

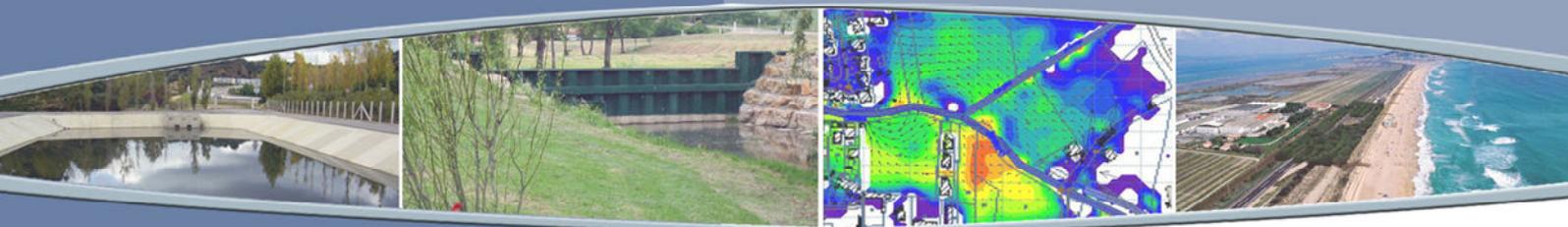
MM2436 (EX. HH2143)

# ETUDE HYDRAULIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE DESTINEE A LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA INONDATION

## PHASE 2 : ETUDE HYDRAULIQUE

### MAIRIE DE MAUSSANE-LES- ALPILLES

Août 2012





## Identification

---



® Une marque



INGEROP Conseil & Ingénierie – Région Méditerranée – Agence d'Aix en Provence  
Domaine du Petit Arbois - Pavillon Laennec - B.P 20056 - 13 545 AIX EN PROVENCE Cedex 04  
Téléphone : +33 4 42 50 83 00 - Télécopie : +33 4 42 50 83 01  
E-mail : ipseau@ingerop.com

Siège Social : 168/172, boulevard de Verdun - 92408 Courbevoie Cedex - France  
Téléphone : 33 (0) 1 49 04 55 00 - Télécopie : 33 (0) 1 49 04 57 01 - E-mail : ingerop@ingerop.com  
S.A.S. au capital de 5 800 000 € - R.C.S. Nanterre B 489 626 135 - N° Siret 489 626 135 00011 - APE 7112B - Code TVA n° FR 454 896 261 35



## Gestion de la qualité

---

Version	Date	Intitulé	Rédaction	Lecture	Validation
1	09/2011	Phase 2	JF	DC	DC
2	09/2011	Phase 2	JF	DC	DC
3	07/2012	Phase 2	JF	DC	DC
4	08/2012	Phase 2	JF	DC	DC



# Sommaire

---

<b>1.</b>	<b>CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE</b>	<b>11</b>
1.1.	CONTEXTE .....	11
1.2.	OBJECTIFS.....	12
<b>2.</b>	<b>ETUDE HYDRAULIQUE</b>	<b>13</b>
2.1.	METHODOLOGIE .....	13
2.2.	CONSTRUCTION DU MODELE .....	15
2.2.1.	<i>Données topographiques disponibles</i> .....	15
2.2.2.	<i>Modèle 1D (lit mineur des gaudres)</i> .....	15
2.2.3.	<i>Modèle 2D (lit majeur)</i> .....	19
2.2.4.	<i>Couplage 1D / 2D</i> .....	21
2.2.5.	<i>Calage du modèle</i> .....	23
2.3.	EXPLOITATION DU MODELE .....	25
2.3.1.	<i>Présentation des scénarios</i> .....	25
2.3.2.	<i>Apports du canal d'irrigation de la vallée des Baux</i> .....	26
2.3.3.	<i>Prise en compte des phénomènes d'embâcles</i> .....	27
2.3.4.	<i>Prise en compte des phénomènes de rupture de digues</i> .....	31
2.3.5.	<i>Modélisation d'une crue exceptionnelle</i> .....	37
2.4.	CARTOGRAPHIE DE L'ALEA INONDATION.....	39



## Illustrations

---

Figure 1 : Ossature du modèle 1D du lit mineur des gaudres de la Croix et de la Foux .....	17
Figure 2 : Modèle topographique du lit majeur des gaudres de la Croix et de la Foux .....	19
Figure 3 : Modèle topographique du lit majeur du gaudre de Valoste .....	20
Figure 4 : Localisation des tronçons endigués (Source : BRLi) .....	33
Figure 5 : Amorce d'érosion de la berge rive droite du gaudre de la Croix au droit du profil P21 .....	34
Figure 6 : Classes d'aléa .....	40

---



## Tableaux

---

Tableau 1 : Coefficients de rugosité retenus.....	21
Tableau 2 : Apports du canal d'irrigation de la vallée des Baux .....	27
Tableau 3 : Critères de formation d'embâcles.....	28
Tableau 4 : Critères d'obstruction de la section passante des ouvrages.....	29
Tableau 5 : Prise en compte du risque d'embâcles au niveau de chaque ouvrage.....	30
Tableau 6 : Scénarios de rupture de digues modélisés .....	35



# 1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

---

## 1.1. CONTEXTE

Le territoire de la commune de Maussane-les-Alpilles est soumis à de forts enjeux en matière d'urbanisme :

- pression foncière accrue ;
- préservation des zones naturelles et des sites Natura 2000 ;
- protection contre le risque inondation (Rhône, gaudres) ;
- maintien des zones agricoles.

La commune souhaite faire évoluer ses documents d'urbanisme pour mieux concilier ces différents enjeux. Par délibération du conseil municipal (DCM) en date du 26 février 2004, la commune a prescrit une nouvelle révision totale du POS, de manière à établir un Plan Local d'Urbanisme (PLU).

Monsieur le Préfet, conformément aux dispositions de l'article L.121-13 du Code de l'Urbanisme, a adressé le 22 février 2008 à la commune, soit avant la date d'opposabilité du document, une lettre d'observations valant suspension de l'opposabilité du document. Il pointe notamment une prise en compte incomplète du risque inondation.

Une cartographie de l'aléa inondation par les gaudres de la Foux et de la Croix, réalisée par IPSEAU en 1997, est annexée au POS opposable. Cependant, elle ne couvre pas l'ensemble du territoire communal et ne prend pas en compte ni les nouvelles directives en la matière ni les aménagements récents sur la commune.

Le complément d'analyse est demandé en référence à la circulaire interministérielle relative à la maîtrise de l'organisation et adaptation des constructions en zones inondable du 21 janvier 2004 et à la circulaire du 30 avril 2002 concernant le principe de non-densification des espaces situés derrière les digues.

Les principes de non implantation des établissements utiles à la gestion de crise et les établissements sensibles sont renforcés, même dans les zones d'aléa faible. Une priorité doit être donnée à la réduction de la vulnérabilité des bâtiments publics et à la prise de mesures pour assurer le maintien de leur fonction pendant l'épisode de crue. L'éventail des mesures peut aller de la simple surveillance

jusqu'à la démolition de certains équipements. Cette même circulaire préconise une réflexion allant au-delà de l'événement de référence pour envisager l'hypothèse exceptionnelle.

## 1.2. OBJECTIFS

Il s'agit d'une étude mêlant les approches hydrauliques et hydrogéomorphologiques permettant d'identifier le risque d'inondation lié aux débordements des différents gaudres traversant la commune de Maussane-les-Alpilles et de caractériser les niveaux d'aléa.

Les objectifs de la présente mission sont une meilleure prise en compte du risque inondation dans le projet de PLU. Les études demandées doivent permettre à la commune d'élaborer un zonage des secteurs inondables et de rédiger un règlement adapté pour ces zones inondables.

