (PK 282), une diminution des débits ;
- pour le Grand Rhône en amont de la restitution du canal (PK 285), une diminution des débits
- pour le Grand Rhône en aval de la restitution du canal (PK 285), une augmentation des débits.

Les diminutions de débit diminuent les forces tractrices et favorisent l'exhaussement du lit. Cela sera plus net sur le Petit Rhône où la diminution est forte en valeur relative (par exemple $971\text{ m}^3/\text{s}$ au lieu de 1387 pour la crue de type 2003, soit 30 % de moins).

Au contraire, les augmentations de débit vont favoriser l'enfoncement du lit comme sur le Grand Rhône en amont de Ternin ; mais justement, la présence d'un seuil rocheux devrait limiter cet impact.

L'autre conséquence a lieu à l'endroit précis de la difffluence. Au milieu du XIXe siècle, les ingénieurs ont été confrontés à l'ensablement du Petit Rhône. La navigation devenait impossible dans le Petit Rhône et les eaux arrivant en plus grande quantité sur le Grand Rhône tendaient à rendre plus sinueux le lit du grand Rhône au port d'Arles [22]. En 1863 (après la grande crue de 1856), on a donc conforté la tête amont de l'île des Sables qui sépare les deux bras par un perré maçonné, prolongé par une « digue divisoire » (un épi déflecteur) de 100 m. Cet aménagement a donné satisfaction et a permis de stabiliser l'alimentation du bras du Petit Rhône. La répartition des débits qui résulterait du canal by-pass augmenterait l'alimentation de ce bras qui passerait de 12 % à 24 %. **L'équilibre actuel serait rompu et provoquerait sans doute des problèmes qu'il est difficile de prédire mais qu'il faudrait étudier.**

Quant au canal lui-même, sa stabilité au sens géomorphologique serait à étudier. Le plus notable est la nécessité d'un entretien régulier, car ce canal étant souvent à sec sera envahi par la végétation.

Le second scénario entraîne une modification des répartitions de débit au-delà d'une crue environ centennale ($11\,600\text{ m}^3/\text{s}$) : les conséquences morphologiques devraient être très modérées, non observables en fait. Reste à étudier la stabilité du canal, celle du partiteur de débit à la difffluence et à programmer un entretien annuel du canal bien qu'il ne se mette en eau que tous les 100 ans en moyenne.

10.5 - La dérivation des eaux vers la Camargue

La question de la dérivation vers la Camargue insulaire (zone comprise entre les deux bras du Rhône) d'une partie des débits du fleuve, afin d'abaisser le niveau d'eau plus en amont, a été récurrente au cours des différentes phases d'études. D'ailleurs, le projet de canal de contournement, l'évoque clairement dans son scénario n°1 (solution abandonnée par la suite, hors débordements du canal du Japon).

Cette hypothèse a été étudiée, plus ou moins directement, à deux reprises : dans l'étude de modélisation complémentaire réalisée par le BCEOM en 2005 [12] et dans une note spécifique de SOGREAH datant de janvier 2008 [31].

¹² C'est le niveau de la petite crue d'avril 2005. La crue annuelle est estimée à $4\,280\text{ m}^3/\text{s}$ par CNR.

Les calculs effectués par le BCEOM simulent l'ouverture de deux brèches, l'une sur le Grand Rhône (avec des hypothèses de débits déversés de 1 000 et 2 000 m³/s) et l'autre sur le Petit Rhône (débit de 1 000 m³/s). Elles déversent à partir de 10 500 m³/s, les résultats sont présentés pour une crue de débit 12 500 m³/s à Beaucaire (type 1856). Ils montrent que la réduction de ligne d'eau la plus importante est obtenue avec la brèche de 2 000 m³/s sur le Grand Rhône (ce qui correspond à une inondation généralisée de la Camargue insulaire sous 50 cm à 1 m d'eau. Cette inondation aurait pour effet de réduire la ligne d'eau : de 30 cm à la défluence Grand Rhône/Petit Rhône, de 15 cm au niveau de la prise d'eau BRL et de 5 cm à Beaucaire. Ces résultats sont toutefois à considérer avec précaution, car la modélisation 1D utilisée est limitée pour représenter la dynamique des écoulements dans le goulet d'Arles. Ils sont donc probablement optimistes quant à la valeur affichée de réduction de la ligne d'eau.

