



N° 3

Juillet 2015



Schéma Directeur et zonage des eaux pluviales

Caractérisation de l'aléa inondation
Note méthodologique


SAFEGE
Ingénieurs Conseils

TABLE DES MATIERES

1 Contexte et objectif de l'étude	5
2 Analyse hydrologique	7
2.1 Caractérisation des bassins versants et sous-bassins versants.....	7
2.2 Temps caractéristiques	7
2.2.1 Temps de concentration.....	7
2.2.2 Temps de réponse	8
2.3 Coefficients de ruissellements.....	9
2.3.1 Bassin versant de type urbain	9
2.3.2 Bassin versant de type rural.....	9
2.3.3 Récapitulatif.....	12
2.4 Construction des pluies de projet	13
2.5 Transformation de la pluie en débit.....	13
3 Modélisation hydraulique	14
3.1 Code de calcul	14
3.1.1 Mike Flood	14
3.1.2 Télémac 2D.....	14
3.2 Modélisation surface	14
3.2.1 De la donnée LIDAR au modèle 2D	14
3.2.2 Topologie du modèle	17
3.2.3 Conditions aux limites	18
3.2.4 Coefficients de rugosité et calage.....	18
3.3 Description des modèles.....	20
3.3.1 Puyricard (1)	20
3.3.2 Ravin de Ganay (2).....	23
3.3.3 L'Abédoule (3)	25
3.3.4 Celony (4).....	26
3.3.5 Ruisseau des Pinchinats / ruisseau des Corneilles (5).....	31
3.3.6 Aix-Ouest – Thumine (6)	33

3.3.7	La Constance (7).....	35
3.3.8	Centre Ville (8).....	36
3.3.9	Viaduc (10).....	39
3.3.10	Vallon de la Blaque (11).....	40
3.3.11	Les Milles ZI (13).....	42
4	Évaluation de l'aléa	46
5	Correction et lissage de l'aléa	48
5.1	Correction des données HGM	48
5.2	Lissage.....	50

1 Contexte et objectif de l'étude

Antérieurement à l'étude du Schéma Directeur des Eaux Pluviales, différentes études relatives au risque inondation ont été réalisées sur le territoire de la commune d'Aix-en-Provence. Parmi ces différentes études, la principale est l'étude réalisée en 2005 par SIEE. Cette étude qui consistait en une synthèse des données et modélisations disponibles sur la Touloubre, la Torse et l'Arc et en la définition de l'enveloppe hydrogéomorphologique sur l'ensemble du territoire.

Dans le cadre de la réalisation du Schéma Directeur des Eaux Pluviales, la commune a souhaité que l'aléa inondation soit précisé par modélisation sur les secteurs actuellement urbanisés ou à urbaniser. L'objectif de ce rapport est de décrire les choix et hypothèses retenus pour la réalisation de ces modélisations.

Le résultat de ces modélisations a permis de compléter l'étude SIEE de 2005 afin d'établir une nouvelle carte de l'aléa inondation sur le territoire de la commune. Le tableau suivant présente les différentes études utilisées pour la définition de cet aléa.

Nom de l'étude	Bureau d'étude	Année	Maître d'Ouvrage	Cours d'eau / bassin versant étudié *
Etude de synthèse	SIEE	2005	Etat DDE13	Validation des études antérieures sur la Torse, l'Arc et la Touloubre, définition de l'HGM sur le territoire communal.
Vallon du Coq (Secteur Pont de	SAFEGE	2006	SEMEPA	Vallon du coq (10)
Bas du vallon de Bouenhoure (secteur	SAFEGE	2007	SACOGIVA	Vallon de Bouenhoure (6)
Vallon de la Blaque/Barida (Secteur	SAFEGE	2007	Ville d'Aix	Vallon de la Blaque (11)
La Luynes	SCE	2007	Ville d'Aix	La Luynes (12)
Schéma Directeur Pluvial	SAFEGE	2011-2014	Ville d'Aix	<u>Secteurs urbains Aix :</u> Puyricard (1) Ravin de Ganay (2) L'Abedoule (3) Celony (4) Ruisseau des Pinchinats /ruisseau des Corneilles (5) Aix-Ouest (6) La constance (7) Centre Ville (8) Vallon de la Guiramande (9) ZI Les Milles (13)

* en parenthèse les numéros de bassins versants figurant sur la carte page suivante

Tableau 1-1 : Études de définition de l'aléa

Les bassins versants concernés sont présentés sur la figure page suivante.

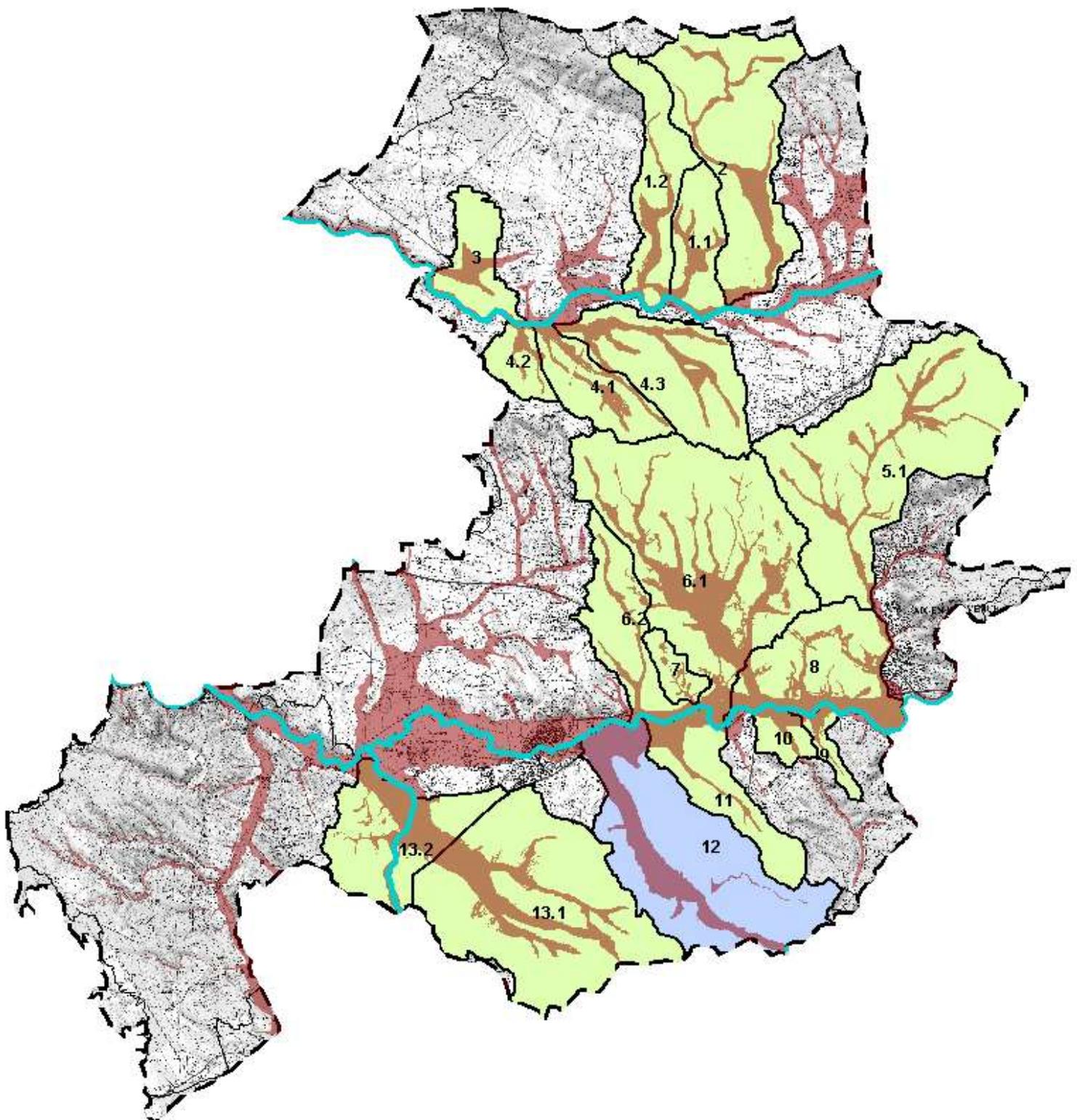


Figure 1-1 : aléas et bassins versants modélisés dans la présente étude

2 Analyse hydrologique

La transformation des pluies de projet en débit de pointe a d'ores et déjà été décrite dans le rapport relatif aux hypothèses de modélisation hydrologique (SDPLU Aix_Méthodologie hydrologique_v1.pdf – Juin 2011). Sont rappelés dans ce chapitre les points principaux issus de la note hydrologique.

2.1 Caractérisation des bassins versants et sous-bassins versants

La détermination des bassins versants naturels et le tracé de leurs axes d'écoulements ont été déterminés à partir des courbes de niveau 5 m issues du traitement LIDAR, avec l'utilisation du logiciel de SIG ArcGIS.

Chaque bassin versant a ensuite été découpé en sous bassins versants en fonction de la topographie à une échelle plus fine et des réseaux pluviaux existants.

L'analyse par SIG permet de déterminer pour chaque bassin versant les caractéristiques suivantes :

- Superficie : il s'agit de la portion du plan délimitée par la ligne de crête, contour du bassin versant.
- Chemin hydraulique le plus long : il s'agit de la longueur du plus long parcours hydraulique, reliant le point le plus éloigné du bassin versant à l'exutoire.
- Pente moyenne d'écoulement : la détermination de la pente moyenne intègre le temps d'écoulement le long du cheminement hydrauliquement le plus éloigné de l'exutoire.

2.2 Temps caractéristiques

2.2.1 Temps de concentration

Le temps de concentration correspond à la durée que met la goutte d'eau tombée au point le plus éloigné du bassin versant pour parvenir à l'exutoire où l'on cherche à calculer le débit. La connaissance de ce temps de concentration est nécessaire à l'estimation des débits de pointe par les méthodes déterministes, du type méthode rationnelle et leurs déclinaisons régionales.

Les temps de concentration aux différents points de calcul ont été estimés à partir des caractéristiques des bassins versants et des méthodes suivantes :

- Pour les bassins versants ruraux : moyenne des formules suivantes :

Tableau 2-1 : Formules d'estimation du temps de concentration pour les bassins versants ruraux

<i>Méthode</i>	<i>Formule</i>	<i>Données d'entrée</i>
Kirpich	$T_c = \frac{0,0195}{60} \cdot L^{0,77} P^{-0,385}$	Tc temps de concentration en heures L longueur du plus long cheminement hydraulique en m P pente moyenne sur le plus long cheminement en m/m
Passini	$T_c = 0,108 \cdot \frac{\sqrt[3]{A \cdot L}}{\sqrt{P}}$	Tc temps de concentration en heures A surface du bassin versant en km ² L longueur du plus long cheminement hydraulique en km P pente moyenne sur le plus long cheminement en m/m
Ventura	$T_c = 0,1272 \cdot \sqrt{\frac{A}{P}}$	Tc temps de concentration en heures A surface du bassin versant en km ² P pente moyenne sur le plus long cheminement en m/m

- Pour les bassins versants urbains : formule de Chocat

Tableau 2-2 : Formules d'estimation du temps de concentration pour les bassins versants urbains

<i>Méthode</i>	<i>Formule</i>	<i>Données d'entrée</i>
Chocat	$T_c = \frac{0,3175}{60} \cdot A^{-0,0076} \cdot C^{-0,512} \cdot S^{-0,401} \cdot L^{0,608}$	Tc temps de concentration en heures A surface du bassin versant en ha C coefficient d'imperméabilisation (0 à 1) S pente moyenne du bassin versant en % L longueur du plus long cheminement hydraulique en m

2.2.2 Temps de réponse

Le temps de réponse à la pluie d'un bassin versant, utilisé pour la mise en œuvre des modèles pluie-débit, a été estimé par les formules suivantes :

- Pour les bassins versants ruraux : Pour les bassins versants ruraux, il est d'usage de considérer le temps de réponse comme étant égal au temps de concentration multiplié par un facteur 0,6. Dans le cadre de la présente étude, étant donné les temps de concentration très courts calculés pour les bassins versants ruraux (pour la plupart inférieurs à une dizaine de minutes), nous avons décidé d'assimiler le temps de réponse au temps de concentration de manière à rester dans le domaine de validité des modèles hydrologiques.
- Pour les bassins versants urbains : le temps de réponse est déterminé par la formule Chocat, présenté ci-dessous.

Tableau 2-3 : Formules d'estimation du temps de réponse (lagtime) pour les bassins versants urbains

CHOCAT	<u>Si A ≤ 6ha</u>	<p>T : temps de réponse en heures</p> <p>A surface du bassin versant en ha</p> <p>C coefficient d'imperméabilisation (0 à 1)</p> <p>S pente moyenne du bassin versant en %</p> <p>L longueur du plus long cheminement hydraulique en m</p>
	$T_c = 0,8 \cdot \frac{0,3175}{60} \cdot A^{-0,0076} \cdot C^{-0,512} \cdot S^{-0,401} \cdot L^{0,608}$	
	<u>Si 6ha < A < 250 ha</u>	
	$T_c = 0,7 \cdot A^{0,09} \cdot \frac{0,3175}{60} \cdot A^{-0,0076} \cdot C^{-0,512} \cdot S^{-0,401} \cdot L^{0,608}$	
	<u>Si A ≥ 250 ha</u>	
	$T_c = \frac{0,3175}{60} \cdot A^{-0,0076} \cdot C^{-0,512} \cdot S^{-0,401} \cdot L^{0,608}$	

2.3 Coefficients de ruissellements

2.3.1 Bassin versant de type urbain

Le calcul du coefficient de ruissellement fait à partir d'une moyenne pondérée des coefficients de ruissellement de leurs surfaces imperméabilisées ou non imperméabilisées :

- Voiries et bâtis (surfaces imperméabilisées) : coefficient de ruissellement de 0,9 quelque soit l'occurrence de la pluie ;
- Surfaces vertes (surfaces non-imperméabilisées) : coefficient de ruissellement de 0,4 pour les pluies de période de retour inférieure ou égale à 10 ans et de 0,6 pour celles supérieures à 10 ans.

Les surfaces imperméabilisées et non-imperméabilisées des différents bassins versants (ainsi que leur couverture végétale) sont définies par analyse des données issues de la BD TOPO 2008 de l'IGN.

L'évolution de l'urbanisation depuis 2008 a été prise en compte une fois les coefficients déterminés par cette méthode, en étant attentif à la cohérence entre ces coefficients et l'orthophoto 2010.

2.3.2 Bassin versant de type rural

Le calcul du coefficient de ruissellement pour une pluie de période de retour supérieure à 30 ans (c'est le cas de la pluie de référence retenue) se fait en appliquant **la formulation dite « des Experts »**.

Cette formule, adaptée au contexte méditerranéen, évalue l'aptitude au ruissellement des bassins versants en fonction de la capacité de rétention initiale des sols **P0**, elle-

même conditionnée par la nature du substrat et l'occupation des sols. Elle permet par ailleurs de faire **varier le coefficient de ruissellement en fonction de la période de retour de la pluie.**

L'expression utilisée pour l'estimation du coefficient de ruissellement est la suivante :

$$C = 0,8 (1 - P_0/PJ100)$$

Avec :

PJ100 : pluie journalière centennale (mm)

P₀ : capacité de rétention initiale du sol.