A la demande de Monsieur le Préfet, des compléments d'études seront apportés sur plusieurs points. Il s'agira notamment :

- de procéder à une analyse hydrogéomorphologique afin de déterminer le champ maximal d'expansion des crues
- de procéder à des simulations en crue centennale des effets relatifs à des dysfonctionnements d'ouvrages avec notamment la prise en compte :
  - de rupture de digue,
  - d'embâcles au droit des ouvrages de franchissement,
  - de surverse du canal d'irrigation de la vallée des Baux dans les deux gaudres au niveau des déversoirs localisés en amont de la commune
- de procéder à une simulation de la crue centennale du gaudre traversant le secteur du hameau des Calans.
- d'affiner les caractéristiques des écoulements (hauteurs et vitesses) dans le secteur du centre ancien

Cette étude se déroule en trois phases :

- ☞ Phase 1 : Etat des lieux, recueil des données et analyse hydrogéomorphologique
- ☞ Phase 2 : Modélisation hydraulique et cartographie de l'aléa inondation
- ☞ Phase 3 : Prise en compte des remarques – élaboration du document définitif

Le présent rapport constitue le rapport de la phase 2 de l'étude. Il vient en complément du rapport de la phase 1 (version 1) de décembre 2010.

## 2. ETUDE HYDRAULIQUE

---

### 2.1. METHODOLOGIE

L'analyse hydraulique vient en complément de l'approche hydrogéomorphologique dans les secteurs à enjeux. Elle est destinée à quantifier l'aléa inondation (hauteurs d'eau, vitesses d'écoulement, enveloppe de zones inondables).

Le cœur de ville de Maussane-les-Alpilles est traversé par deux gaudres : le gaudre de la Croix et le gaudre de la Foux. En partie aval de la zone urbaine, ces gaudres sont endigués dans certains tronçons. En cas de crue affectant le lit majeur, les écoulements peuvent avoir une direction différente des écoulements en lit mineur, et subir l'influence des obstacles présents sur le champ d'expansion des crues (habitations, remblais...).

Compte tenu de la complexité des phénomènes mis en jeu, une modélisation bidimensionnelle des écoulements a été réalisée. Le logiciel utilisé pour cela est **MIKE FLOOD** distribué par la société DHI (Danish Hydraulic Institute). Cet outil permet le couplage d'un modèle 1D (lit mineur) et d'un modèle 2D (lit majeur) sous les interfaces respectives **MIKE 11** et **MIKE 21**.

Le modèle bidimensionnel se compose d'un découpage fin du secteur d'étude permettant de connaître à chaque instant de simulation les hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement en chaque maille du modèle, donnant localement les caractéristiques principales d'écoulement.

**D'un point de vue global, c'est donc une description précise du champ des vitesses et des axes d'écoulements que fournit le modèle. Autrement dit, il est possible de simuler les crues des gaudres en temps réel, les vitesses, les directions d'écoulement et les hauteurs d'eau étant connues en tout point et à chaque instant.**

**En plus des gaudres de la Croix et de la Foux, le gaudre de Valoste a également été modélisé dans la traversée du hameau des Calans, selon le même principe.**



## 2.2. CONSTRUCTION DU MODELE

### 2.2.1. Données topographiques disponibles

Le modèle mathématique a été établi sur la base des levés topographiques suivants :

- Levés terrestres du centre-ville de Maussane-les-Alpilles (semis de points et profils en travers), réalisés dans le cadre de la présente étude par le Cabinet Alpilles Topographie, janvier à mai 2011 ;
- Levés de profils en travers des gaudres de la Croix et de la Foux, réalisés dans le cadre de l'étude hydraulique du bassin versant Sud des Alpilles par le Cabinet SCP Schubert Hervé en 2008 ;
- Levé d'un profil en long du gaudre de la Croix et de la Foux, réalisés dans le cadre de l'étude hydraulique du bassin versant Sud des Alpilles par le Cabinet SCP Schubert Hervé en 2008 ;
- Levé de profils en travers des gaudres de la Croix et de la Foux, réalisés dans le cadre de l'étude des zones inondables par le Cabinet A.T.G.T.S.M. en juillet 1997.
- Courbes de niveau des cartes au 1/25 000<sup>ème</sup> de l'IGN afin de compléter l'information topographique aux limites du secteur d'étude.

La partie aval des gaudres ne possédait pas une densité suffisante de profils en travers levés en 2008 pour permettre la modélisation du secteur aval. Les profils en travers de 1997 ont donc été repris, en vérifiant la représentativité de ces profils en travers sur le terrain et la variation du fond en comparant ces profils avec le profil en long réalisé en 2008. Certains de ces profils de 1997 ont donc été ajustés afin de prendre en compte notamment l'exhaussement partiel du fond du lit en partie aval.

### 2.2.2. Modèle 1D (lit mineur des gaudres)

Le modèle 1D (unidimensionnel) a été établi sous le logiciel MIKE 11. La géométrie des cours d'eau est définie par leur profil en long et les différents profils en travers.

Le gaudre de la Croix a été modélisé depuis une centaine de mètres en amont de l'aqueduc de Manville (canal d'irrigation de la vallée des Baux) jusqu'à la confluence avec la roubine de Tronflette sur la commune de Paradou, soit un linéaire total de 3 km.

Le gaudre de la Foux a été modélisé depuis une cinquantaine de mètres en amont de l'aqueduc de Flandrin (canal d'irrigation de la vallée des Baux) jusqu'au lieu dit « Le Four de Blazi » en aval du secteur d'étude, soit un linéaire total de 2.7 km.

Le gaudre de Valoste a été modélisé depuis 25 m en amont de l'aqueduc de Calans (canal d'irrigation de la vallée des Baux) jusqu'au chemin rural n°10 dit chemin « Poissonnier », soit un linéaire total de 400 m.

Le lit mineur du gaudre de la Croix comporte ainsi environ 100 profils en travers, celui du gaudre de la Foux comporte environ 90 profils en travers et une quarantaine de profils en travers pour le gaudre de Valoste.

Les hydrogrammes de crue des gaudres calculés dans l'analyse hydrologique (cf. partie 3.6 du rapport phase 1 de décembre 2010) ont été injectés à l'amont du modèle 1D ; ils constituent ainsi la condition amont du modèle. En ce qui concerne les sous-bassins versants intermédiaires, les hydrogrammes calculés par le modèle pluie-débit ont été injectés en lit mineur de manière progressive.

En condition aval, une loi hauteur-débit a été calculée au droit des profils en travers situés à l'aval des gaudres, en fonction de la géométrie de ce profil et de la pente du tronçon aval.

La figure ci-après présente une vue en plan de l'ossature du modèle 1D du gaudre de la Croix et de la Foux.