Toutefois, même sur la base de ces résultats, l'inondation généralisée de la Camargue insulaire, dans ces conditions, ne permettrait pas de s'affranchir des débordements, pour une crue similaire à celle de 1856, sur le tronçon Beaucaire/Tarascon – Arles/Fourques.

Conclusion pour le projet de canal de contournement

L'objectif des aménagements proposés était de réduire suffisamment la ligne d'eau sur le tronçon Tarascon/Beaucaire – Arles/Fourques, afin d'éviter les débordements, idéalement jusqu'à la crue de référence (12 500 m³/s).

Le scénario n°1 ne permettrait pas de répondre à cet objectif, même s'il réduit légèrement les lignes d'eau.

Le scénario n°2, se place dans l'hypothèse d'une rehausse complète des digues sur tout le tracé (de Beaucaire à la mer). Il n'envisage pas une protection totale du tronçon Beaucaire/Arles pour la crue millénale, puisqu'un ouvrage de déversement est prévu sur le tronçon pour fonctionner juste au-dessus de la crue type 1856. La protection de ce secteur pour la crue de 1856 imposerait d'augmenter les protections de l'ordre de 35 cm en rive droite et 10 cm en rive gauche (le confortement du remblai RFF resterait dans tous les cas nécessaire). Cette rehausse, qui semble de prime abord possible, engendrerait des conséquences importantes dans Arles (où les protections devraient être rehaussées dès la crue type 1856 et de près d'un mètre cinquante par endroit pour la crue millénale). Les conséquences seraient également importantes en amont jusqu'au barrage de Vallabrègues (+ 30 cm par rapport à l'état « initial »).

Le canal de contournement (tout comme l'ouvrage de dérivation en entrée) ne fonctionnerait qu'à partir d'une crue centennale. Les questions de la gestion et de l'entretien de ces ouvrages, se poseraient alors.

Le projet nécessiterait une étude complémentaire des conditions d'écoulement vers la mer et vers la Camargue insulaire des débits dérivés du Grand Rhône.

Par ailleurs, en dérivant une partie du débit du Petit Rhône vers le Grand Rhône, le projet œuvre en faveur de la réduction de la ligne d'eau sur le Petit Rhône. Cette conséquence, séduisante au premier abord, aurait des incidences importantes sur la morphologie sédimentaire de toute la zone, avec en particulier un ensablement du petit Rhône.

11 - Conclusions et recommandations. Résumé

Notre rapport s'intéresse essentiellement à la rive gauche du Rhône en aval de Tarascon, même si certaines considérations portent sur les deux rives.

Le secteur concerné est bien le dernier tronçon situé en extrémité aval du Rhône. C'est donc le tronçon soumis à la plus grande variété de crues du Rhône du fait de la proximité des affluents torrentiels aval, l'Ardèche, le Gardon, la Durance. Ils peuvent suffire à transformer une forte crue en crue catastrophique. La protection de ce secteur est donc difficile. Mais la façon dont il se protège n'a pas de conséquence à l'aval, c'est la mer. Elle peut en avoir à l'amont, sur une certaine distance.

La complexité du problème nécessite des actions d'ampleur en regroupant les forces et en mettant en œuvre des études lourdes et délicates.

L'État a regroupé ses services et a associé les collectivités territoriales. Les collectivités territoriales ont mis en place un outil à la hauteur des enjeux, ou presque, le SYMADREM. Presque, parce que la digue de fait que constitue le remblai de la ligne RFF est encore le talon d'Achille pour la protection de la zone. Nous avons pu vérifier la qualité des modèles et des études entreprises d'abord dans le cadre de l'EGR, puis par le SYMADREM dans le cadre des études de projet. Nous avons aussi constaté la bonne continuité de ces deux niveaux d'étude, niveau schéma puis niveau projet. On ne s'en rendra plus compte demain, mais les études de niveau schéma étaient une étape délicate et incontournable.

La crue de 2003, dont on connaît les conséquences humaines et économiques désastreuses, a montré quelles limites avaient été dépassées de peu (cavaliers des trémies, digues rive droite du Petit Rhône...) et quelles limites étaient proches d'être dépassées (digues à Fourques, remblai RFF, verrou de Fourchon...). Elle permet ainsi d'imaginer l'ampleur de ce qui a été évité de justesse (ainsi, on peut attendre à Fourchon des hauteurs d'eau de l'ordre de 2 m et un début d'inondation 30 h après le début de déversement sur la voie ferrée). La crue de 2003 montre donc la voie des parades : ce sont des protections jusqu'à cette crue dans la continuité de ce qui existe, et des protections d'un type nouveau au-delà.