P₀ est tabulé et varie entre 0 et 90 selon les sols, la morphologie et la couverture végétale, selon la nomenclature suivante :

Tableau 2-4 : Valeurs de la rétention initiale P₀ en fonction de l'occupation et de la nature du sol

Couverture végétale	Morphologie	Pente %	Terrain sable grossier	Terrain limoneux	Terrain argileux compact
Bois	presque plat	0-5	90	65	50
	ondulé	5-10	75	55	35
	montagneux	10-30	60	45	25
Pâturage	presque plat	0-5	85	60	50
	ondulé	5-10	80	50	30
	montagneux	10-30	70	40	25
Culture	presque plat	0-5	65	35	25
	ondulé	5-10	50	25	10
	montagneux	10-30	35	10	0

2.3.2.1 Analyse de l'occupation des sols

Les surfaces imperméabilisées et non-imperméabilisées des différents bassins versants (ainsi que leur couverture végétale) sont définies par analyse des données issues des photos satellite Corine Land Cover 2006. Le calcul du coefficient d'imperméabilisation se fait en appliquant la **moyenne pondérée des coefficients d'imperméabilisation selon l'occupation du sol.**

Tableau 2-5 : Nomenclature d'occupation du sol Corine Land Cover et coefficients d'imperméabilisation associés

Code Corine Land Cover	Classe d'occupation du sol	Coefficient d'imperméabilisation associé
111	Tissu urbain continu	80%
112	Tissu urbain discontinu	40%
113	Bâti diffus	20%
121	Zones industrielles ou commerciales	70%
211	Terres arables hors périmètres d'irrigation	0%
212	Périmètres irrigués en permanence	0%
221	Vignobles	0%
242	Systèmes culturaux et parcellaires complexes	0%
243	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants	0%
312	Forêts de conifères	0%
313	Forêts mélangées	0%
323	Végétation sclérophylle (maquis et garrigue)	0%
324	Forêt et végétation arbustive en mutation	0%

2.3.2.2 Nature du substrat géologique

La caractérisation du sol, nécessaire à l'application de la méthode des experts, est déterminée par l'analyse de la nature du substrat. Celle-ci influe en effet sur la perméabilité et la capacité de rétention initiale des sols. Ce paramètre a été appréhendé par l'analyse de la carte géologique élaborée (source BRGM).

2.3.2.3 Estimation de la capacité de rétention initiale P₀

Le croisement des paramètres d'occupation du sol et de nature du substrat permet de déterminer la capacité de rétention initiale P₀ de chaque sous bassin versant. Pour mémoire, la grille suivante a été utilisée :

Tableau 2-6 : Valeurs de référence Méthode des experts

	Perméable en grand	Peu Perméable
Zones boisées (relief ondulé)	75 mm	55 mm
Terres agricoles (zones planes)	65 mm	35 mm

2.3.2.4 Détermination de PJ10 et PJ100

Ces valeurs, nécessaires à l'utilisation de la méthode des experts, sont issues des données statistiques calculées à Aix-en-Provence, par la méthode GEV.

Tableau 2-7 : Pluies journalières maximales utilisées dans la méthode des experts

Pluies journalières maximales estimées à Aix en Provence	
Pj10ans	109 mm
Pj100ans	181 mm

2.3.3 Récapitulatif

En plus des principes méthodologiques expliqués précédemment, une majoration de 20% est appliquée au coefficient de ruissellement associé aux bassins versants présentant une forte pente.

Le tableau ci-dessous rappelle donc l'ensemble des hypothèses retenues pour la détermination des coefficients de ruissellement, en fonction du type de pluie et de bassin versant.

Tableau 2-8 : Hypothèses de calcul des coefficients de ruissellement

	Temps de retour inférieur ou égal à 10 ans	Temps de retour supérieur à 10 ans
Bassin Versant Urbain	Détermination des surfaces imperméabilisées / non-imperméabilisées par analyse BD TOPO 2008 de l'IGN	
	Coef de ruissellement "imperméabilisé" = 90% Coef de ruissellement "non-imperméabilisé" = 40%	Coef de ruissellement "imperméabilisé" = 90% Coef de ruissellement "non-imperméabilisé" = 60%
	Mise en cohérence avec l'évolution de l'urbanisation (orthophoto 2010)	
	Majoration de 20% pour les bassins versants à forte pente	
Bassin Versant Rural	Moyenne pondérée des coefficients de ruissellement suivant les données Corine Land Cover 2006	Utilisation de la "méthode des experts"
	Coefficient de ruissellement minimal des catégories Corine Land Cover = 25%	
	Majoration de 20% pour les bassins versants à forte pente	

Quelque soit l'occurrence de précipitation considérée la distinction selon la nature du bassin versant est logique au regard du comportement hydrologique fondamentalement différent, qui plus est en contexte méditerranéen (violence et faible durée des phénomènes).

2.4 Construction des pluies de projet

La pluie du 22-23 septembre 1993 a été retenue comme pluie historique de référence pour la caractérisation de l'aléa.

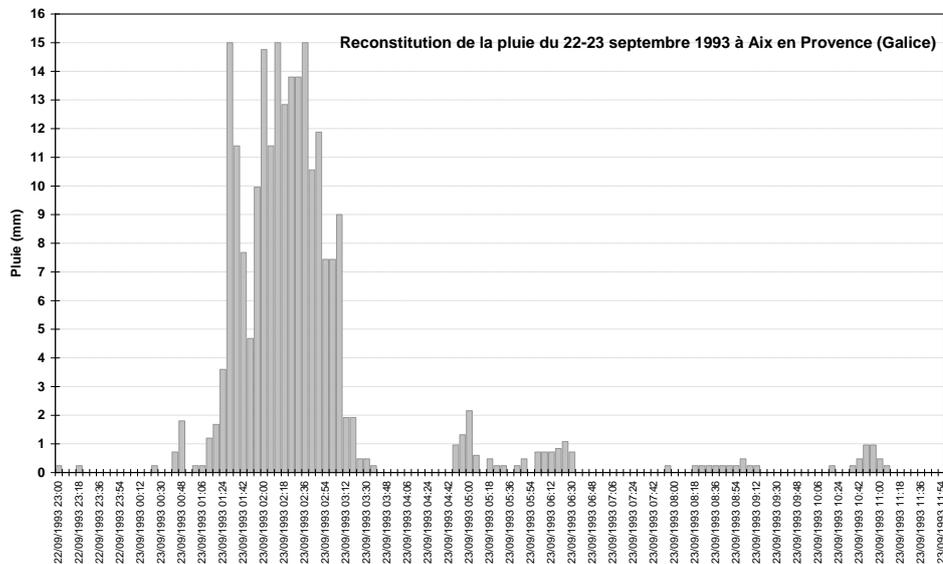


Figure 2-1 : Pluie du 22-23 septembre 1993 à Aix en Provence au pas de temps 6 min

2.5 Transformation de la pluie en débit

La transformation des pluies de projet en débit de pointe a été réalisée pour chaque bassin versant par la méthode de transformation pluie-débit dite du **réservoir linéaire** :

- Pour les bassins versants urbains : la méthode du simple réservoir linéaire, avec :
 - les pluies de projet double-triangle présentées au paragraphe précédent (15 minutes – 4 heures) ;
 - un temps de réponse calculé par la formule de Chocat ;
 - un coefficient de ruissellement urbain ;
- Pour les bassins versants ruraux : la méthode du double réservoir linéaire, avec :
 - les pluies de projet double-triangle 30 minutes – 4 heures;
 - un temps de réponse calculé par la moyenne des formules de Kirpich, Passini et Ventura;
 - un coefficient de ruissellement calculé par la méthode des experts.

Les méthodes du simple réservoir linéaire et du double réservoir linéaire permettent également d'estimer les débits de pointe générés en chaque sous-bassin versant pour la pluie de septembre 1993.

3 Modélisation hydraulique

3.1 Code de calcul

Deux méthodes ont été utilisées pour caractériser l'aléa sur Aix en Provence :

- S'il n'y a pas de réseaux enterrés ou si leur modélisation n'a pas d'intérêt dans la caractérisation de l'aléa, la zone d'étude est modélisée avec TELEMAC 2D ;
- Si la prise en compte des réseaux souterrains se révèlent pertinentes, la zone d'étude est modélisée sur le logiciel MIKE FLOOD.

3.1.1 Mike Flood

Le logiciel MIKE FLOOD (modèle couplage MU/1D/2D) est développé par le Danish Hydraulic Institute (DHI).

MIKE FLOOD est un outil de simulation des processus hydrodynamiques, sédimentaires et de qualité des eaux. Le logiciel est basé sur le couplage dynamique de MIKE urban pour la modélisation 1D des canalisations enterrées.

Il combine les avantages des modèles 1D et 2D, auxquels viennent s'ajouter les fonctionnalités du couplage. Il est adapté aux milieux tels que les plaines inondables, les estuaires, ou les zones urbaines.

3.1.2 Télémac 2D

TELEMAC-2D résout, par une méthode d'éléments finis sur des maillages non structurés constitués d'éléments triangulaires, les équations de Barré de Saint-Venant à deux dimensions horizontales d'espace. Ces équations expriment en tout point du domaine de calcul la conservation de la masse (équation de continuité) et la conservation de la quantité de mouvement dans les deux directions d'espace horizontales (équations dynamiques).

3.2 Modélisation surface

3.2.1 De la donnée LIDAR au modèle 2D

L'ensemble de la zone d'étude est représentée en 2D à partir du modèle numérique de terrain créé sur la base des semis de points levés fournis par la Ville d'Aix en Provence (LIDAR - 2009) et les levés terrestres réalisés par BILICKI ou HYDROTOPO (Modélisation 2D de la ZI les Milles).

La densité de la donnée LIDAR la rend inutilisable en l'état pour créer le modèle 2D servant à la caractérisation de l'aléa. Il est donc nécessaire de l'échantillonner

(suppression des données topographiques redondantes ou peu différentes) afin d'avoir une topographie suffisamment maniable pour être exploitable tout en restant représentative de la réalité.

Les tests pour éprouver la sensibilité de la modélisation 2D ont permis de dégager les grands principes suivants :

- Les éléments suivants font l'objet d'un échantillonnage précis (très peu de suppression de données) :
 - Ouvrage hydraulique de franchissement ;
 - Fossé ;
 - Bassin de rétention ;
 - Lit mineur constitutif du réseau hydrographique ;
 - Lieu de rupture de pente.
- L'empreinte hydrogéomorphologique et les zones urbanisées ont subi un traitement léger.
- La zone d'étude hors empreinte hydrogéomorphologique a fait l'objet d'un traitement modéré.

L'image suivante présente un exemple de traitement de la donnée LIDAR réalisé en vue 3D (le relief est exagéré afin d'être plus visible).

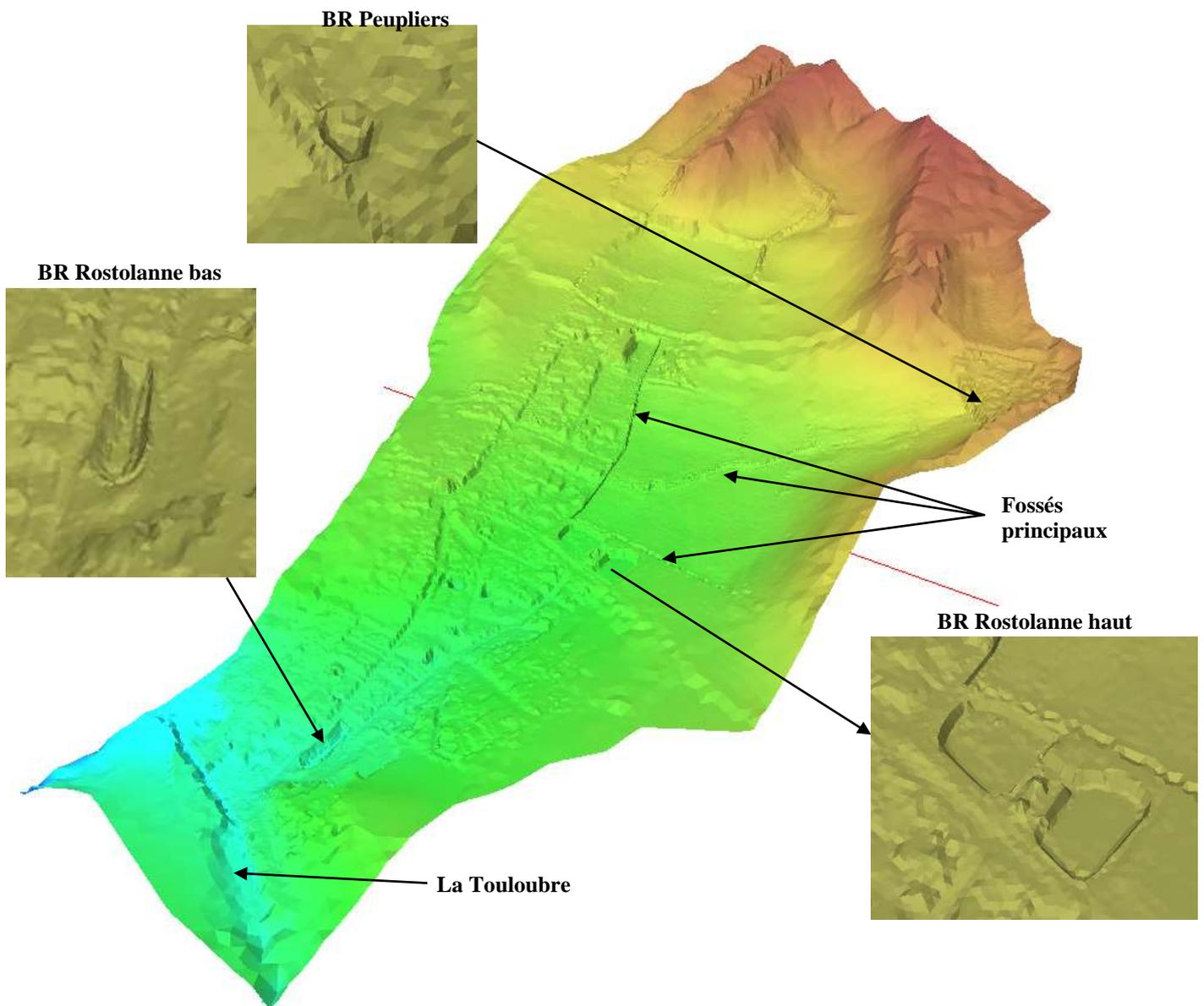


Figure 3-1 : Vue 3D de la zone d'étude après traitement du LIDAR – Exemple de la zone San Peyre

3.2.2 Topologie du modèle

Sur la base du LIDAR précédemment traité, un modèle numérique de terrain composé de mailles triangulaires a été réalisé. La taille des mailles est modulée selon la fonction hydraulique des éléments qu'elles décrivent. La figure suivante présente un exemple de maillage du modèle.