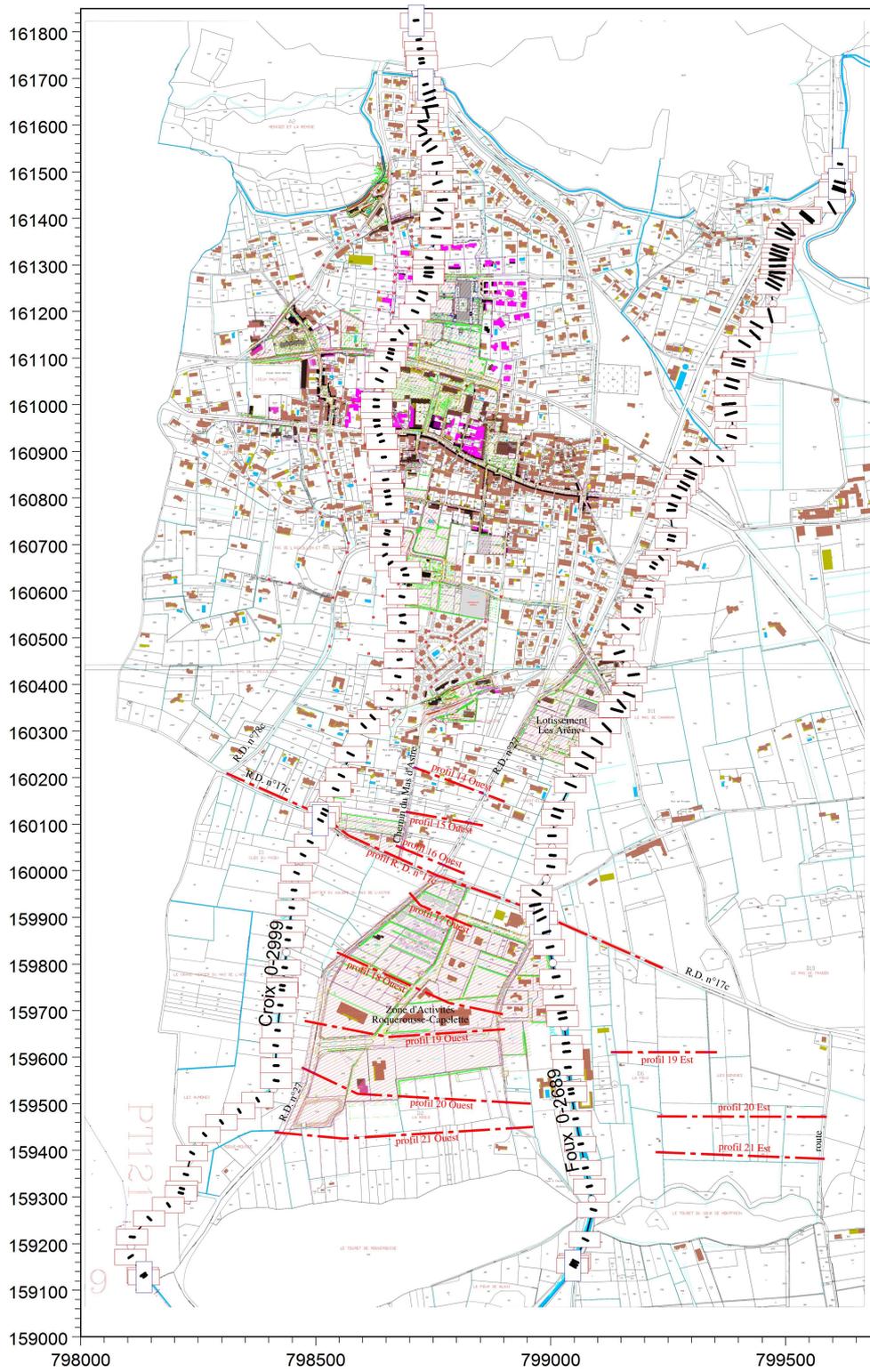
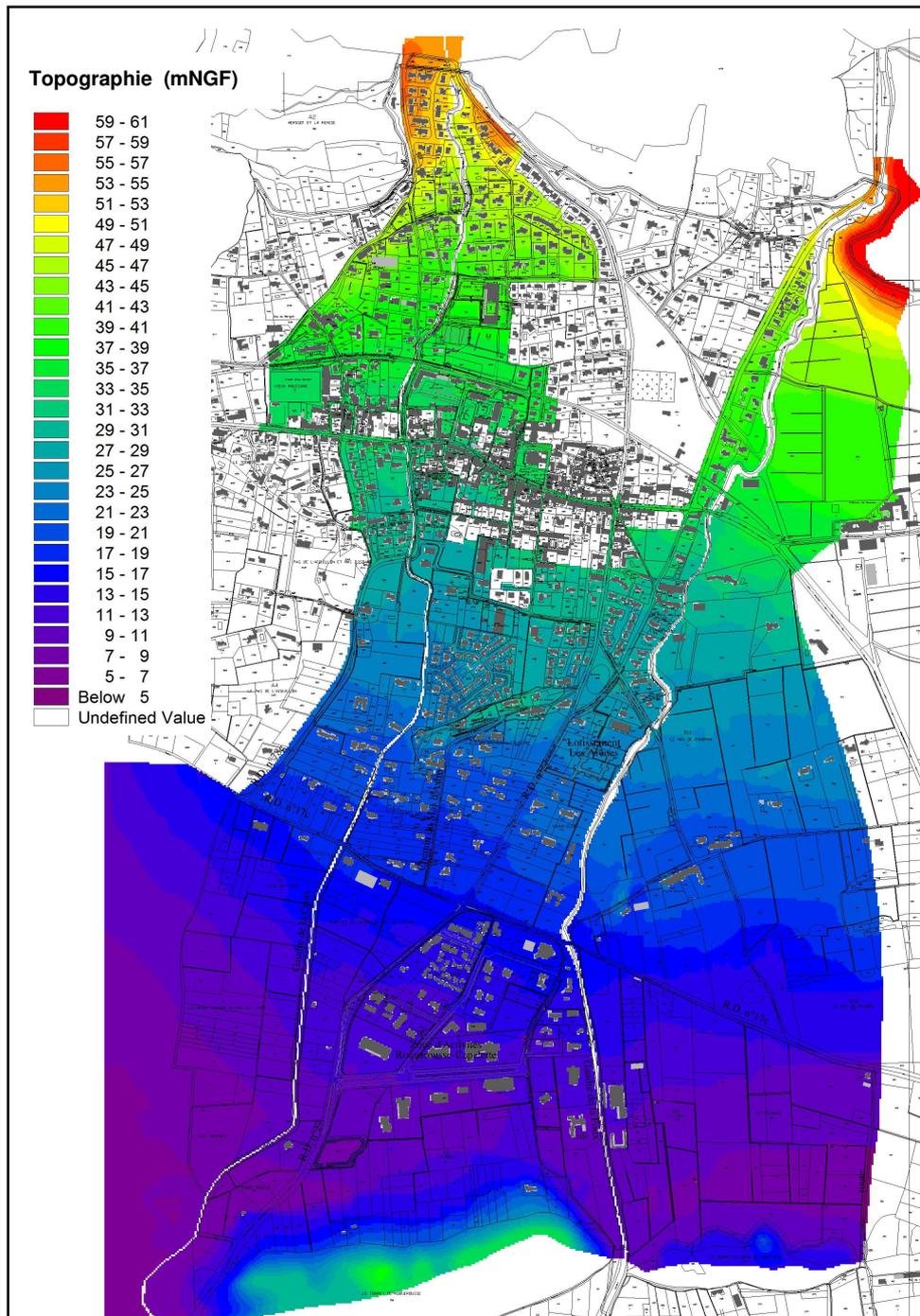