Jusqu'à la crue 2003, même légèrement plus, puisque la cible est en fait la crue 2003 sans brèches, des aménagements, non pas modérés mais simples, permettent de se protéger efficacement. Ces actions ont été réalisés en partie (confortement roubine du Roy et connexion avec le Vigueirat, palplanches du Vigueirat, rehausse de la digue droite entre Saint-Gilles et le SIP de Beaucaire inclus, confortement et rehausse des cavaliers des trémies, palplanches usine TEMBEC...). Il reste à sécuriser les digues pour cette crue, et cela concerne en particulier le remblai RFF. Il reste donc aussi à gérer la situation transitoire jusqu'au confortement du remblai RFF. Cela concerne plusieurs quartiers d'Arles : Monplaisir, la Genouillade, Fourchon... Selon que le canal des Alpines est rendu transparent ou non, il faut aussi prévoir un petit endiguement au sud de Tarascon pour éviter d'inonder des quartiers par effet de remous.

Pour les crues de type 2003 et au-delà, la sécurisation du remblai RFF est une absolue nécessité, personne n'en doute. Une crue du type de celle de 2003, a fortiori supérieure, si elle déversait pendant quelques heures sur la voie ferrée pourrait engendrer une brèche atteignant la base du remblai. Elle envahirait alors sans difficulté le Trébon en effaçant les remblais intermédiaires du canal des Alpines et du Vigueirat pour venir inonder la zone tertiaire de Fourchon imprudemment

édifiée sur la voie naturelle de l'eau. Elle inonderait Monplaisir comme en 2003, mais aussi la Genouillade, Griffeuille et les Alysamps.

Au-delà de la crue 2003, on bien est obligé de se mesurer avec le goulet d'Arles. Par la forte remontée de ligne d'eau qu'il provoque pour les grosses crues, c'est un point clé du problème. Il exclut toute solution visant à abaisser la ligne d'eau en aval. Pour empêcher les fortes hauteurs d'eau en Arles, il n'y a pas d'autre voie que de limiter le débit à la valeur maximale acceptable.

C'est ce qui a conduit l'EGR et le pré-schéma sud vers la voie des déversements contrôlés en amont qui avaient le double objectif de limiter le débit en Arles tout en excluant d'y parvenir par des déversements brutaux par rupture de digues. C'est le projet de sécurisation du remblai ferroviaire. La dérivation amont est tout naturellement la première solution qui vient à l'esprit.

La ville de Tarascon, et son conseil Delft Hydraulics, se sont placés dans la même logique de limitation de débit dans la traversée d'Arles. Mais au lieu de dériver l'eau en amont, ils la dériveraient en aval. L'idée séduit car elle joue sur la diffluence : pour envoyer moins d'eau dans le Grand Rhône, ce projet propose d'en envoyer plus sur le Petit Rhône, par un canal (ou by-pass) mettant le quartier de Trinquetaille en situation d'île.

La protection rapprochée¹³ au nord d'Arles (ou barreau) est une action urgente pour protéger Monplaisir (6 000 personnes) en cas de désordre plus ou moins grave sur le remblai ferroviaire avant qu'il ne soit sécurisé. L'urgence vient du fait qu'une crue supérieure ou égale à celle de 2003 peut très bien survenir dans les quelques années qui nous séparent de cette sécurisation. Elle vient aussi du fait que le remblai a été affaibli par la crue de 2003, ce n'est pas une simple présomption. Une crue, certes forte, mais inférieure à celle de 2003 peut aussi provoquer un désordre. Lorsque le remblai RFF sera sécurisé, cette protection rapprochée gardera toute sa signification.

Lorsqu'une protection améliore la situation de zones très densément occupées et aggrave celle de zones rurales peu densément habitées, il est fortement préférable de mettre en œuvre des parades de type passif, et donc d'exclure des ouvrages mobiles de type grands clapets ou grandes vannes. Il en irait différemment si tous se protégeaient contre le même ennemi, par exemple la mer. Pour une raison de maintenance et de difficulté à ne pas baisser la garde après de longues périodes calmes, nous recommandons également d'éviter des organes mobiles qui n'entrent en fonctionnement qu'en moyenne tous les 100 ans. Les projets du pré-schéma sud sont bien dans cette optique, pas le second scénario de canal by-pass.