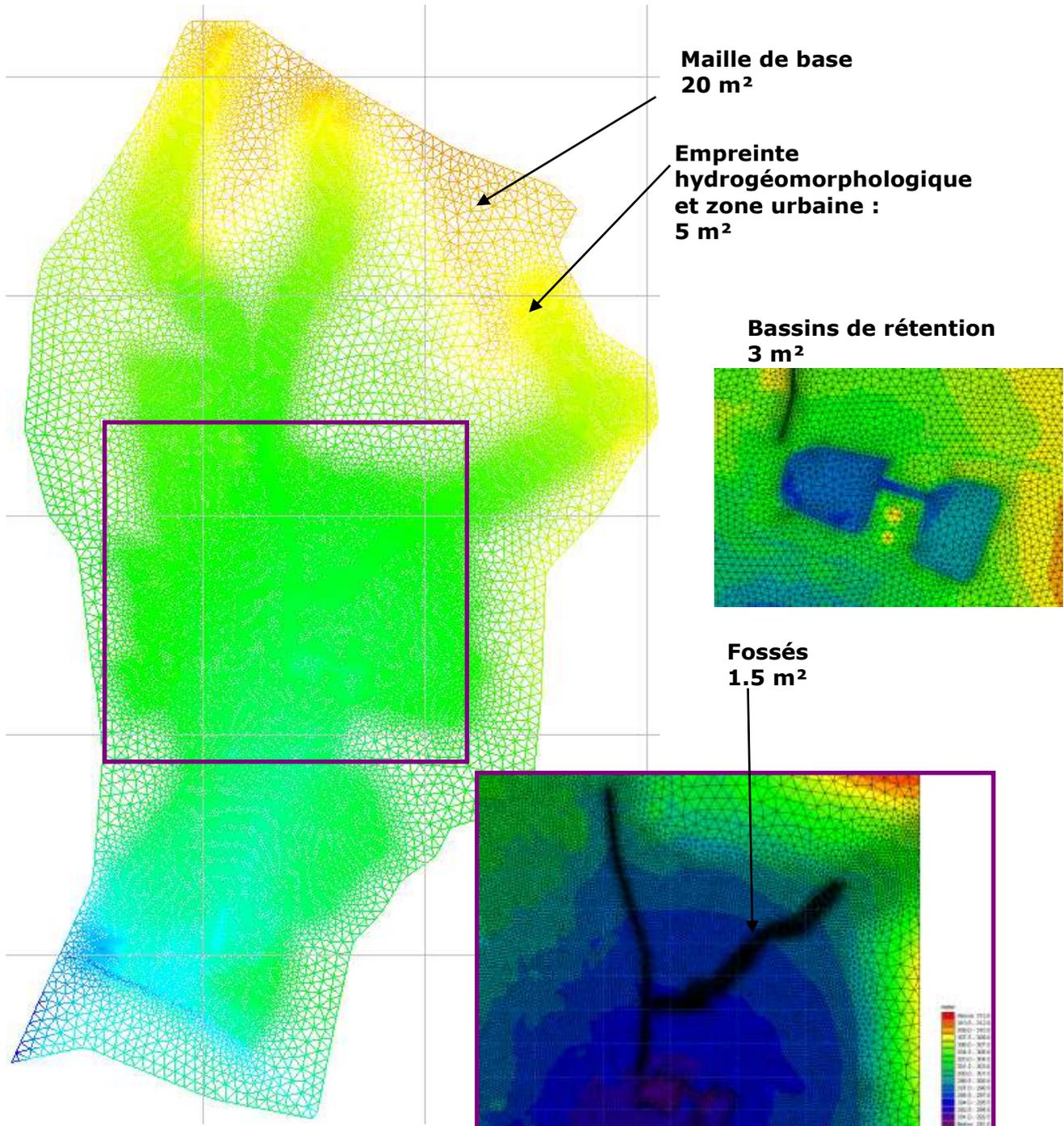


Figure 3-2 : Maillage du modèle 2D – Exemple de la zone San Peyre

L'emprise du maillage est volontairement plus étendue que la zone potentiellement inondée afin de limiter les effets de bord qui rendent peu pertinents les résultats à proximité des limites physiques du modèle.

3.2.3 Conditions aux limites

3.2.3.1 Condition amont

La condition amont correspond aux débits simulés issu de la modélisation hydrologique.

Afin de déterminer précisément l'inondabilité des emprises modélisées, il est proposé le canevas hydrologique suivant pour la crue 1993, crue de référence :

- Injection progressive du débit dans la tête des vallats secs (la progression est justifiée par la position très amont des tronçons étudiés par rapport au bassin versant) ;
- Injection progressive du débit des bassins versants urbains dans les réseaux pluviaux.

3.2.3.2 Condition aval

Les conditions aval sont fonction du cours d'eau exutoire de la zone d'étude, Touloubre ou Arc.

La condition aval retenue correspond au niveau du cours d'eau exutoire pour une crue de période de retour 10 ans.

3.2.4 Coefficients de rugosité et calage

Les coefficients de Strickler (Ks) ont été estimés à partir des observations du site lors de la reconnaissance de terrain et traitement SIG pour affectation par typologie. On retiendra les valeurs suivantes :

- Bâtiment : coefficient très faible (obstacle à l'écoulement) $\rightarrow 5 \leq Ks \leq 10$;
- Espace naturel : coefficient faible : $10 < Ks < 15$
- Voirie : coefficient fort : $40 < Ks < 90$.
- Cours d'eau : $Ks = 30$
- Conduite béton : $Ks = 70$

Pour le calage du modèle, les éléments d'information sur l'événement de 1993 qui ont pu être réunis sont les suivants :

Photographies de dégâts des locaux de la menuiserie située entre le Chemin Aurélien et la voie SNCF en amont des Parons

=>



Vidéo du 20h d'Antenne 2 du 23 septembre 1993

<=

La seule information exploitable pour le calage du modèle ayant pu être identifiée lors de l'analyse de ces éléments est la montée des eaux au jusqu'au niveau du pont de la route de Galice. Ce niveau d'eau a pu être vérifié dans les résultats du modèle.

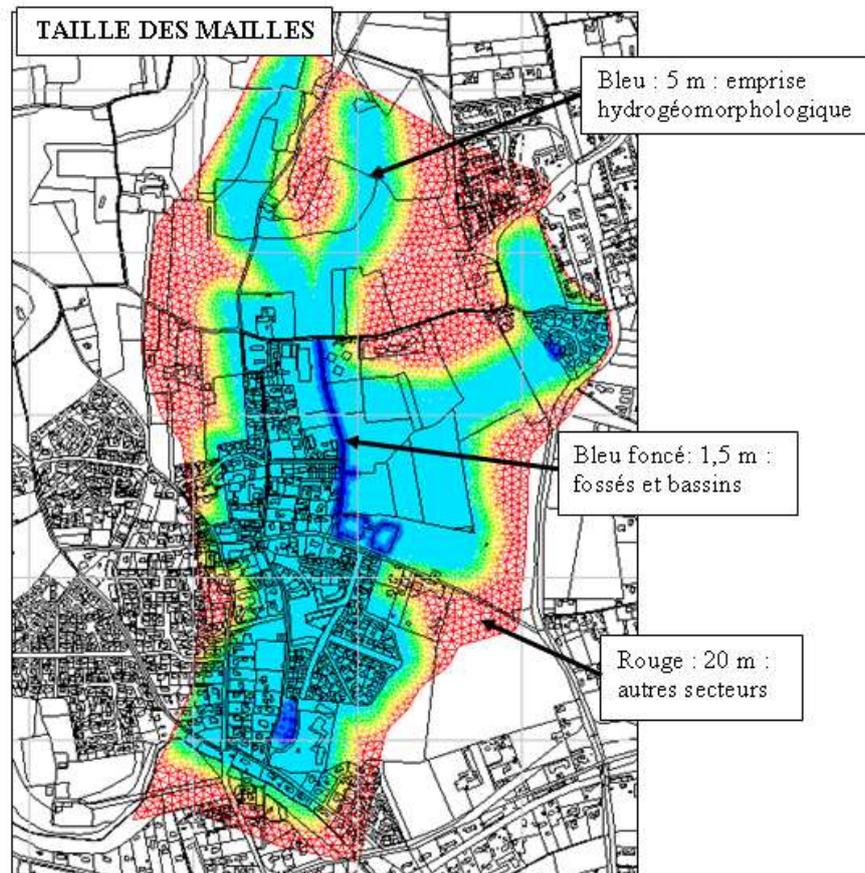
En l'absence d'autres éléments pour caler le modèle, les rugosités standards ont été conservées.

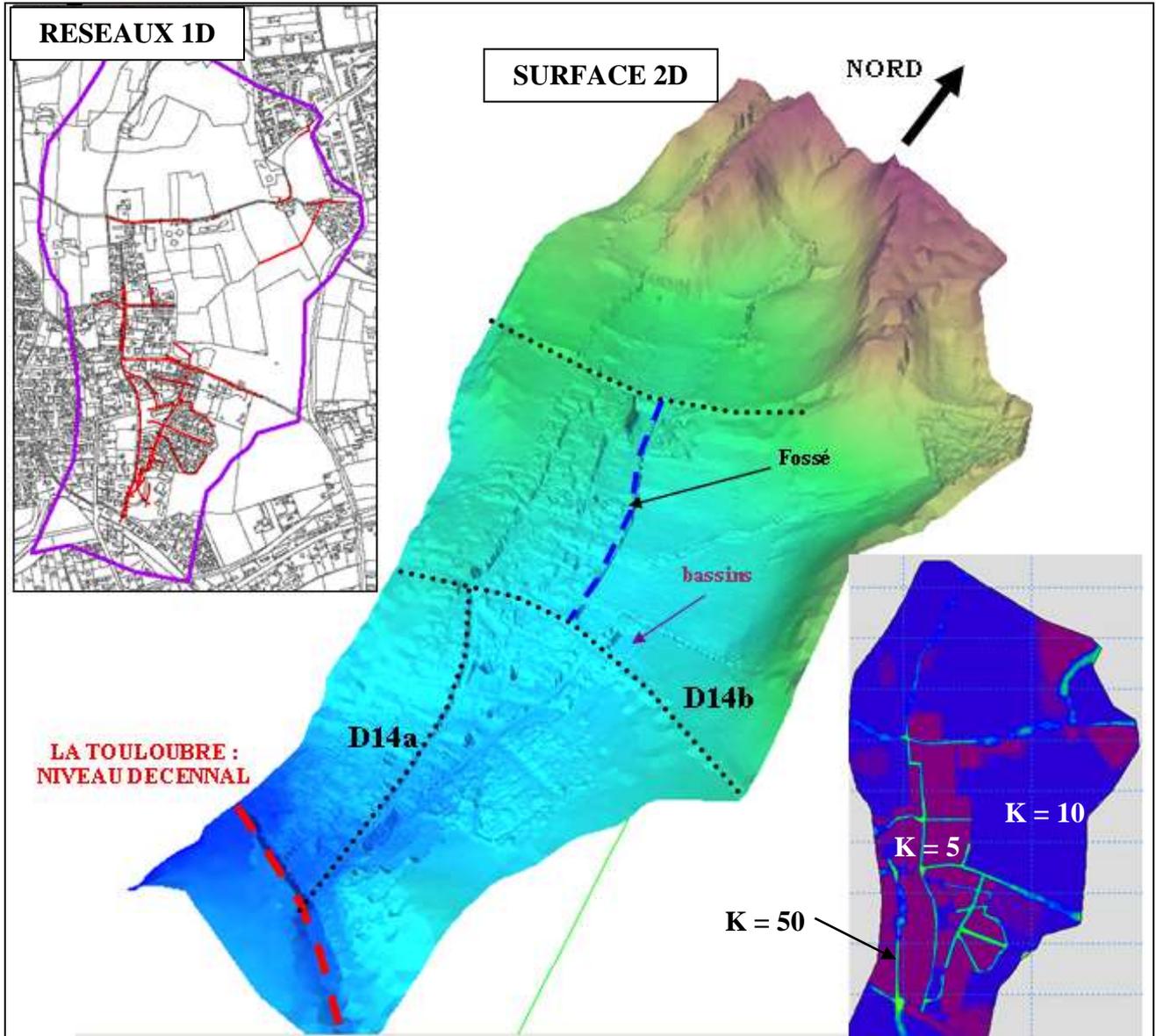
3.3 Description des modèles

3.3.1 Puyricard (1)

Modèle 1.1 : Le San Peyre

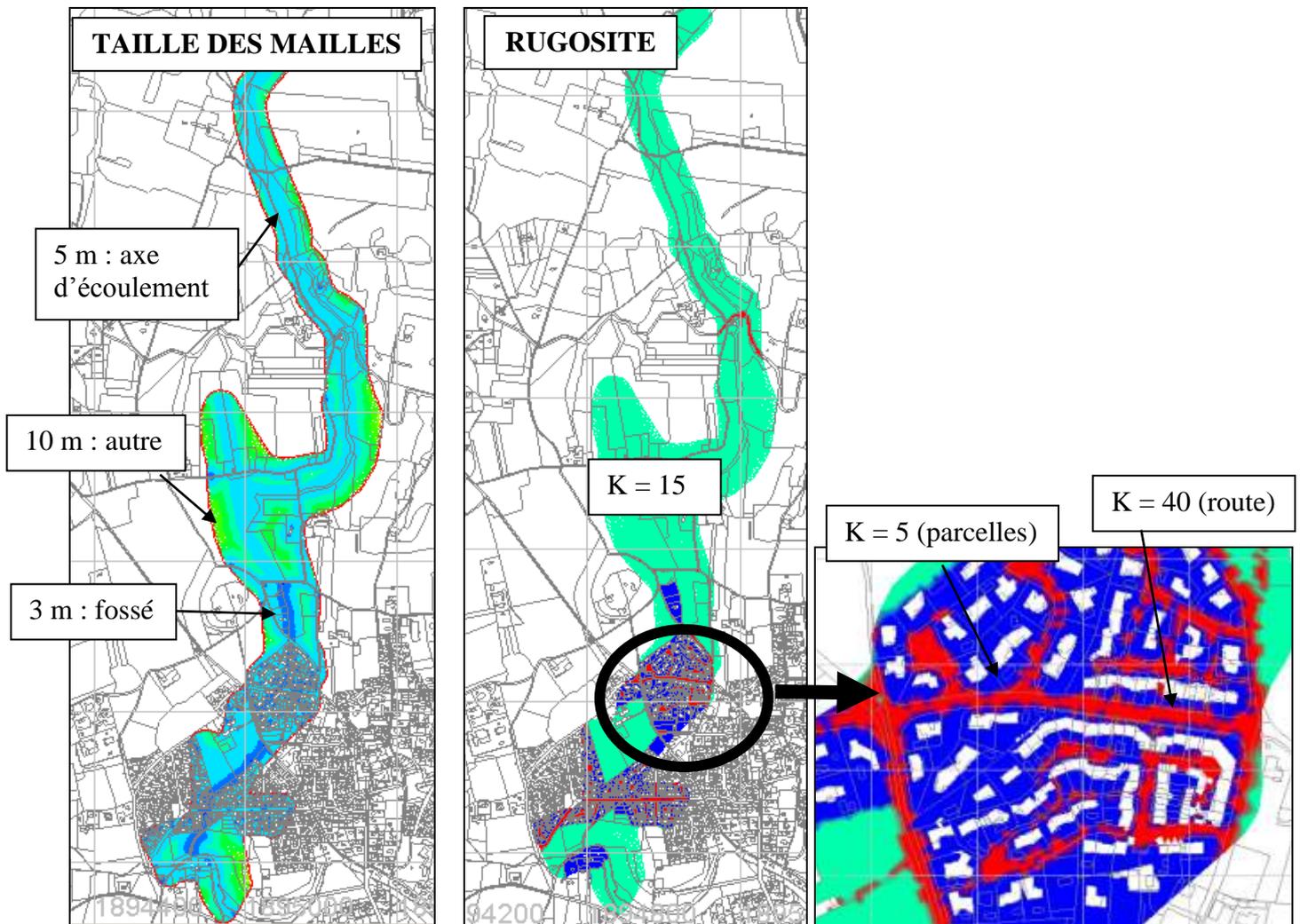
Emprise	146 ha
Affluents modélisés	Le vallon du San Peyre et ses affluents
Type de modélisation	Couplage surface 2D et réseau 1D
Nombre de maille du modèle	71 613
Taille des mailles	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 1 m (dans des fossés et bassins) ; ✓ 5 m (en emprise hydrogéomorphologique) ; ✓ 20 m ailleurs
Régime de la modélisation	Régime transitoire
Conditions limites	<p>A l'amont : injection d'hydrogrammes en tête de réseau et en tête de sous bassin versant</p> <p>A l'aval : niveau d'eau en crue décennale de la Touloubre</p>