FIGURE 1 : OSSATURE DU MODELE 1D DU LIT MINEUR DES GAUDRES DE LA CROIX ET DE LA FOUX



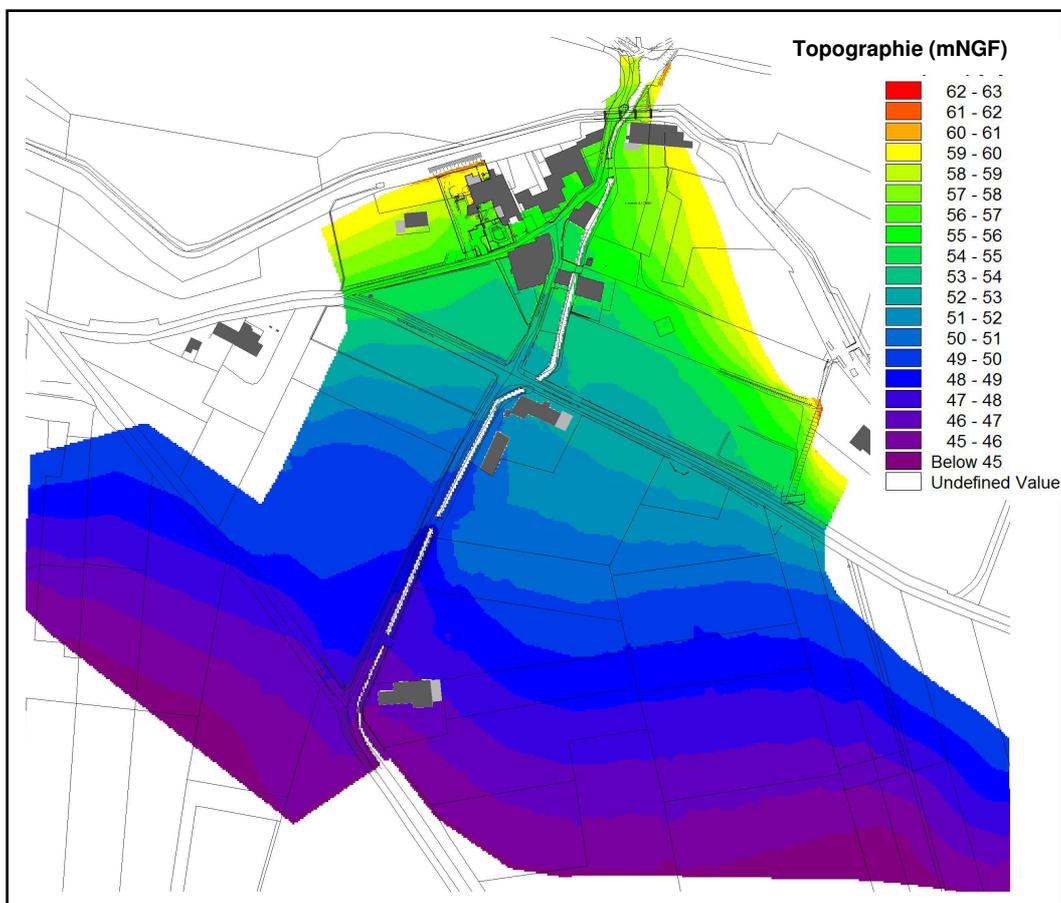
### 2.2.3. Modèle 2D (lit majeur)

Un modèle topographique (hors secteurs des Calans) a été réalisé sur une superficie d'environ 260 ha, allant de quelques dizaines de mètres à l'amont du canal d'irrigation de la vallée des Baux jusqu'aux bandes rocheuses calcaires recoupant la plaine (Rochers de la Pène). Il est constitué de mailles carrées de 4 m x 4 m ; le modèle comporte ainsi près de 160 000 nœuds de calculs.



*FIGURE 2 : MODELE TOPOGRAPHIQUE DU LIT MAJEUR DES GAUDRES DE LA CROIX ET DE LA FOUX*

Pour l'analyse du secteur des Calans, un second modèle à été réalisé sur une superficie d'environ 12 ha, comme l'illustre la figure ci-dessous. Il est constitué de mailles de 1 m x 1 m, soit ainsi près de 120 000 mailles de calcul.



*FIGURE 3 : MODELE TOPOGRAPHIQUE DU LIT MAJEUR DU GAUDRE DE VALOSTE*

Les limites des modèles 2D ont été définies suffisamment loin des zones à enjeux pour que celles-ci ne soient pas sous l'influence des conditions aux limites du modèle.

Comme l'illustrent les figures précédentes, les modèles topographiques sont recoupés par les gaudres qui ont été modélisés en 1D ; ils apparaissent donc en blanc sur ces figures. Sur la figure illustrant le modèle topographique du lit majeur des gaudres de la Croix et de la Foux, certaines zones apparaissent également en blanc. Ces zones correspondent soit à des secteurs altimétriquement plus élevés que les zones inondables (et donc exclus du modèle topographique) soit à des enclaves souvent privées, ceinturées par des murs, où seul un portail permet l'entrée des eaux. Ces enclaves constituent des zones d'eaux mortes et ne jouent aucun rôle majeur dans les mécanismes d'écoulement. Elles sont néanmoins intégrées dans l'analyse et dans la cartographie de l'aléa inondation.

Sur le même principe que le modèle topographique, un modèle de rugosité a été établi. Les coefficients de rugosité retenus pour chaque type d'occupation du sol sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Occupation des Sols	Coefficient de Strickler ( $m^{1/3}/s$ )
Voirie, parking	50-55
Stabilisé	42-48
Champs	28-33
Jardin particulier	16-20
Broussailles dispersées	18-20
Broussailles peu denses	13-17
Haies, broussailles denses	7-10

**Tableau 1 : Coefficients de rugosité retenus**

#### **2.2.4. Couplage 1D / 2D**

Le couplage entre le modèle 1D du lit mineur des gaudres et le modèle 2D représentant le lit majeur au droit du secteur d'étude a été réalisé sous l'interface de MIKE FLOOD.

Ainsi **des liens de déversements latéraux permettent les échanges entre le lit mineur et le lit majeur** durant toute la durée de la simulation.



### **2.2.5. Calage du modèle**

Le calage du modèle a été réalisé pour la crue de décembre 2003, crue significative la plus récente pour laquelle on possède des données pluviométriques, des photographies ainsi que des témoignages (cf. rapport phase 1).

Il est important de noter que cette crue a globalement été débordante en partie aval de la zone urbaine pour le gaudre de la Croix, à partir du chemin de la Pinède, mais qu'aucun débordement n'a été observé en partie amont. De même, pour le gaudre de la Foux et le hameau des Calans, cette crue a été débordante uniquement en un certain nombre de points connus.

Les résultats de la modélisation en régime transitoire pour la crue de décembre 2003 sont présentés en annexe 1. Ces résultats sont cohérents avec les témoignages recueillis. Nous considérons que le modèle est correctement calé.



## **2.3. EXPLOITATION DU MODELE**

### **2.3.1. Présentation des scénarios**

Le modèle calé a été réutilisé pour simuler les crues des gaudres de la Croix, de la Foux et de Valoste.

Les simulations hydrauliques ont été réalisées pour différents scénarios :

- Crue centennale sans facteur aggravant,
- Crue centennale avec apports du canal d'irrigation de la Vallée des Baux,
- Crue centennale avec prise en compte des phénomènes d'embâcles,
- Crue centennale avec phénomènes de rupture de digues,
- Crues exceptionnelles sans facteur aggravant.

Le scénario de modélisation de la crue centennale sans facteur aggravant indique qu'il a été pris comme hypothèses qu'aucun embâcle ne viendrait obstruer partiellement la section d'écoulement des ouvrages de franchissement, qu'aucun apport ne viendrait du canal d'irrigation de la vallée des Baux et que les digues ne cèdent pas.

La prise en compte des apports du canal d'irrigation de la vallée des Baux est présentée au paragraphe 2.3.2.

La prise en compte des phénomènes d'embâcles a été réalisée en prenant en compte plusieurs critères : le développement de la végétation à l'amont de l'ouvrage, la réduction de la section d'écoulement de l'ouvrage par rapport au lit mineur et la configuration de l'ouvrage (cf. § 2.3.3. ).

Des simulations avec différents scénarios de ruptures de digue ont été réalisées. Les hypothèses de calculs retenues sont présentées au paragraphe 2.3.4. Nous rappelons ici que l'étude ne concerne que les digues des gaudres dans la traversée des zones à enjeux. Les zones inondées dans la plaine, en partie sud du territoire communal, par rupture des digues du Rhône en particulier, ont fait l'objet d'études hydrauliques spécifiques (cf. rapport phase 1).

Enfin, deux crues exceptionnelles sur les gaudres ont été modélisées. Les hypothèses de modélisation sont présentées au paragraphe 2.3.5.