Le projet de déversement long sur des tronçons de digues résistants au déversement sur les deux rives du Rhône en amont d'Arles Fourques paraît viable. Les études de gestion des eaux déversées sur chaque rive devront trouver les parades aux conséquences de ces déversements telles que protection rapprochées et facilitation du ressuyage après crue. L'étude d'impact du barreau montre la faisabilité technique de ces opérations, y compris en ce qui concerne Fourchon. Nous suggérons que l'étude de gestion des eaux déversées en rive gauche, dont nous soulignons l'urgence, considère deux situations de projet, avant et après sécurisation du remblai RFF.

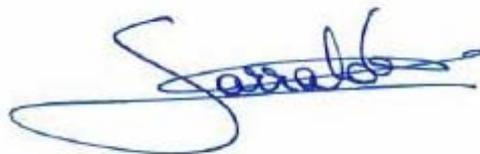
Le premier scénario de canal by-pass présente l'avantage de reposer sur des ouvrages passifs. Il présente un bénéfice modéré en amont de la diffluence, atteignant 5 cm à Tarascon pour la crue millénaire. Il n'exclut donc pas la réalisation de travaux sur les digues des deux rives pour éviter leur surverse. Sa réalisation ne diminuerait pas notablement l'ampleur des travaux à entreprendre néanmoins sur les digues. Le canal dériverait trop souvent des eaux du Petit Rhône et provoquerait

¹³ Appellation préférable à celle de digue de second rang.

son ensablement progressif. Le bras de hautes eaux que serait le canal devrait faire l'objet d'un entretien fréquent.

Au contraire, le second scénario de canal by-pass évite presque intégralement les conséquences morphologiques sur le Petit Rhône, au prix d'un grand clapet mobile qui ne sollicite le canal que pour les crues au-delà de 11 600 m³/s à Beaucaire, soit un peu plus que la crue de 2003. L'entretien régulier du lit du canal est également nécessaire, alors que, rarement sollicité, on aura tendance à l'oublier. Contrairement au premier scénario, il y a un déversement (mobile) entre Arles et Tarascon, très petit au regard de celui prévu par le SYMADREM. L'étude de ce second scénario, montre que, s'il est possible de remonter les digues sur le tronçon Beaucaire/Tarascon afin de retarder les débordements (il faudrait par exemple les remonter de 35 cm pour faire « passer » sans revanche la crue type 1856), les conséquences de cette rehausse qui concernerait tout le linéaire de Beaucaire à la mer) seraient importantes pour Arles (dès la crue 1856) et en amont de Beaucaire (pour la crue millénale). Elle fait toucher du doigt qu'au-delà de la crue 2003, le supplément de débit ne peut être entonné entre des digues même très hautes.

Au total, les diverses simulations réalisées par le SYMADREM dans la foulée du pré-schéma sud et celles qui appuient le projet de la ville de Tarascon se complètent. Elles font prendre conscience qu'au-delà d'une certaine crue, qui se trouve correspondre à peu près à celle de 2003, un peu plus que centennale, les débits supplémentaires sont très difficiles à gérer. Il faut les détourner à l'amont des enjeux et non à l'aval. En dérivant à l'amont, le bénéfice se fait sentir jusqu'à la mer. En détournant à l'aval via un canal, le bénéfice ne se fait sentir jusqu'à l'aval que pour le Petit Rhône et le bénéfice amont décroît progressivement, pour s'annuler à une distance modérée qui se chiffre ici en kilomètres. C'est cette même raison qui justifie que les zones de déversement vers le Trébon et sur la rive opposée soient situées le plus en amont possible si on veut qu'elles soient efficaces à Beaucaire, Tarascon et pour la plaine de Boulbon. Bien entendu, les plateformes industrielles des quartiers sud de Tarascon et Beaucaire constituent une limite amont infranchissable si on ne veut pas les inonder. Les baisses de ligne d'eau dues aux déversements intervenant juste en aval et les hausses de ligne d'eau dues à l'absence de déversement sur ces plateformes se compensent exactement jusqu'aux crues équivalentes à celles de 1856. Il reste un bilan en légère hausse (10 cm) pour la crue millénale. Des aménagements locaux qui restent à étudier devraient permettre de les compenser, là où ils induisent une gêne.