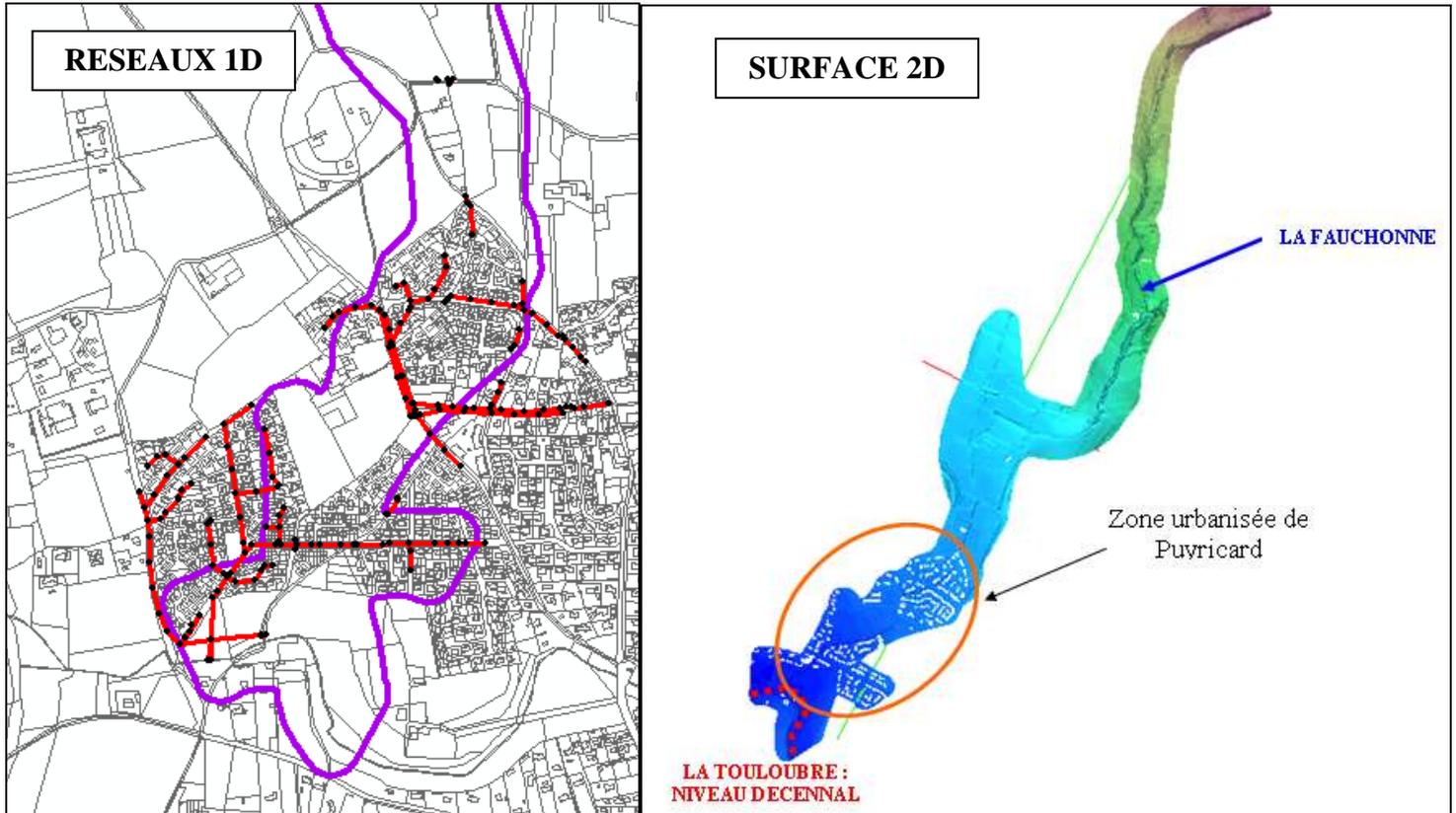




Modèle 1.2 : Fauchone

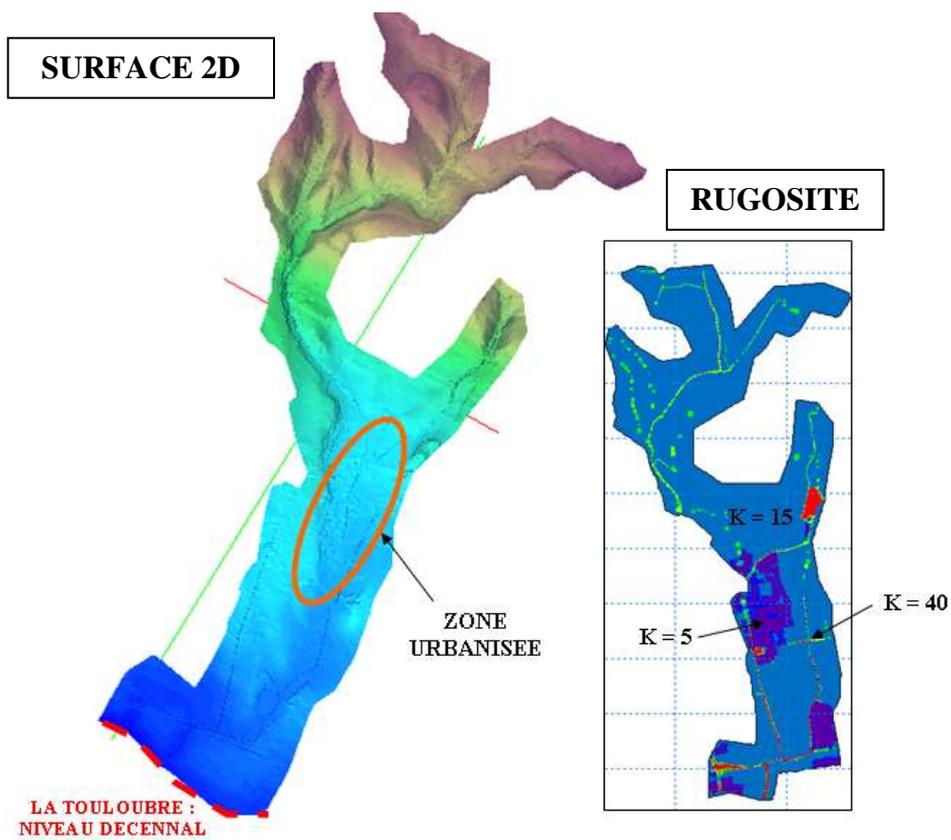
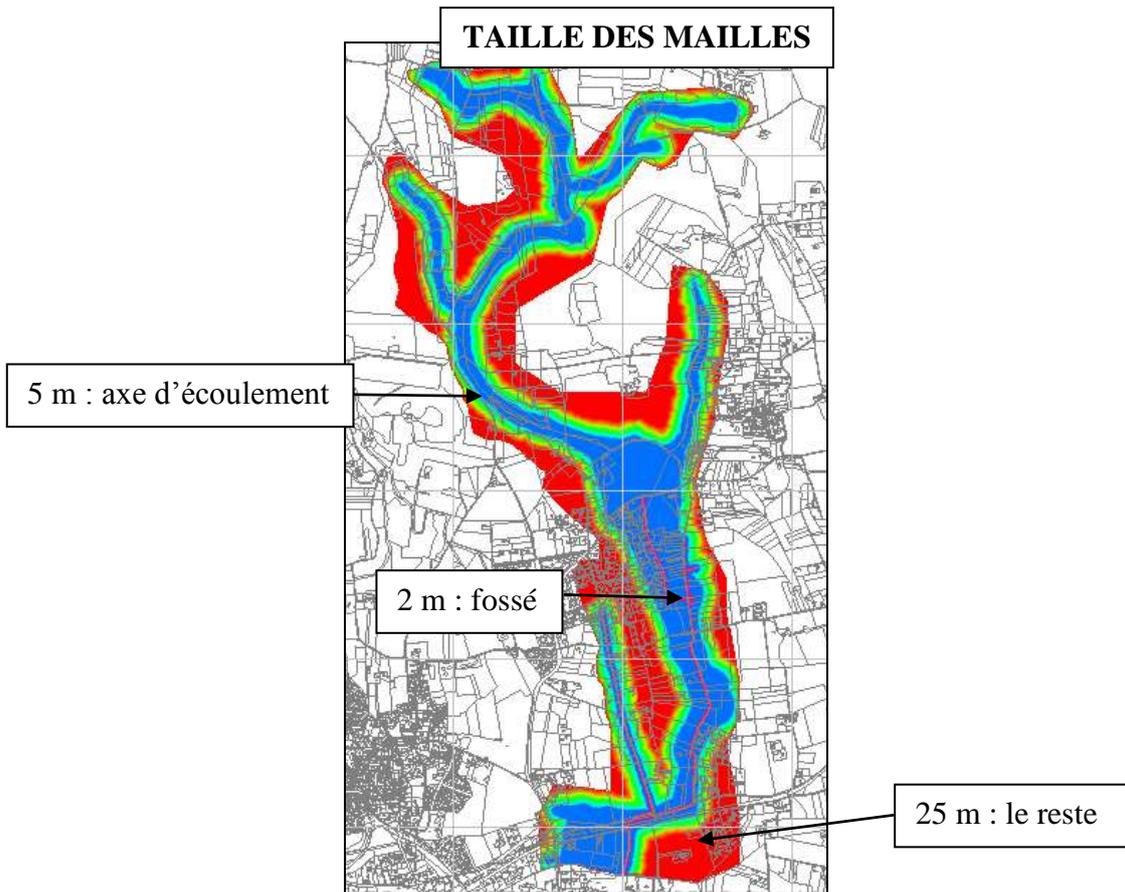
Emprise	102 ha
Affluents modélisés	La Fauchonne
Type de modélisation	Couplage 2D surface et 1 D réseau
Nombre de maille du modèle	61911
Taille des mailles	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 3 m (dans les fossés) ; ✓ 5 m (axe d'écoulement) ; ✓ 10 m ailleurs.
Régime de la modélisation	Régime transitoire
Conditions limites	<p>A l'amont : injection d'hydrogrammes en tête de réseau et en tête de sous bassin versant</p> <p>A l'aval : niveau d'eau en crue décennale de la Touloubre</p>





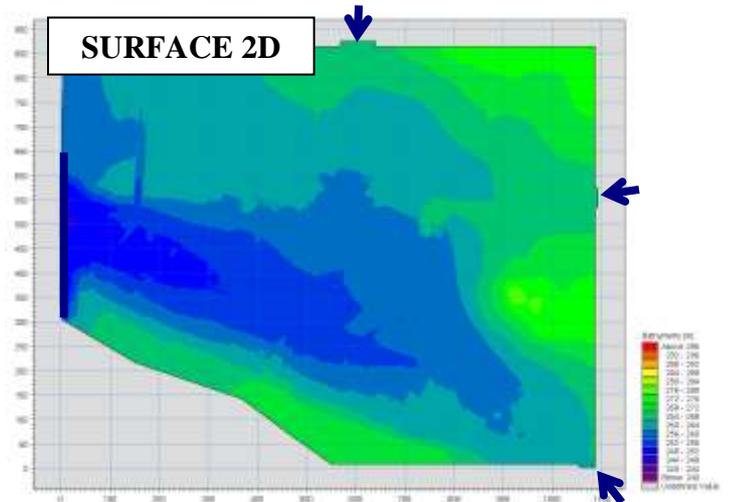
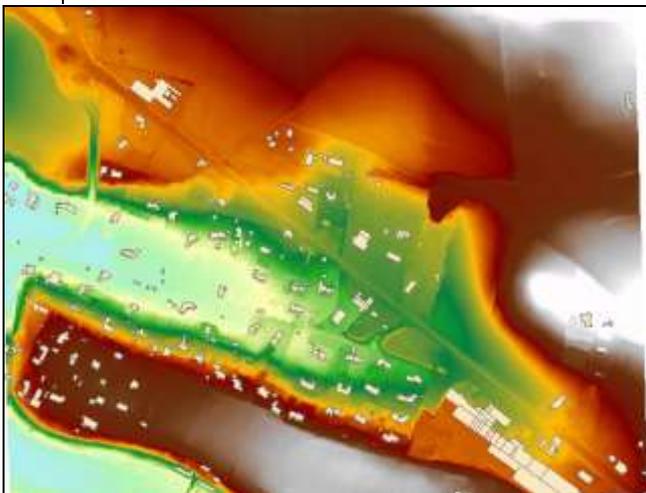
3.3.2 Ravin de Ganay (2)

Emprise	487 ha
Affluents modélisés	Ravin de Ganay
Type de modélisation	2D surface – 1D ouvrages hydrauliques
Nombre de maille du modèle	180 211
Taille des mailles	2 m (dans les fossés) 5 m (axe d'écoulement) 25 m (ailleurs)
Régime de la modélisation	Régime transitoire
Conditions limites	A l'amont : injection d'hydrogrammes en tête de sous bassin versant et le long du linéaire du vallon A l'aval : niveau d'eau en crue décennale de la Touloubre