### 2.3.2. Apports du canal d'irrigation de la vallée des Baux

Comme relaté dans le rapport de la phase 1 (§ 2.3.3 et § 3.4), le canal d'irrigation de la vallée des Baux longe la zone de piémont des Alpilles, acheminant d'Est en Ouest l'eau destinée à irriguer les terres agricoles de la vallée. **Le canal est en eau du 15 février au 1<sup>er</sup> décembre en général**, avec une période de plein arrosage du 1<sup>er</sup> mai au 15 septembre. Ce canal est théoriquement isolé du reste du réseau hydrographique. Dans la réalité, des échanges sont néanmoins constatés tant en période d'étiage qu'en crue, par infiltration, ruissellement et via les décharges du canal.

D'après les informations recueillies auprès de l'ASA du canal d'irrigation de la vallée des Baux, il existe des décharges du canal vers certains cours d'eau, notamment le gaudre de la Foux (capacité 1.5 à 2 m<sup>3</sup>/s). Ces décharges sont actionnées soit manuellement soit automatiquement lorsque cela est possible. **Notons que le canal d'irrigation de la vallée des Baux reçoit de très nombreux apports intermédiaires par ruissellement diffus, alors qu'en principe aucun apport extérieur ne doit parvenir au canal. En cas de fortes précipitations, l'ASA gère les ouvrages de décharge en fonction de la dangerosité pour les habitations et la sécurité du canal.**

Afin de limiter la surcharge et le risque de rupture du canal, des déversoirs de sécurité sont également présents au niveau de plusieurs gaudres, notamment au niveau :

- du gaudre de Valoste (Aqueduc de Calans), 1 déversoir de largeur déversante égale à 3 m, pour une lame d'eau maximale<sup>1</sup> de 0.33 m.
- du gaudre de la Foux (Aqueduc de Flandrin), 2 déversoirs de largeur déversante égale à 2 m, pour une lame d'eau maximale de 0.45 m.
- du gaudre de la Croix du Loup (Aqueduc de Manville), 1 déversoir de largeur déversante égale à 1 m, pour une lame d'eau maximale estimée à de 0.3 m.

La capacité maximale de ces ouvrages a donc été calculée par les formules de déversoirs. Pour la capacité de la décharge située au niveau du gaudre de la Foux, la valeur de 2 m<sup>3</sup>/s a été retenue (hypothèse sécuritaire).

**Notons que, par hypothèse, il a été considéré que le canal résisterait à des orages violents et que les seuls apports vers les gaudres se font via les décharges et les déversoirs de sécurité. Cette analyse fait donc abstraction des éventuels problèmes de sous-dimensionnement, des**

---

<sup>1</sup> La lame d'eau maximale a correspond ici à la hauteur de surverse que permet le déversoir avant une surverse généralisée du canal.

potentiels problèmes d'embâcles sur les ouvrages présents sur le canal d'irrigation ou les problèmes de rupture des berges du canal, qui nécessiteraient une étude hydraulique spécifique dépassant le cadre de cette étude.

	Débit maximal déversé (m <sup>3</sup> /s)	Apports maximaux (m <sup>3</sup> /s) par la vanne de décharge	Apports totaux maximaux du canal (m <sup>3</sup> /s)	Débit de pointe en crue centennale (m <sup>3</sup> /s)	% des apports du canal en crue centennale
Gaudre de Valoste (Aqueduc de Calans)	1.1	0	1.1	6.4	17%
Gaudre de la Foux (Aqueduc de Flandrin)	2.3	2	4.3	32.4	13%
Gaudre de la Croix (Aqueduc de Manville)	0.3	0	0.3	20.9	1%

**Tableau 2 : Apports du canal d'irrigation de la vallée des Baux**

Compte tenu de la période durant laquelle le canal est en eau, en comparaison avec la période où se produisent le plus souvent les épisodes orageux dans la région, le risque de concomitance d'orages violents avec la mise en fonctionnement des vannes de décharge et des déversoirs de sécurité du canal est donc très important. Par conséquent, pour l'analyse des dysfonctionnements d'ouvrages (embâcles et ruptures de digues), les scénarios de simulation intègrent les apports du canal d'irrigation.

### 2.3.3. Prise en compte des phénomènes d'embâcles

Un embâcle est un amas de corps, généralement flottant, qui forme un obstacle partiel au bon écoulement des eaux et qui peut aggraver localement les risques de débordements. Il s'agit le plus souvent d'un amas de troncs, de branchages et de débris venant obstruer partiellement la section passante d'un pont.

Le risque de formation d'embâcles a été évalué en fonction de trois critères :

- **Le développement de la végétation sur le tronçon à l'amont de l'ouvrage de franchissement** : le risque de formation d'embâcles augmente si la végétation en lit mineur est abondante et si le lit est peu entretenu.
- **La réduction de la section d'écoulement** : le risque de formation d'embâcles augmente si un ouvrage de franchissement induit une forte réduction de la section d'écoulement.

- **La configuration de l'ouvrage** : le risque de formation d'embâcles augmente si l'ouvrage présente des piles de pont, s'il est situé au niveau d'un changement de direction du cours d'eau, si des problèmes de dépôts de sédiments<sup>2</sup> sont fréquents...

Il est délicat de déterminer lequel de ces trois facteurs est prépondérant dans le risque de formation d'un embâcle. Nous avons ainsi pris l'hypothèse que ces trois facteurs ont la même importance dans l'analyse de ce risque. Un système de notation a été déterminé pour chacun de ces critères. Il est présenté dans le tableau ci-après.

Chacun des ouvrages présents sur les cours d'eau modélisés ont donc été analysés selon ces critères d'évaluation et une note comprise entre 6 et 30 a ainsi été attribuée. Le pourcentage d'obstruction de la section passante considéré dans la modélisation des écoulements est alors directement lié à la note estimée à chaque ouvrage.

En ce qui concerne les embâcles, le risque « zéro » n'existe pas. Par conséquent, au moins 20 % de la section passante des ouvrages est obstruée. L'obstruction maximale a été fixée à 80 % de la section passante, en considérant que l'étanchéité absolue d'un embâcle n'est pas réaliste.

1. Développement de végétation à l'amont		Notation
	fort	10
	moyen	5
	faible	2
2. Réduction de la section d'écoulement		
	très forte (>50 %)	10
	moyenne à forte (de 10 à 50 %)	5
	faible (moins de 10 %)	2
3. Configuration défavorable de l'ouvrage (présence de piles de pont, coudes, dépôts de sédiments, etc...)		
	forte	10
	moyenne	5
	faible	2

**Tableau 3 : Critères de formation d'embâcles**

<sup>2</sup> Bien que les dépôts de sédiments ne soient pas considérés comme des embâcles, ils sont un facteur aggravant venant réduire la section d'écoulement du cours d'eau.

Notation totale par ouvrage	% d'obstruction de section passante considérée
25 à 30	80%
20 à 25	60%
15 à 20	40%
10 à 15	30%
6 à 10	20%

**Tableau 4 : Critères d'obstruction de la section passante des ouvrages**

Le tableau ci-après présente les résultats de cette analyse multicritères.