Gérard DEGOUTTE	Réginald SARRALDE
-----------------	-------------------

Bibliographie

	Titre	Date	Auteur	Objet	Commanditaire	P
[1]	Mission interministérielle sur les inondations de la vallée du Rhône en aval de Lyon d'octobre 1993 et de janvier 1994 ; 1 ^{ère} partie, inondations en Camargue	25/4/1994	CGPC MISE	Mission d'inspection	Ministère environnement	41
[2]	Mission interministérielle sur les inondations de la vallée du Rhône en aval de Lyon d'octobre 1993 et de janvier 1994 ; rapport de synthèse	5/1994	CGPC MISE	Mission d'inspection	Ministère environnement	
[3]	La gestion de l'eau en Camargue : la protection contre les inondations	3/5/1999	Inspection spécialisée de l'environnement (P. BALLAND, C. LEFROU, M. CONRUYT)	Mission d'inspection	Ministère de l'environnement	70
[4]	Étude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône ; étude du transport solide ; 1 ^{ère} étape : rapport de synthèse ; 2 ^{ème} étape : bilan et perspectives ; 3 ^{ème} étape, orientation de gestion	8/2000	SOGREAH	EGR	Institution interdépartementale des bassins Rhône Saône	62 58 81
[5]	Étude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône	11/2002	HYDRATEC	EGR	Etablissement public territoire Rhône	96
[6]	Gestion du risque inondation et changement social dans le delta du Rhône : les « catastrophes » de 1856 et 1993-1994	2002 ou 2003	DESMID – CNRS (B. PICON, P. ALLARD coord)	Etude historique		146
[7]	Étude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône ; modélisation hydraulique du delta ; scénarios d'aménagement de 4 ^{ème} étape	1/2003	BCEOM	EGR	Institution interdépartementale des bassins Rhône Saône	94
[8]	Étude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône ; modélisation hydraulique de la zone deltaïque du Rhône en aval de Beaucaire	1/2003	BCEOM	EGR	Institution interdépartementale des bassins Rhône Saône	191
[9]	Quai du Rhône en Arles ; étude préliminaire et diagnostic : phase 1, diagnostic technique, rapport principal	9/2003	ISL, Fugro	Protection des berges à Arles	SYMADREM	78
[9]	PV de la visite des 18 et 19/2/2004 sur la digue du syndicat intercommunal des digues de Beaucaire à la mer	2/2004	Cemagref	Contrôle de sécurité	SNRS	26
[10]	La sécurité des digues du delta du Rhône : politique de constructibilité derrière les digues. Rapport d'inspection suite à la crue de décembre 2003.	10/2004	Inspection générale de l'environnement (P. BALLAND, X. MARTIN, P. MONADIER, M. THIBAUT, B. PORTIER, C. LAURAIN, Y. NASSIET, E. ROBERT DE-SAINT-VINCENT)	Mission d'inspection / Crue de 2003	Ministère de l'environnement	104
[11]	Voie ferrée Arles Tarascon ; étude de la crue de décembre 2003 ; étude hydraulique et diagnostic du remblai	10/2004	SOGREAH	Voie ferrée Tarascon-Arles / Crue de 2003	RFF	70
[12]	Schéma de prévention des inondations du Rhône à l'aval de Beaucaire ; modélisations complémentaires	6/2005	BCEOM	Plan Rhône	DIREN Rhône-Alpes	45
[13]	Conférence de consensus : débit maximal de la	10/20	Groupe	Crue de	DIREN Rhône-	13