3.3.3 L'Abédoule (3)

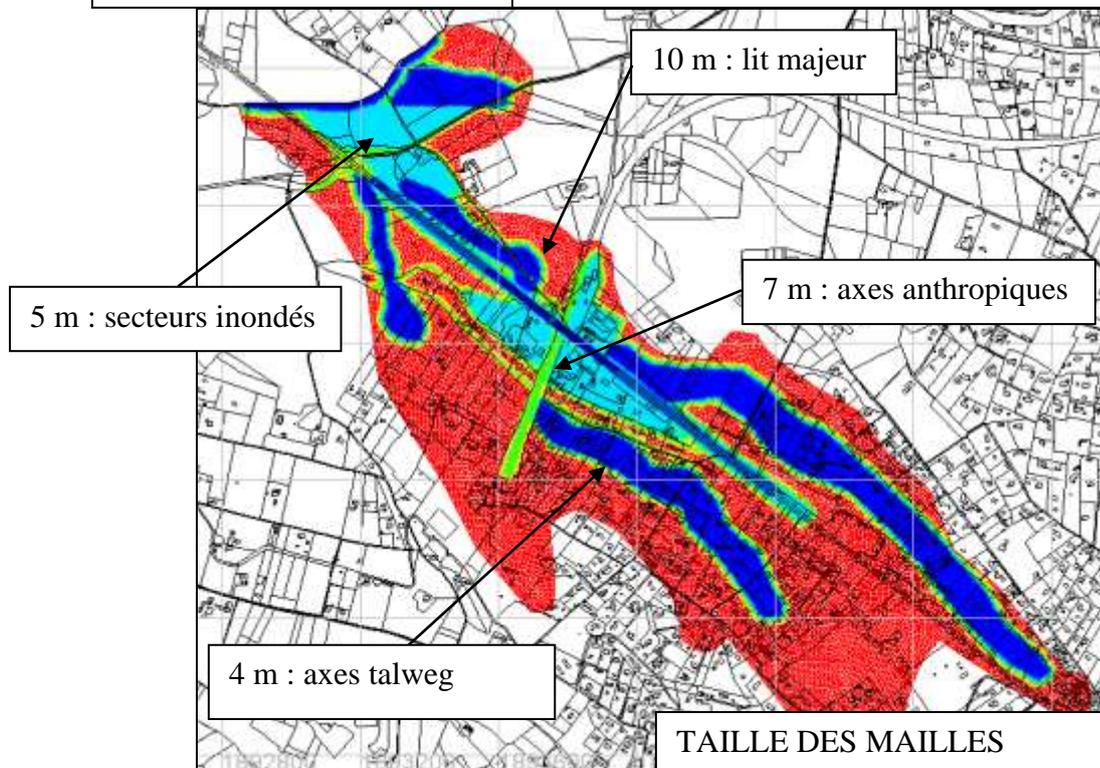
Emprise	96 ha
Affluents modélisés	Vallons secs
Type de modélisation	2D surface à maille régulière
Nombre de maille du modèle	955 500
Taille des mailles	1 m ²
Régime de la modélisation	Régime transitoire
Conditions limites	Amont : injection d'hydrogrammes en bordure de modèle Aval : La Touloubre en crue décennale

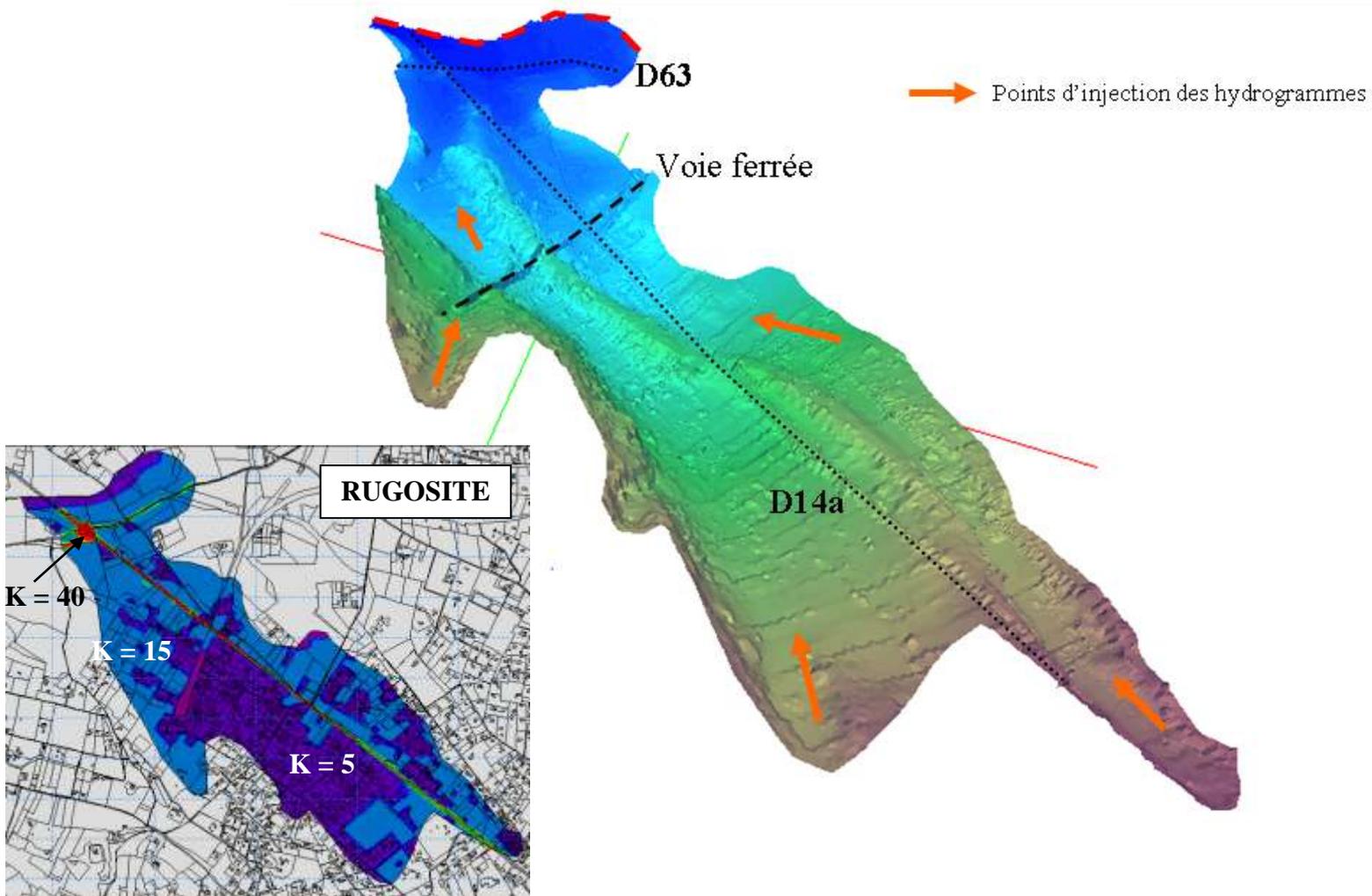


3.3.4 Celony (4)

Modèle 4.1 : modèle « D7n »

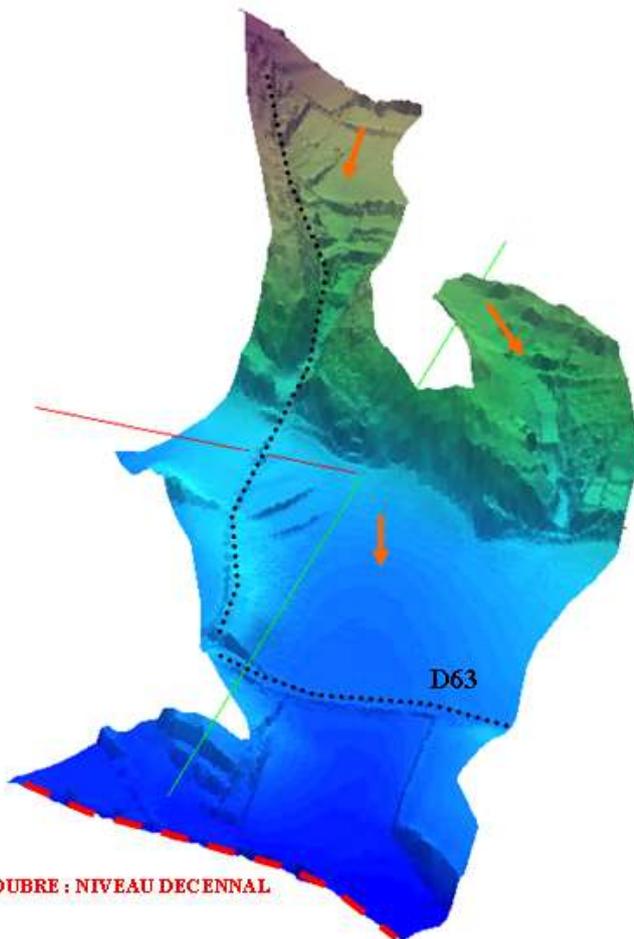
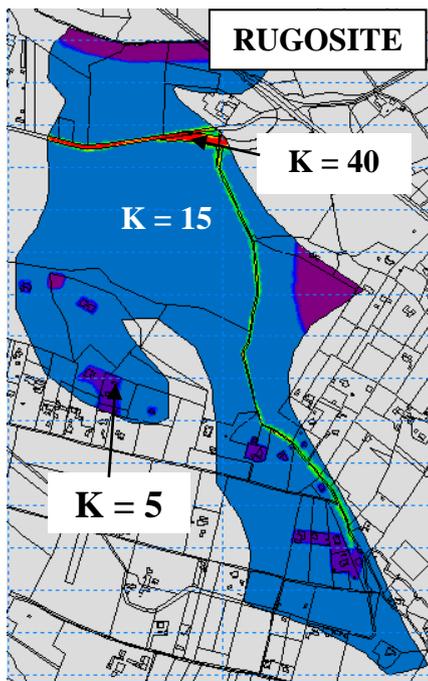
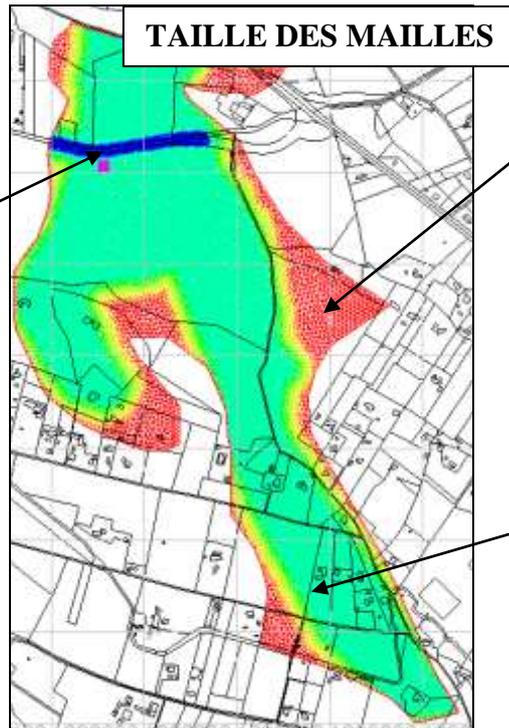
Emprise	176 ha
Affluents modélisés	Plusieurs vallons secs en bordure de la D7n
Type de modélisation	2D surface
Nombre de maille du modèle	94 134
Taille des mailles	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 4 m (dans l'axe des talwegs) ; ✓ 5 m (sur les secteurs inondés) ; ✓ 7 m (le long des axes anthropiques: routes, chemins, voie ferrée) ✓ 10 m en lit majeur.
Régime de la modélisation	Régime transitoire
Conditions limites	<p>A l'amont : injection d'hydrogrammes répartis le long du linéaire du vallon</p> <p>A l'aval : niveau d'eau en crue décennale de la Touloubre</p>





Modèle 4.2 : « La Calade »

Emprise	61 ha
Affluents modélisés	Plusieurs vallons secs de Celony
Type de modélisation	2D surface
Nombre de maille du modèle	56 891
Taille des mailles	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 4 m (dans l'emprise hydrogéomorphologique) ; ✓ 3 m (le long des axes anthropiques) ; ✓ 10 m ailleurs.
Régime de la modélisation	Régime transitoire
Conditions limites	<p>A l'amont : injection d'hydrogrammes répartis le long du linéaire du vallon</p> <p>A l'aval : niveau d'eau en crue décennale de la Touloubre</p>