Cours d'eau	Abscisse (m)	Code ouvrage	Section de l'ouvrage (m <sup>2</sup> )	Surface mouillée en crue centennale à l'amont de l'ouvrage (m <sup>2</sup> )	% de réduction de la section	Critère 1	Critère 2	Critère 3	Total	% d'obstruction de la section passante
Croix	95	OA53	4.0	8.5	53%	10	10	2	22	60%
Croix	571.2	OA54-1	2.5	5.9	58%	10	10	10	30	80%
Croix	571.2	OA54-2	4.2	5.9	30%	10	5	10	25	80%
Croix	571.2	OA54-3	1.9	5.9	68%	10	10	10	30	80%
Croix	731.8	OA55	9.2	13.2	30%	5	5	10	20	60%
Croix	775.2	OA56	7.9	17.3	55%	2	10	2	14	30%
Croix	885	OA57	6.8	20.9	68%	2	10	2	14	30%
Croix	941.8	OA58	8.9	16.9	47%	2	5	2	9	20%
Croix	970.4	OA58.1	9.4	8.7	-8%	2	2	2	6	20%
Croix	1008.2	OA58.2	8.0	10.6	25%	2	5	2	9	20%
Croix	1081.9	OA58.3	6.0	13.7	56%	2	10	2	14	30%
Croix	1095.8	OA58.4	5.2	12.9	60%	5	10	2	17	40%
Croix	1114	OA58.5	6.3	11.1	43%	5	5	2	12	30%
Croix	1178.4	OA59	8.0	13.7	41%	10	5	10	25	80%
Croix	1848.7	OA60	3.9	17.0	77%	10	10	10	30	80%
Croix	2757.5	OA61	4.4	8.5	48%	10	5	10	25	80%
Foux	43.4	OA64	26.8	17.2	-56%	5	2	2	9	20%
Foux	543.9	OA65	2.4	25.6	91%	10	10	10	30	80%
Foux	872.8	OA65.2_a	11.0	11.5	4%	5	2	5	12	30%
Foux	872.8	OA65.2_b	11.4	11.5	0%	5	2	5	12	30%
Foux	919.1	OA66	19.6	17.7	-11%	5	2	2	9	20%
Foux	1419.8	OA67	13.7	16.8	18%	10	5	10	25	80%
Foux	1914.2	OA68	6.8	24.5	72%	10	10	10	30	80%
Valoste	53.9	OH1	1.3	3.9	67%	5	10	5	20	60%
Valoste	113.3	OH2	1.8	4.0	55%	5	10	5	20	60%
Valoste	178.5	OH3	1.1	5.8	80%	10	10	5	25	80%
Valoste	271	OH4	0.3	4.2	93%	10	10	5	25	80%
Valoste	338.1	OH5	1.2	5.8	79%	10	10	5	25	80%

**Tableau 5 : Prise en compte du risque d'embâcles au niveau de chaque ouvrage**

## 2.3.4. Prise en compte des phénomènes de rupture de digues

### A - Introduction – contexte

(Sources : Doctrine commune pour les PPRI du Rhône, juillet 2006 ; circulaires du 30 avril 2002 et du 6 août 2003)

La doctrine s'appuie sur le cadre réglementaire actuel, en particulier les deux circulaires indiquées ci-dessus relatives respectivement à la gestion des espaces en arrière des digues et au contrôle des digues intéressant la sécurité publique. Un des principes de cette doctrine est que **le sur-aléa lié aux défaillances des digues (rupture ou surverse) doit être affiché** : bande de sécurité en arrière immédiat de la digue et zones d'écoulement rapide. Les motifs de précaution sont les suivants :

- La sécurité des personnes,
- La volonté de ne pas augmenter les dommages,
- L'absence de garantie à long termes sur la pérennité des ouvrages.

En effet, au fil des temps, de nombreuses digues ont été érigées pour protéger les lieux habités et certaines activités économiques contre les crues. Ces digues sont disparates : en fonction de l'objectif initial, le niveau de protection et les dispositions constructives sont très variés; ces digues dont la solidité n'est pas systématiquement garantie, en particulier en cas de submersion, induisent un faux sentiment de sécurité. Les événements récents ont montré la dangerosité potentielle en cas de défaillance.

La stratégie globale de prévention des inondations sur le Rhône et ses affluents préconise la sécurisation systématique des digues protégeant des zones à forts enjeux (lieux densément habités) et la protection rapprochée au plus près de l'urbanisation existante des agglomérations non protégées.

Aujourd'hui, la majeure partie des digues existantes ne remplit pas les critères minimum de sécurité pour la tenue à la crue de référence, tant à la submersion qu'à la rupture. En cas de rupture, l'aléa est plus fort derrière la digue que l'inondation naturelle. Les PPR doivent donc prendre en compte ce risque de rupture de digue, notamment en neutralisant (dans tous les cas de figure) une bande de sécurité en arrière immédiat («bande tampon»).

Dans les espaces protégés par les digues, l'aléa d'inondation peut se manifester :

- **Par surverse** : le lit mineur endigué a une capacité qui peut être dépassée en cas de crue importante. Si le débit de crue est supérieure au débit capable du cours d'eau endigué, une surverse par-dessus la crête de digue va se produire et inonder les terrains en arrière de l'endiguement.
- **Par rupture** : différentes causes peuvent amener à une rupture d'une digue existante :
  - Erosion de la digue suite à une surverse au point bas de l'ouvrage,
  - Erosion interne régressive (mécanisme du renard hydraulique),
  - Erosion externe (affouillement en pied de digue côté cours d'eau dû à des vitesses importantes de l'eau et la vulnérabilité des berges),
  - Glissements et poussées : la saturation du remblai et la raideur des talus provoquent des ruptures de masse, pas glissement du talus.

Dans tous les cas, l'envahissement par les eaux des terrains en arrière des digues est rapide et peut s'étendre sur tous les espaces qui seraient inondables en l'absence de digues.

La **bande de sécurité** ou bande tampon en arrière des digues est définie pour prendre en compte les vitesses fortes induites par les ruptures (« effet de vague »). En termes de qualification de l'aléa, la bande de sécurité équivaut à une zone d'aléa fort dans laquelle toute construction en zone non urbanisée sera interdite.

## **B - Application au cas de Maussane-les-Alpilles**

Les gaudres de la Croix et de la Foux sont partiellement endigués en aval de la RD17c, comme l'illustre la figure ci-après, extraite de l'étude hydraulique du bassin versant sud des Alpilles, phase 3, carte 6.1. La hauteur de digue par rapport au terrain naturel dépasse localement 2 m.

Notons que dans la traversée urbaine, des murets de 0.4 à 0.6 m de hauteur et de 0.3 à 0.6 m d'épaisseur marquent par endroit la limite entre le lit mineur et le lit majeur. Ces derniers ne peuvent pas être considérés au même titre que les digues du tronçon aval dans la mesure où la hauteur de charge est faible, les murets ne sont pas continus et de ce fait l'eau est également présente en lit majeur de l'autre côté du muret en cas de forte mise en charge de ce dernier.

Le gaudre de Valoste ne comporte pas de digue dans le secteur modélisé.