	crue du Rhône de décembre 2003 à Beaucaire	05	d'experts	2003	Alpes	
[14]	Protection des quartiers nord d'Arles, Mission de maîtrise d'œuvre, étude hydraulique	3/2006	BCEOM	Protection des quartiers Nord d'Arles	SYMADREM	
[15]	Assistance technique pour l'élaboration du plan de prévention contre les inondations du Rhône ; propositions d'hypothèses de travail pour les études préliminaires de la sécurisation du remblai RFF entre Beaucaire et Arles	6/2006	SOGREAH	Plan Rhône / Voie ferrée Tarascon-Arles	DIREN Rhône-Alpes	3
[16]	Les plans de prévention des risques inondation du fleuve Rhône et de ses affluents à crue lente	7/2006	DIREN Rhône-Alpes	PPri	DIREN Rhône-Alpes	97
[17]	Pré-schéma du Rhône aval ; éléments pour une stratégie de gestion des crues du Rhône à l'aval de Montélimar	7/2006	SOGREAH	Plan Rhône	DIREN Rhône-Alpes	71
[18]	Protection des quartiers nord d'Arles, Mission de maîtrise d'œuvre, scénario 750, note hydraulique	10/2006	BCEOM	Protection des quartiers Nord d'Arles	SYMADREM	30
[19]	Protection des quartiers nord d'Arles, mission de maîtrise d'œuvre ; note technique complémentaire sur le risque de submersion de la digue de protection nord	11/2006	BCEOM	Protection des quartiers Nord d'Arles	SYMADREM	7
[20]	Protection des quartiers nord d'Arles, dossier d'enquête publique. Volume 2 : étude d'impact	2/2007	BCEOM	Protection des quartiers Nord d'Arles	SYMADREM	226
[21]	Plan Rhône, pré-schéma sud : étude de calage précis entre Beaucaire et Arles et de mise en cohérence des ouvrages de protection contre les inondations en rives droite et gauche du Rhône. CCTP	3/2007	SYMADREM	Plan Rhône	SYMADREM	38
[22]	Étude historique des aménagements réalisés pour lutter contre le risque inondation dans le grand delta du Rhône	6/2007	Adrien MÉJEAN, master « gestion des catastrophes et des risques naturels » Montpellier III	Etude historique	SYMADREM	
[23]	Voie-ferrée Paris-Marseille, section Tarascon-Arles, rive gauche du Rhône ; avis sur dossier d'ouvrage	4/2007	PATOUH (CETE Méditerranée, Cemagref)	Voie ferrée Tarascon-Arles	SN Rhône Saône	45
[24]	Protection des quartiers Nord d'Arles contre les inondations : analyse du dossier de DUP	4/2007	CEREG	Protection des quartiers Nord d'Arles	Mairie de Tarascon	14
[25]	Canal de contournement d'Arles	8/2007	Delft Hydraulics	Canal de contournement	Mairie de Tarascon	15
[26]	Note sur le projet de canal de contournement d'Arles	9/2007	SOGREAH	Canal de contournement	DIREN Rhône-Alpes	5
[27]	Canal de contournement d'Arles	10/2007	Delft Hydraulics	Canal de contournement	Mairie de Tarascon	20
[28]	Plan Rhône, pré-schéma sud : étude du renforcement de la digue du Rhône rive droite entre Beaucaire et Fourques, CCTP	10/2007	SYMADREM	Plan Rhône	SYMADREM	103
[29]	Plan Rhône, pré-schéma sud : renforcement du	11/	RFF	Plan Rhône	RFF	32

	remblai ferroviaire contre les inondations en rive gauche du Rhône, avant projet de construction d'une digue accolée au remblai ferroviaire entre Tarascon et Arles. cahier des charges.	2007				
[30]	Voie-ferrée Paris-Marseille, section Tarascon-Arles, rive gauche du Rhône ; visite initiale et avis sur le dossier de synthèse	1/ 2008	PATOUH (CETE Méditerranée)	Voie ferrée Tarascon- Arles	SN Rhône Saône	15
[31]	Fonctionnement hydraulique de la Camargue et pré-schéma sud (N° 4240589 R16 v0)	1/ 2008	SOGREAH	Plan Rhône	DIREN Rhône- Alpes	7
[32]	Observations de la CNR sur les hypothèses à prendre en compte pour la modélisation du canal de contournement d'Arles	2/ 2008	CNR	Canal de contournem ent	SYMADREM	4
[33]	Plan Rhône – pré-schéma sud ; étude de calage entre Beaucaire et Arles ; rapport de phase 2 ; construction, calage et sensibilité du modèle	5/ 2008	CNR	Plan Rhône	SYMADREM	92
[34]	Plan Rhône – pré-schéma sud ; étude de calage entre Beaucaire et Arles ; modélisation du canal de contournement, résultats hydrauliques n° 1 (déversoirs calés à 4000 m³/s)	7/ 2008	CNR	Plan Rhône	SYMADREM	24
[35]	Protection des quartiers nord d'Arles ; mission de maîtrise d'œuvre ; étude hydraulique	7/ 2008	EGIS eau	Plan Rhône	SYMADREM	161
[36]	Plan Rhône – pré-schéma sud ; étude de calage entre Beaucaire et Arles ; rapport de phase 3 ; état initial, niveau maximum acceptable en traversée d'Arles, calage des ouvrages déversants et ajustement éventuel, revanche	10/ 2008	CNR	Plan Rhône	SYMADREM	121
[37]	Plan Rhône – pré-schéma sud ; étude de calage entre Beaucaire et Arles ; modélisation du canal de contournement, résultats hydrauliques n° 2	11/ 2008	CNR	Plan Rhône	SYMADREM	40 p