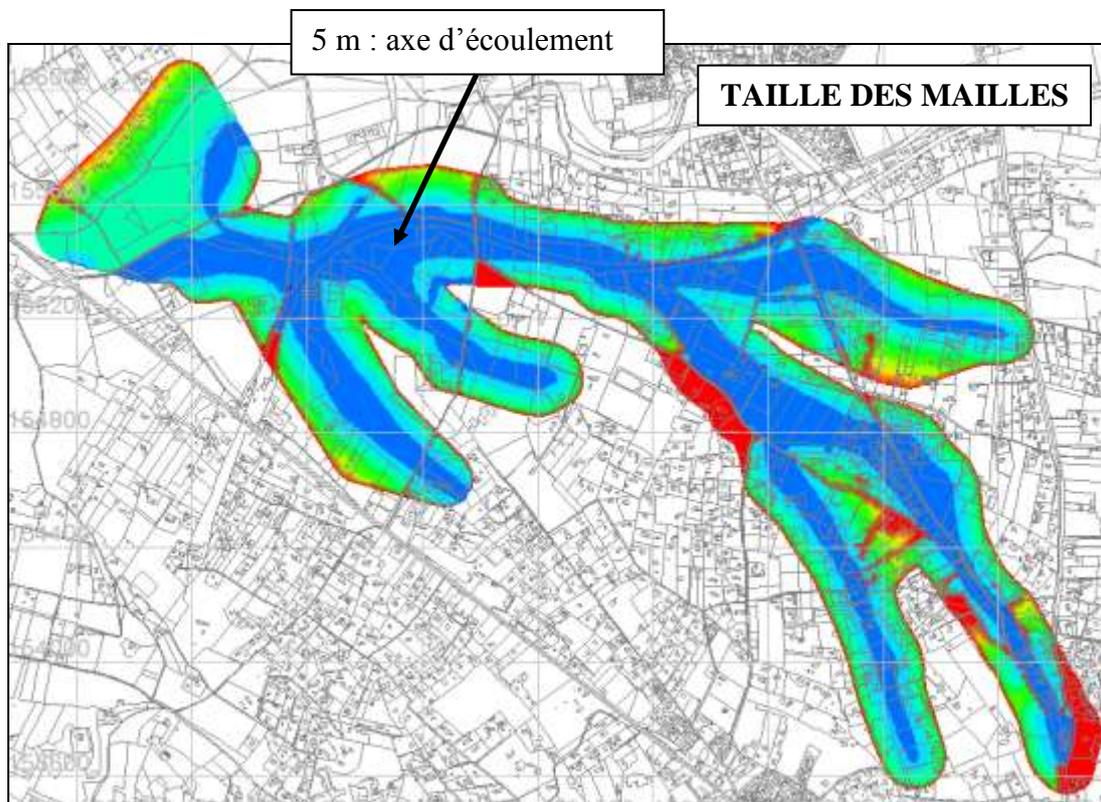


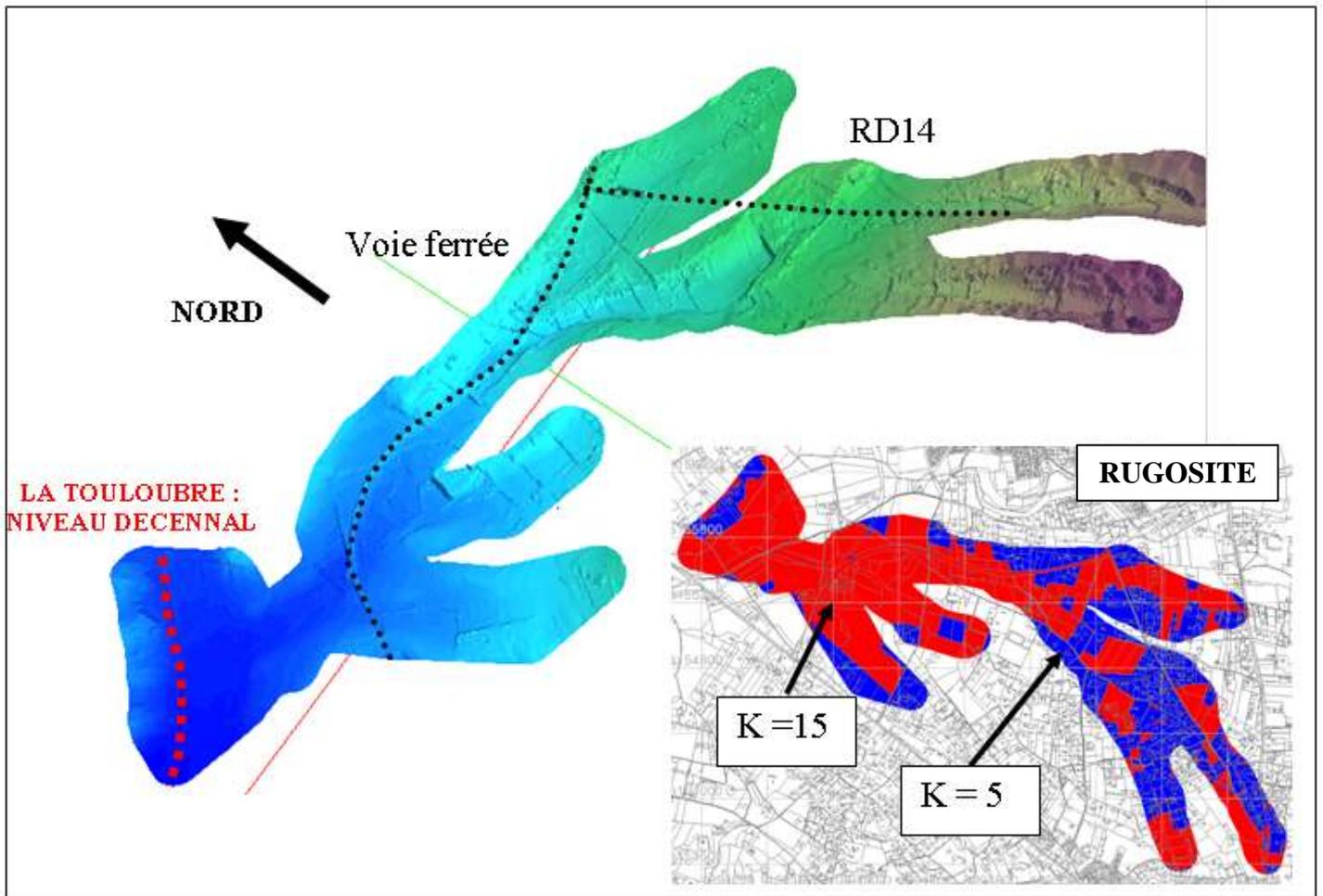
LA TOULOUBRE : NIVEAU DECENNAL



Modèle 4.3 : RD14

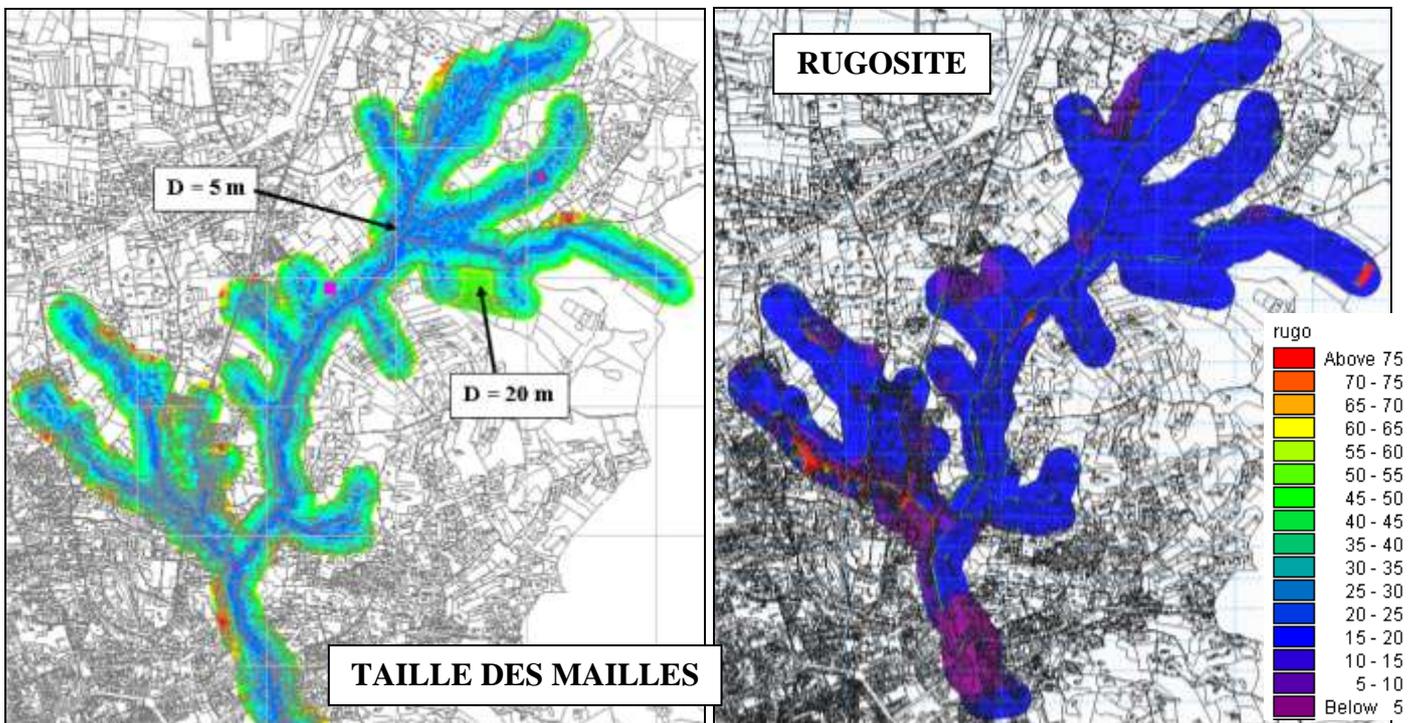
Emprise	292 ha
Affluents modélisés	Vallons secs
Type de modélisation	2D surface
Nombre de maille du modèle	115 890
Taille des mailles	✓ 5 m (le long des axes d'écoulement) ; ✓ De 5 à 30 m ailleurs
Régime de la modélisation	Régime transitoire
Conditions limites	A l'amont : injection d'hydrogrammes A l'aval : niveau d'eau en crue décennale de la Touloubre

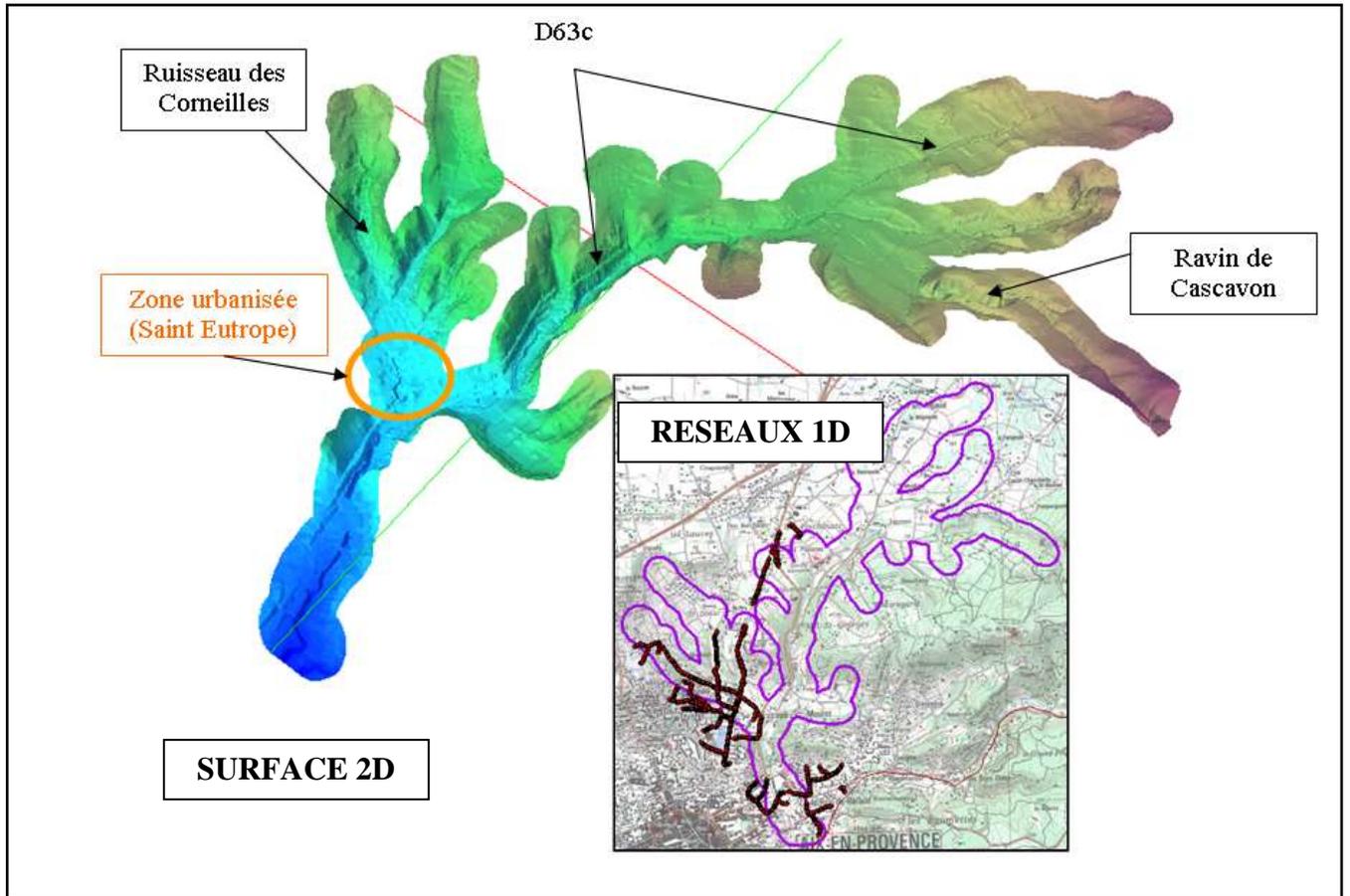




3.3.5 Ruisseau des Pinchinats / ruisseau des Corneilles (5)

Emprise	468 ha
Affluents modélisés	La Torse et son affluent le ruisseau des corneilles jusqu'à la confluence avec le ruisseau des Prignons
Type de modélisation	Couplage 2D surface, 1D lit mineur, 1D réseau
Nombre de maille du modèle	125 188
Taille des mailles	5 m dans l'axe d'écoulement Entre 5 et 20 m ailleurs
Régime de la modélisation	Régime transitoire
Conditions limites	A l'amont : injection d'hydrogrammes en tête de sous bassin versants et répartis tout le long du linéaire de cours d'eau – injection en tête de réseau

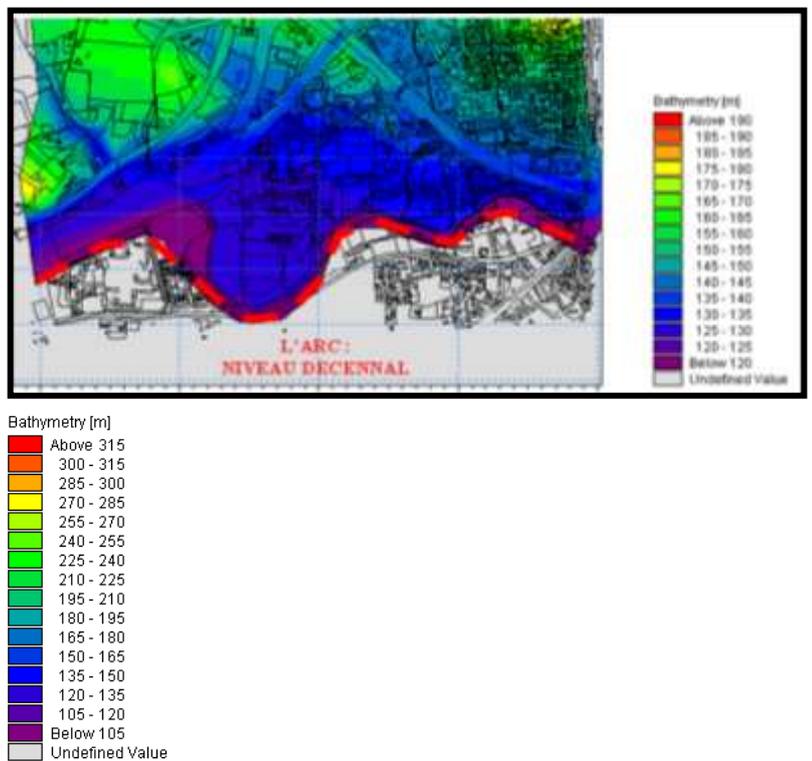
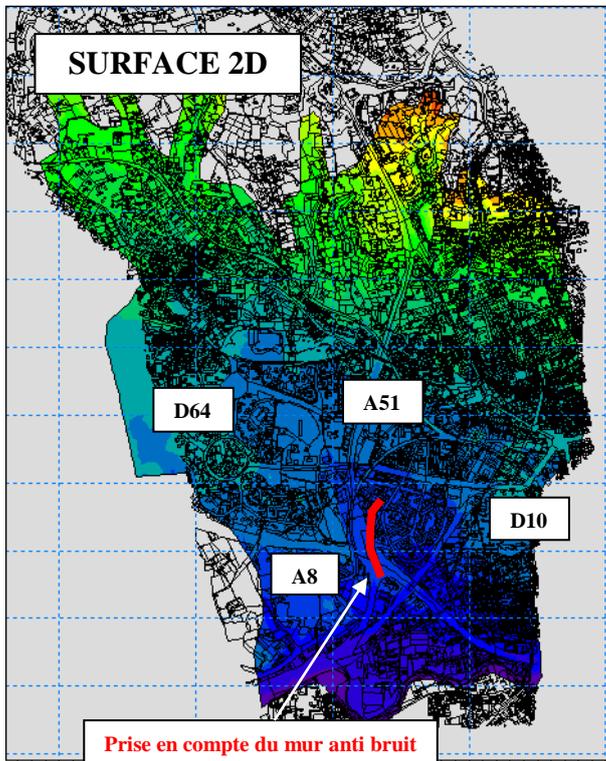
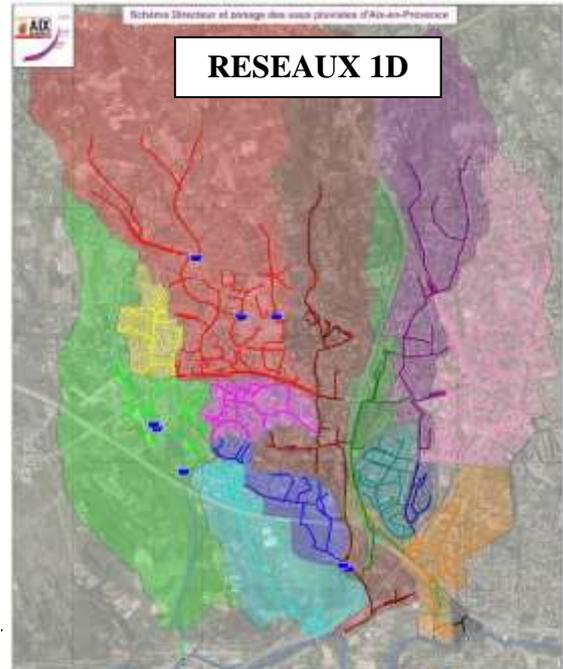
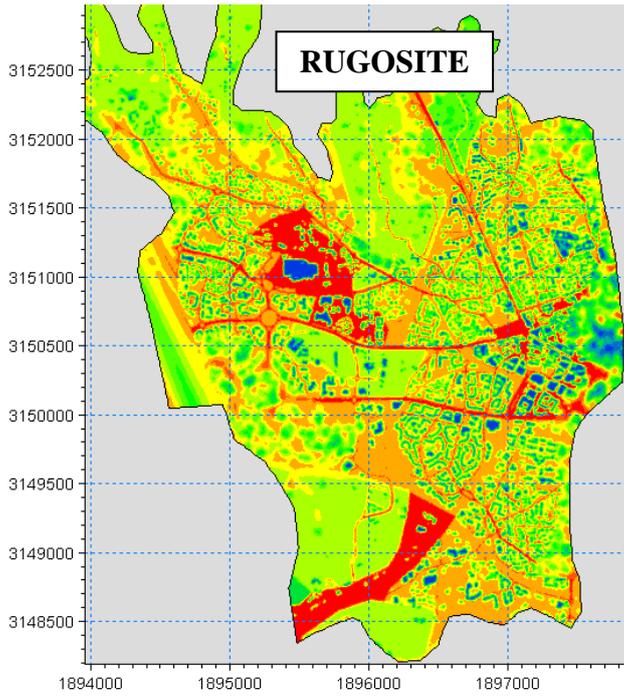