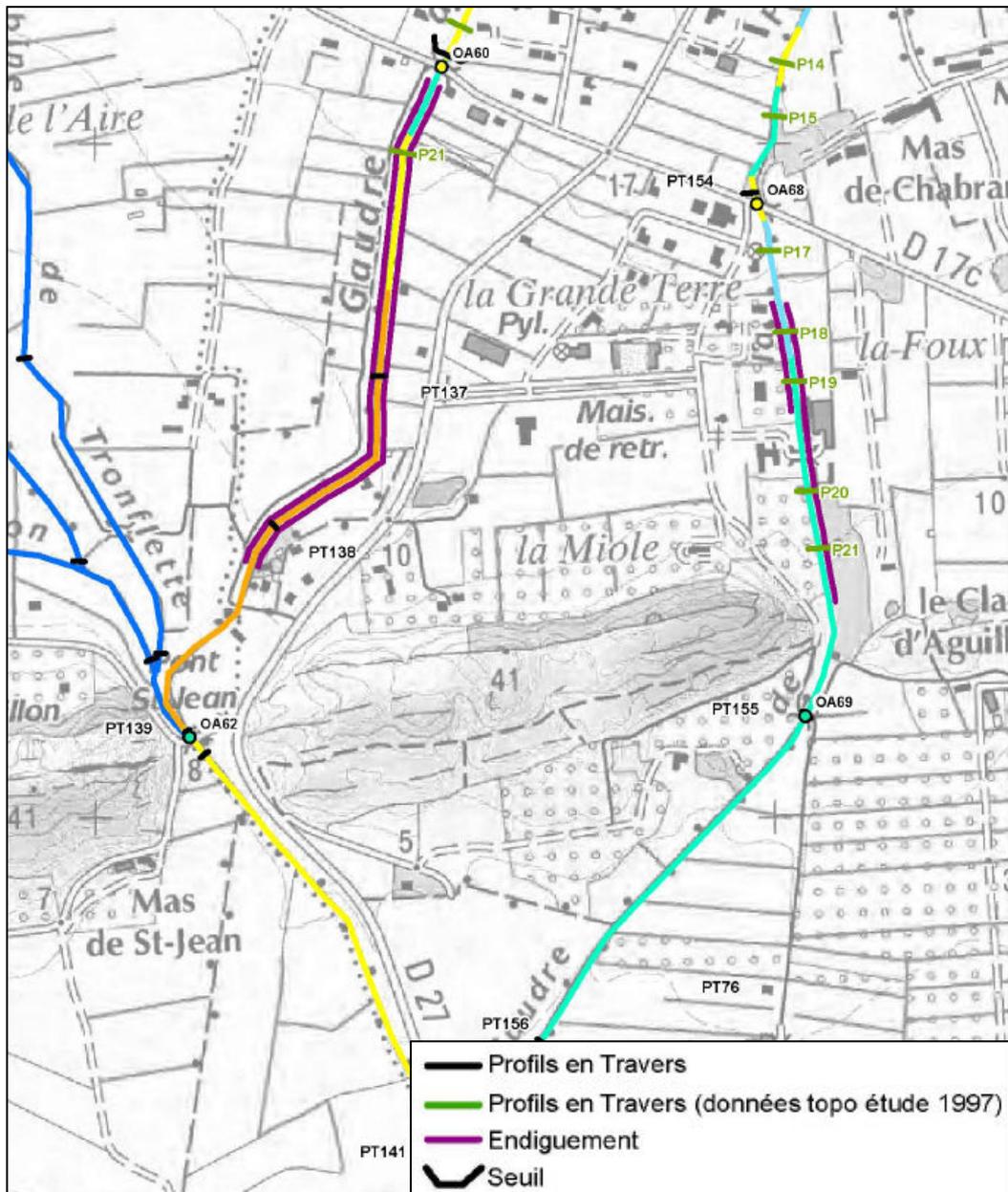


FIGURE 4 : LOCALISATION DES TRONÇONS ENDIGUES (SOURCE : BRLI)

Les reconnaissances de terrains ont permis d'identifier des points de fragilité de ces digues, notamment pour le gaudre de la Croix. Un début d'érosion régressive vraisemblablement consécutif à des débordements du gaudre lors d'une crue récente est actuellement en rive droite du gaudre de la Croix, au niveau du profil en travers P21, sur une longueur d'environ 11 m, comme l'illustre la figure ci-après.



*FIGURE 5 : AMORCE D'EROSION DE LA BERGE RIVE DROITE DU GAUDRE DE LA CROIX AU DROIT DU PROFIL P21*

Les témoignages recueillis ont permis d'identifier des zones où des ruptures de digues se sont produites lors de la crue de 2003 notamment.

Dans de nombreux secteurs, les digues actuelles des gaudres sont étroites, d'une largeur en crête très faible voire nulle, partiellement entretenues par les propriétaires riverains. Le développement de la végétation y est assez conséquent, en particulier les cannes de Provence. Le risque de défaillances des digues en cas de crue est donc important.

Les simulations hydrauliques des ruptures de digues ont été réalisées en prenant comme hypothèse le scénario de rupture le plus probable, à savoir une rupture rapide de la digue, quasi instantanée, par érosion interne (la rupture intervient environ 30 minutes avant le pic de crue, alors que la ligne d'eau est environ 0.15 m en dessous du niveau d'eau maximal atteint en cas de crue centennale). Compte tenu que la digue est très étroite, aux talus assez pentus, ce cas de figure semble très probable. Il a été considéré une brèche de 15 mètres de largeur, ce qui semble également cohérent avec les observations de terrain et les témoignages recueillis.

Plusieurs simulations de ruptures de digues ont été modélisées. Pour chaque simulation, une seule rupture de digue a été considérée. La localisation des brèches modélisées dans les différents scénarios sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Scénario de rupture	Localisation de la brèche		
	Gaudre	Rive	Profil en travers
R1	Croix	droite	P21
R2	Croix	gauche	P21
R3	Foux	droite	P18
R4	Foux	gauche	P18
R5	Foux	gauche	P20
R6	Croix	gauche	PT137
R7	Croix	droite	PT137

**Tableau 6 : Scénarios de rupture de digues modélisés**

Une analyse comparative des résultats des différents scénarios de rupture (cf. annexe 5) a permis d'appréhender le risque inondation consécutif aux ruptures de digues.

Le principal inconvénient de cette approche est la généralisation à l'ensemble du linéaire endigué des conséquences des ruptures de digues en 7 points précis, même si la configuration topographique à l'arrière des digues est proche.

De plus, le secteur d'étude présente une configuration topographique particulière. En plus d'être endigués, les lit des gaudres de la Croix et de la Foux sont situés sur un cône de déjection (le terrain naturel s'abaisse en s'éloignant du cours d'eau).

Si l'on souhaite définir une bande de sécurité sur la base des résultats des simulations mathématiques, cette configuration topographique particulière pose le problème de l'atténuation des vitesses d'écoulement. Les phénomènes de ruissellement « prennent le relais » de l'effet de vague consécutif à la rupture de digue et les vitesses d'écoulement sont certes réduites, mais elles se maintiennent à des valeurs non négligeables. Le positionnement de la limite entre la zone en arrière des digues connaissant un « effet de vague » et la zone de ruissellement est délicat à déterminer.

En termes de risques, la bande de sécurité définie dans la doctrine Rhône relatée précédemment a pour objectif de mettre en sécurité des personnes de l'effet de vague consécutif à une rupture de digue. Elle est donc spatialement limitée et ne doit pas intégrer les zones de diffusion des écoulements par ruissellement sur l'ensemble du cône de déjection.

Pour la cartographie de synthèse de l'aléa inondation, il a été demandé par les services de la DDTM13 d'intégrer, en arrière des secteurs endigués des gaudres, une bande de sécurité calculée par la formule suivante :

$$L = D \times 100$$

Avec L = largeur de la bande de sécurité (en m),

D = différence de niveau entre la cote de référence dans le lit mineur (ligne d'eau modélisée pour la crue de référence) et la cote NGF du terrain naturel en pied de digue (en m).

Cette disposition est limitée aux terrains ayant une cote inférieure à la cote NGF de la ligne d'eau.

Cette bande de sécurité est intégrée à la cartographie de synthèse de l'aléa inondation présentée en annexe.

### 2.3.5. Modélisation d'une crue exceptionnelle

Une analyse des crues exceptionnelles a été réalisée. Sur la base du modèle mathématique réalisé, des crues de débit de pointe supérieur au débit centennal ont été simulées.

Les intérêts de cette approche sont multiples : elle permet d'observer la présence éventuelle d'un « effet de seuil » au-delà d'un certain débit et d'en comprendre les mécanismes afin de mieux s'en protéger, ou si, au contraire, l'augmentation de la ligne d'eau se fait de manière progressive.

D'autre part, cette analyse permet de quantifier, dans la mesure du possible, le débit de pointe pour lequel l'enveloppe hydrogéomorphologique correspond à la zone inondable.