3.3.6 Aix-Ouest – Thumine (6)

Modèle 6.1 : Aix ouest

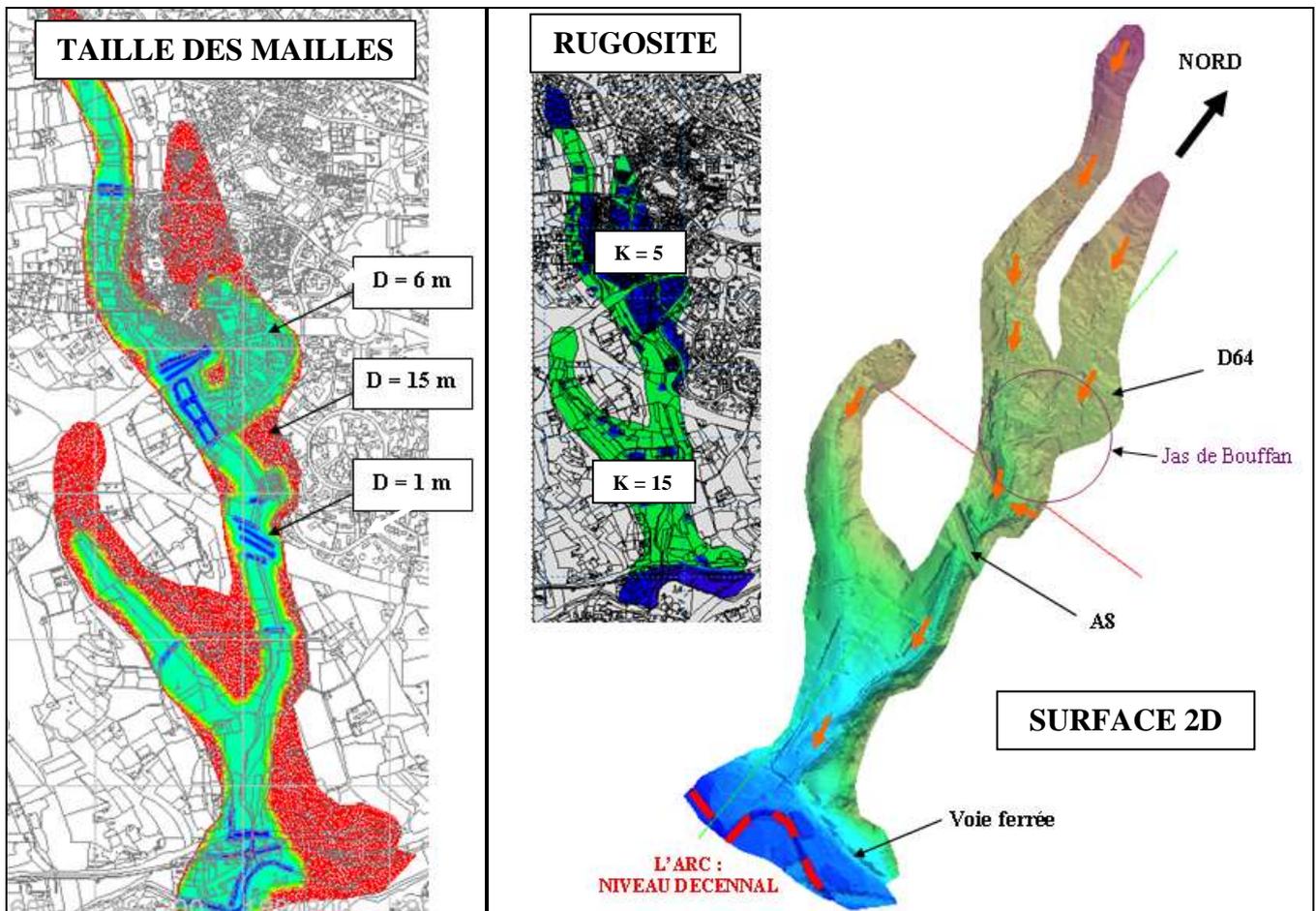
Emprise	1 308 ha
Affluents modélisés	<p>Sur ce modèle, le réseau d'évacuation des eaux pluviales du secteur « Aix ouest » est modélisé. Il se décompose en 16 principaux secteurs correspondant aux 5 exutoires retenus se jetant dans l'Arc :</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 2 au niveau de l'entreprise Brossette : <ul style="list-style-type: none"> ◆ Deux Ormes ; ◆ Jas de Bouffan. ✓ 1 au niveau de l'avenue du Camp de Menthe : <ul style="list-style-type: none"> ◆ Constance. ◆ 5 au niveau de l'exutoire Club Hippique : <ul style="list-style-type: none"> ◆ Galice ; ◆ Maurice David ; ◆ Martelly ; ◆ Club Hippique ; ◆ A51 ; ✓ 7 au niveau du Berthomiou : <ul style="list-style-type: none"> ◆ Calendal ; ◆ Baudouin ; ◆ Méjanes ; ◆ Kennedy ; ◆ Saint-Exupéry ; ◆ Maréchal Juin ; ◆ Berthomiou. ✓ 1 à l'est du Berthomiou où se trouvent les bâtiments de la Communauté du Pays d'Aix.
Type de modélisation	Couplage surface 2D – réseau 1 D
Nombre de maille du modèle	323 087
Taille des mailles	<p>10 m en tête de bassin versant</p> <p>15 à 20 m sur les zones urbanisées</p> <p>30 m ailleurs</p>
Régime de la modélisation	Régime transitoire
Conditions limites	<p>Amont : injection d'hydrogrammes dans le réseau 1D</p> <p>Aval : niveau de crue décennale de l'Arc</p>



Modèle 6.2 : Thumine

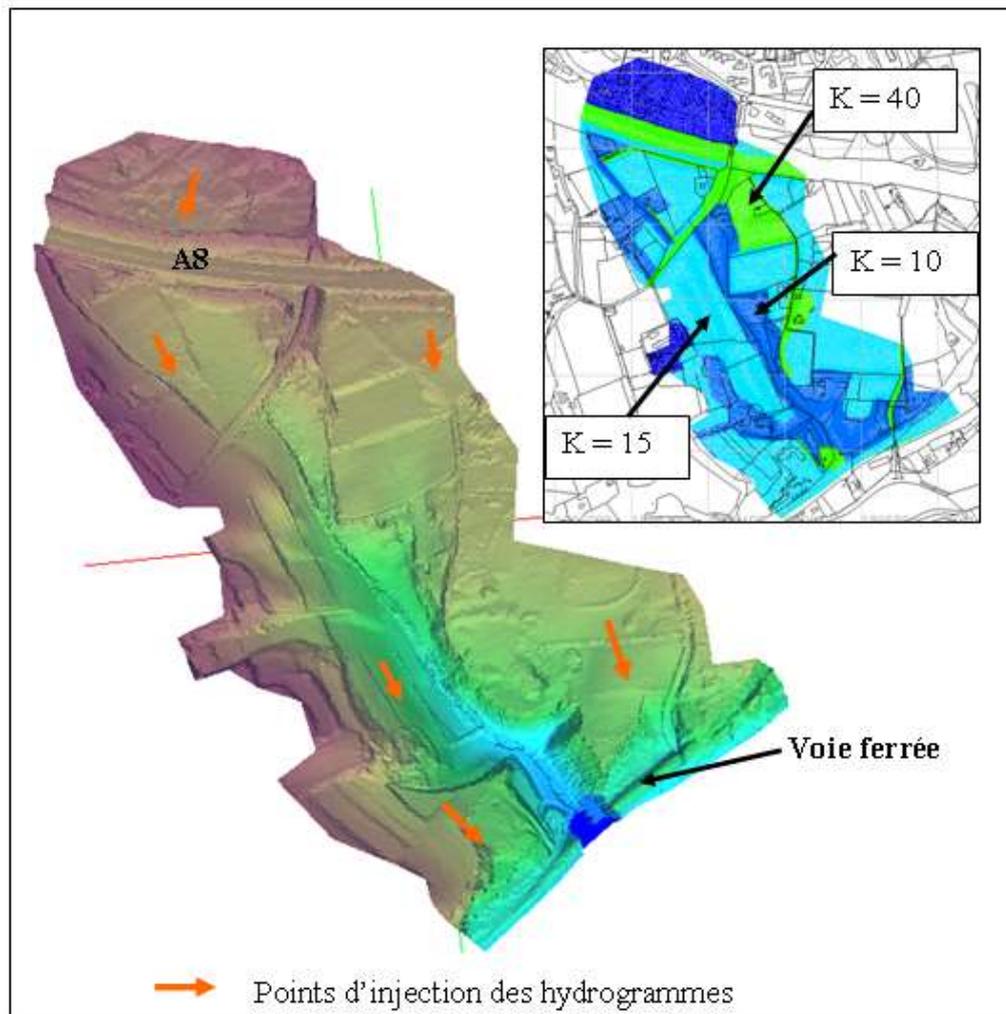
Emprise	189 ha
---------	--------

Affluents modélisés	La Thumine
Type de modélisation	Couplage 2D surface et 1D pour les ouvrages hydrauliques
Nombre de maille du modèle	115 686
Taille des mailles	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 1 m le long des lignes structurantes (bassins, ouvrages, routes) ✓ 6 m dans l'emprise hydrogéomorphologique ✓ 15 m ailleurs
Régime de la modélisation	Régime transitoire
Conditions limites	<p>Amont : injection d'hydrogrammes sur le maillage 2D</p> <p>A l'aval : niveau d'eau en crue décennale de l'Arc</p>



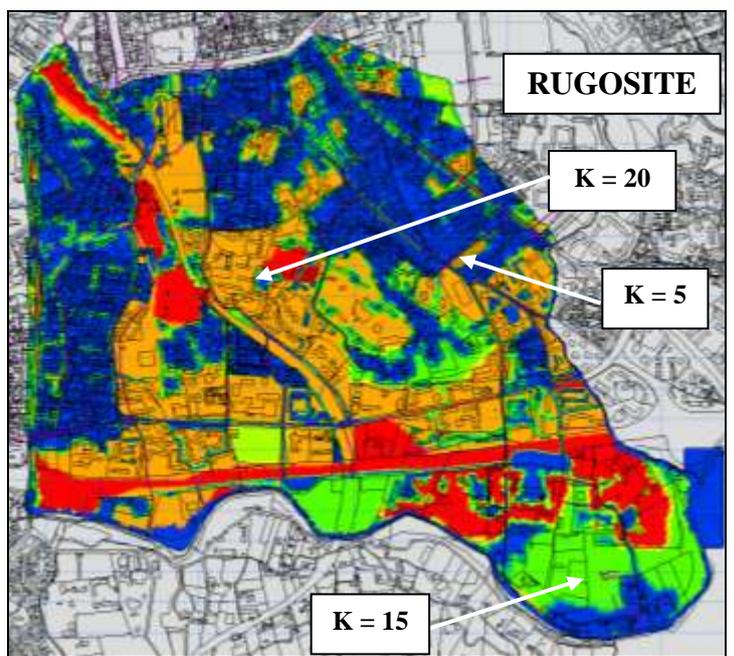
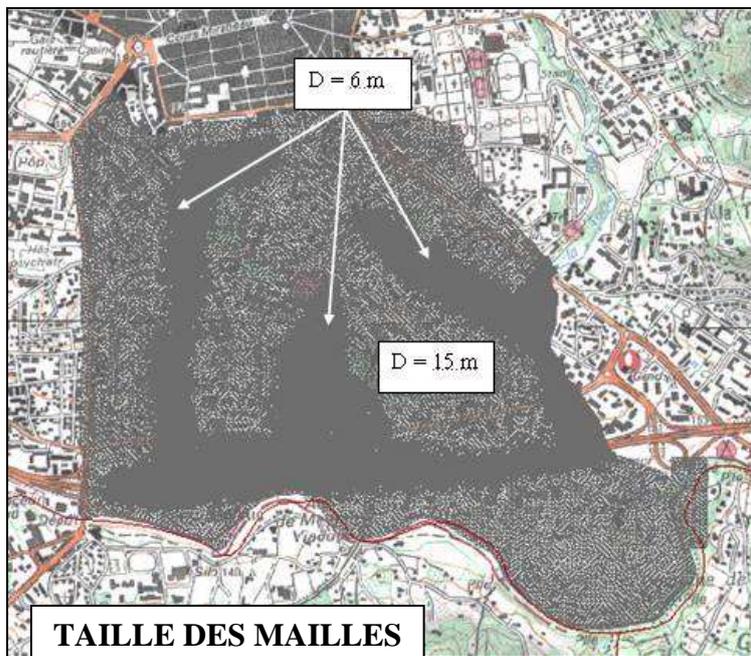
3.3.7 La Constance (7)