Les modélisations ont été menées en régime transitoire, en conservant la forme de l'hydrogramme centennal. Les résultats présentés en annexe illustrent les zones inondables obtenues pour des crues de débit de pointe égal à 2 fois Q100 et à 4 fois Q100.

La cartographie hydrogéomorphologique présentée lors de la phase 1 de l'étude a permis notamment de définir une vaste zone de « ruissellement » englobant la quasi-totalité de la zone de piémont en aval du canal d'irrigation. Le système collinaire en partie nord de la commune est en effet drainé par de nombreux vallons débouchant sur un vaste piémont. D'après l'analyse hydrogéomorphologique réalisée, la cause de l'inondation de ce vaste piémont est davantage liée aux phénomènes de ruissellement qu'aux débordements des gaudres. Dans les résultats des simulations des crues exceptionnelles des gaudres, il faut donc s'attendre à une enveloppe des zones inondables plus restreinte que l'enveloppe de la zone inondable par ruissellement.

Notons que la crue d'un débit de pointe égal à 4 fois Q100 a été modélisée dans le seul but de vérifier que l'emprise de l'enveloppe hydrogéomorphologique n'est pas atteinte pour une crue très exceptionnelle et que la cause de l'inondation du piémont est bien le ruissellement.



## 2.4. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA INONDATION

Le guide méthodologique des PPRi prévoit de déterminer l'aléa inondation en croisant les paramètres vitesse d'écoulement et hauteur d'eau. A l'intérieur du champ maximal d'inondation défini par la crue de référence hydrogéomorphologique, l'aléa inondation est obtenu sur la base de la crue centennale ou de la plus forte crue connue si celle-ci est supérieure à la crue centennale.

La carte des aléas s'attache ainsi à mettre en avant des secteurs plus exposés que d'autres aux inondations. Elle donne une vision globale du risque inondation sur le secteur modélisé. Compte tenu des différents scénarios de modélisations réalisés, **cette cartographie de synthèse de l'aléa inondation intègre le cumul des risques consécutifs à la rupture de digues, à la formation d'embâcles, ainsi que les risques liés aux apports du canal d'irrigation de la vallée des Baux (décharges et surverses par les ouvrages prévus à cet effet uniquement).**

**La crue de référence retenue dans la présente étude correspond donc au cas le plus impactant sur l'ensemble du secteur modélisé. L'annexe 8 présente la cartographie des hauteurs d'eau maximales et la cartographie des vitesses maximales d'écoulement pour la crue de référence. Ces cartographies ont servi de base à la définition de la cartographie de synthèse de l'aléa inondation.**

Il est important de noter que le cumul de tous les facteurs aggravants dans une seule et même simulation n'est pas le plus pénalisant. En effet, la prise en compte des phénomènes d'embâcles à pour effet de réduire le débit transitant en lit mineur. Dans ces conditions, les débordements du cours au niveau des ouvrages à l'aval seront plus faibles que dans la situation sans embâcles. Ces deux facteurs ont donc été analysés séparément puis leurs cartographies du risque inondation ont été « mutualisées ». En revanche, comme indiqué au § 2.3.2, les apports du canal d'irrigation de la Vallée des Baux ont été intégrés aux simulations avec embâcles et avec ruptures de digues compte tenu du risque important de concomitance entre les crues des gaudres et les surverses du canal d'irrigation.

Dans cette cartographie de synthèse de l'aléa inondation, un secteur situé dans une zone d'aléa fort pour un seul des facteurs aggravant se trouve donc systématiquement en zone rouge d'aléa fort (exception faite pour la bande de sécurité relative aux digues, cf. paragraphe spécifique en page 41).

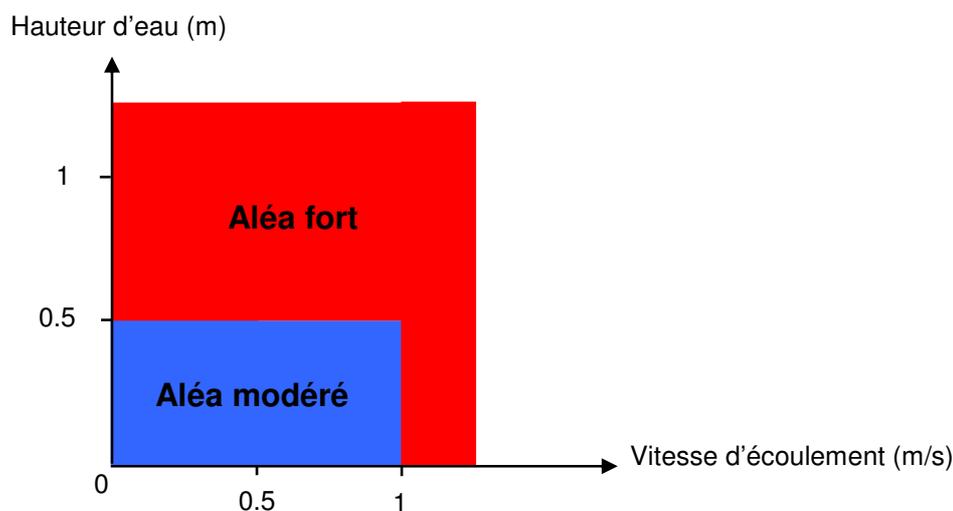
Du fait d'une configuration topographique particulière, la modélisation hydraulique a montré que les mécanismes d'écoulement correspondent exclusivement à des phénomènes de ruissellement. En effet, les hauteurs d'eau maximales sont globalement faibles (de l'ordre de 10 à 20 cm en moyenne),

et les vitesses d'écoulement sont élevées sur l'ensemble du territoire communal (cf. cartographies des résultats des simulations en annexe).

En partie amont (traversée urbaine), les hauteurs d'eau restent faibles compte tenu de la pente importante et du revêtement du sol (voirie). En partie aval (plaine), la pente est moins prononcée, mais les lits des gaudres sont endigués et perchés. Les débordements de ces deux cours d'eau ruissellent alors sur un cône de déjection et les eaux de débordement ne rejoignent pas directement le lit mineur.

Dans ce contexte particulier, la classification de l'aléa inondation validée par la DDTM13 dans la présente étude est la grille d'aléa « ruissellement », établie sur la base du découpage suivant :

- Zones pour lesquelles la hauteur d'eau est inférieure à 0.5 m, pour lesquelles la vitesse d'écoulement est inférieure à 1 m/s : **aléa modéré (bleu)**
- Zones pour lesquelles la hauteur d'eau est supérieure à 0.5 m et/ou la vitesse d'écoulement est supérieure à 1 m/s : **aléa fort (rouge)**



*FIGURE 6 : CLASSES D'ALEA*

Cette cartographie de synthèse de l'aléa inondation intègre également l'emprise maximale du champ d'inondation définie sur la base de la crue exceptionnelle de référence « hydrogéomorphologique » (cf. rapport phase 1). Celle-ci concerne l'ensemble du territoire communal, à la différence du zonage établi à partir des résultats de la modélisation hydraulique qui ne concerne que les zones à enjeux identifiées préalablement en concertation avec les Services de l'Etat et la commune. Autrement dit pour les secteurs de faible urbanisation et dont l'urbanisation nouvelle sera interdite dans les futurs documents d'urbanismes, l'analyse hydrogéomorphologique est suffisante. Comme pour les zones

d'aléa fort et d'aléa modéré, des prescriptions seront applicables aux terrains situés dans cette enveloppe hydrogéomorphologique.

Enfin, en ce qui concerne l'aléa relatif au risque de rupture de digues, la bande de sécurité définie précédemment figure dans une trame différente de celle de l'aléa fort afin de conserver une identification de ce risque spécifique. En termes de qualification de l'aléa, nous rappelons que la bande de sécurité équivaut à une zone d'aléa fort.