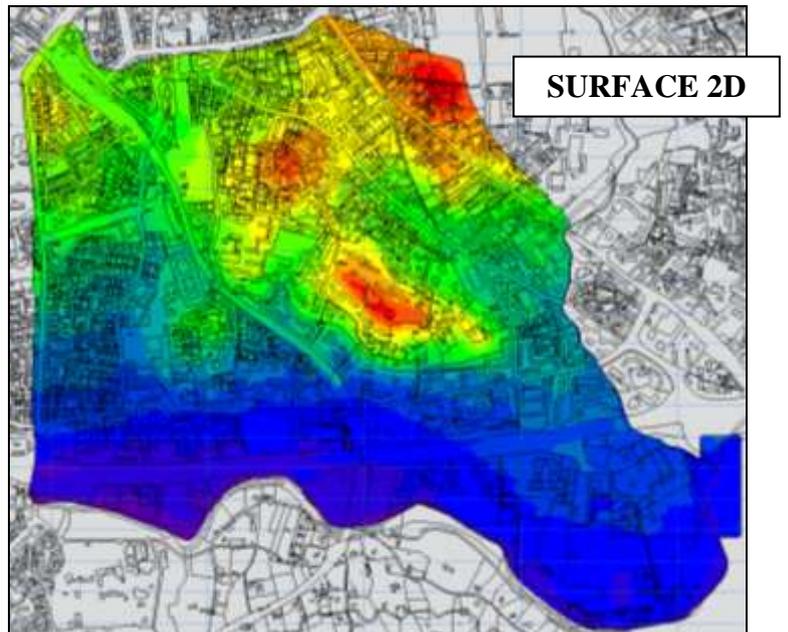
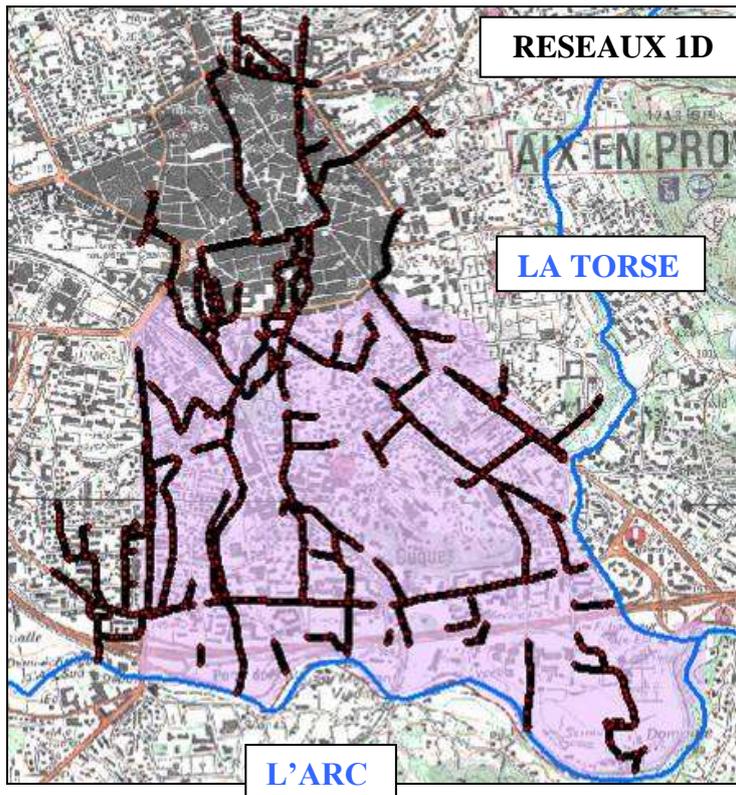
Emprise	54 ha
Affluents modélisés	Le vallon du lieu dit la constance
Type de modélisation	2D surface
Nombre de maille du modèle	129 144
Taille des mailles	1 m le long des axes d'écoulement et axes routiers et ferroviaires 5 m ailleurs
Régime de la modélisation	Régime transitoire
Conditions limites	Amont : injection d'hydrogrammes sur le maillage 2D Aval : Niveau de crue décennale sur l'Arc



3.3.8 Centre Ville (8)

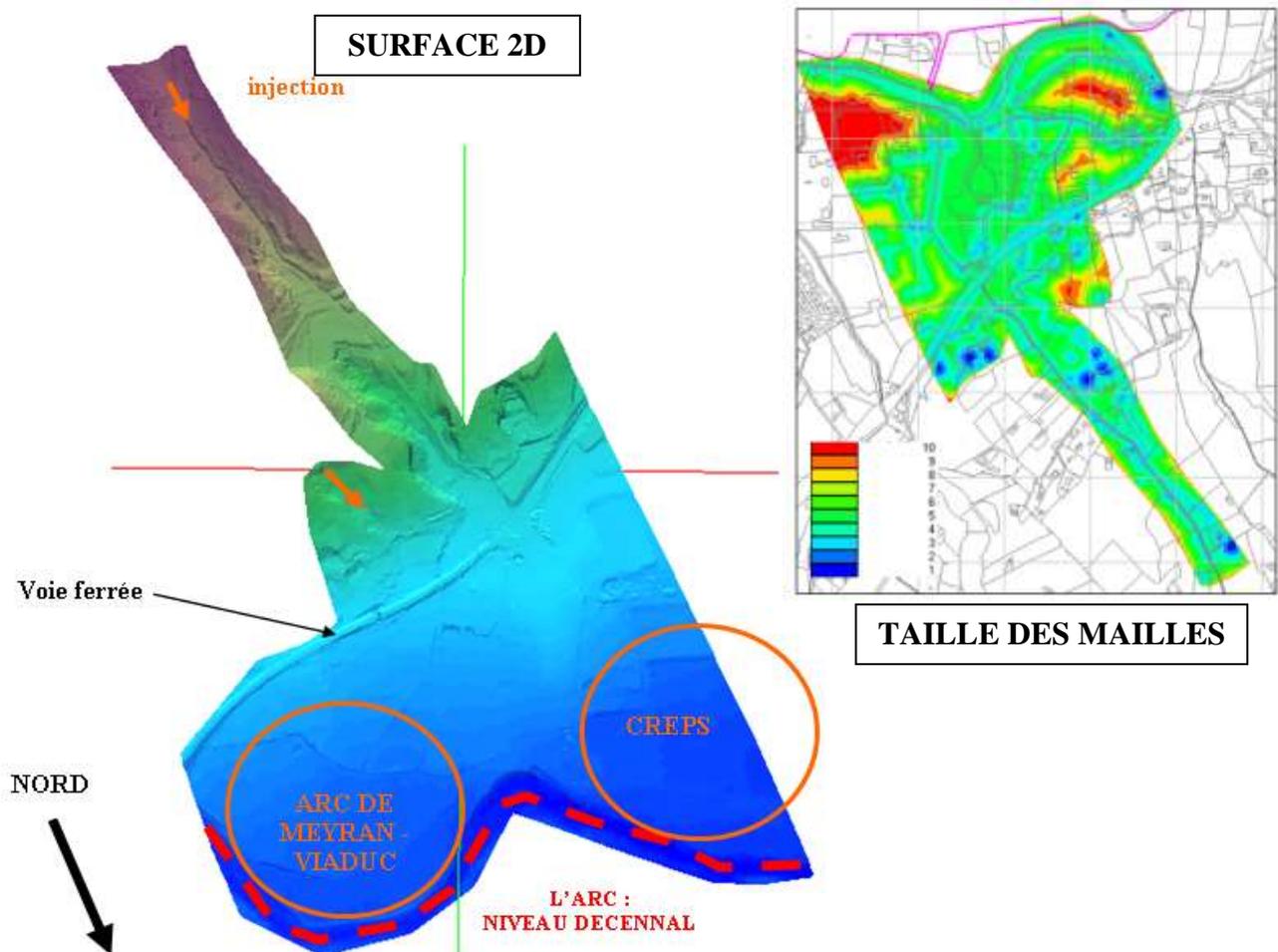
Emprise	286 ha
Affluents modélisés	La Torse et les 2 vallons urbanisés à l'ouest de la Torse
Type de modélisation	Couplage 2D surface et 1D réseau
Nombre de maille du modèle	108 652
Taille des mailles	6 m dans l'axe des vallons 15 m ailleurs
Régime de la modélisation	Régime transitoire
Conditions limites	Amont : injection d'hydrogrammes dans le réseau 1D et sur le modèle surfacique 2D Aval : niveau de crue décennale de l'Arc





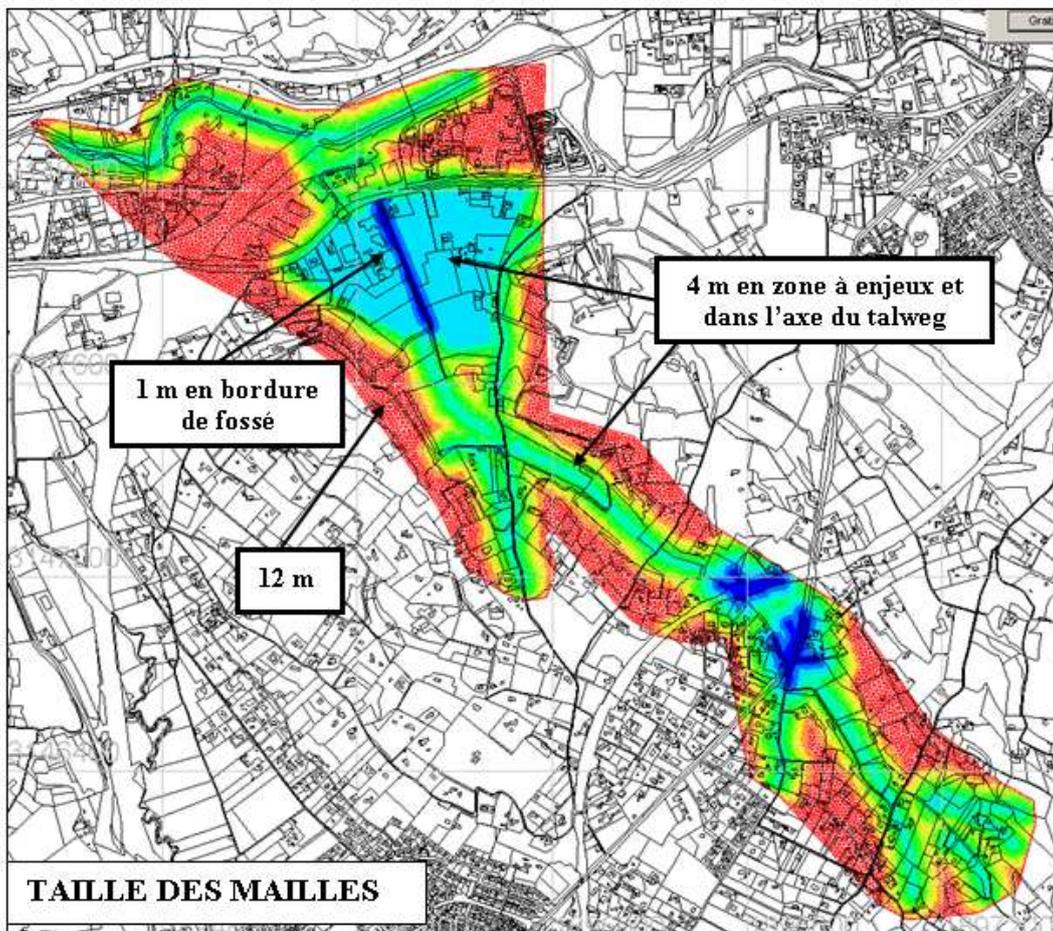
3.3.9 Viaduc (10)

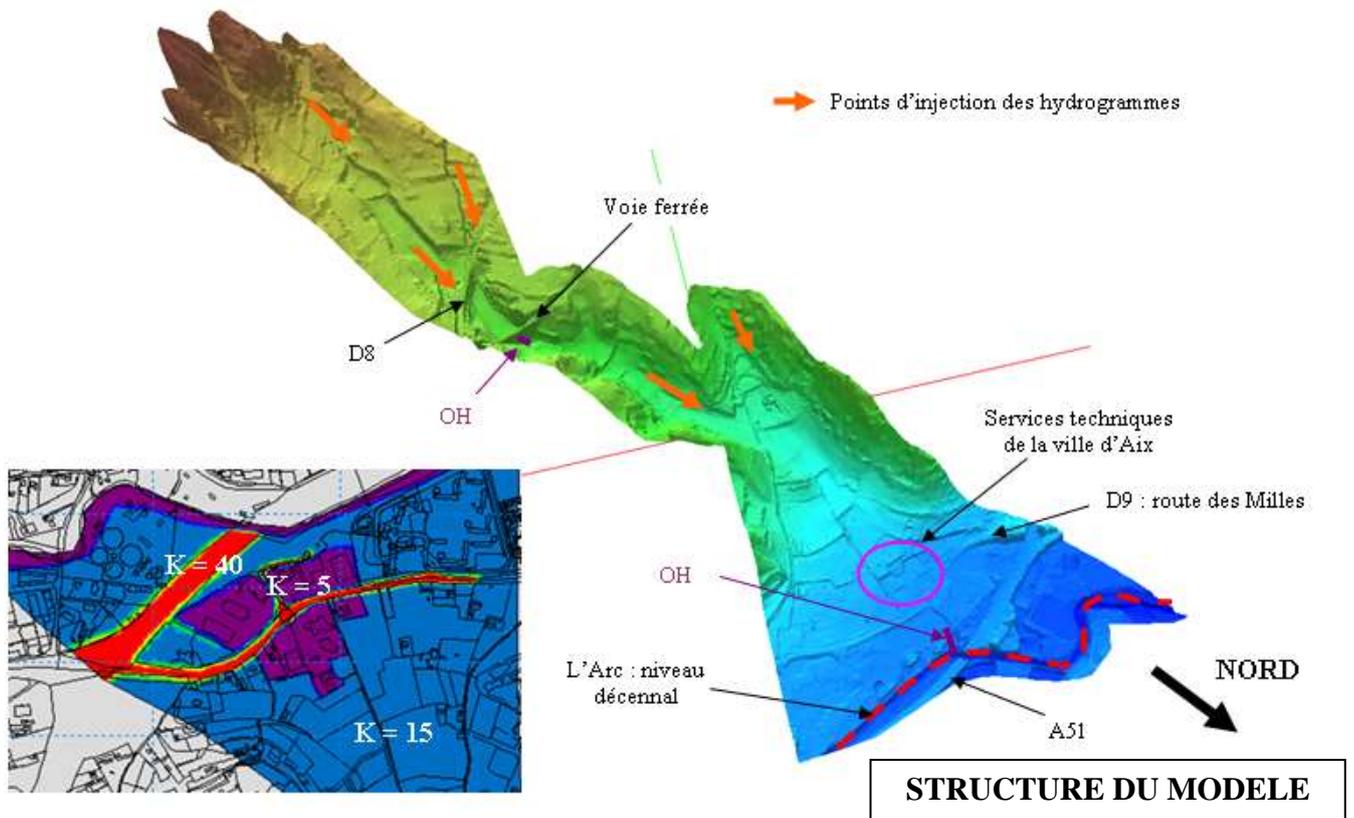
Emprise	54 ha
Affluents modélisés	Vallon en rive gauche de l'Arc débouchant sur le lieu dit « Arc de Meyran – Viaduc »
Type de modélisation	Surfacique 2D
Nombre de maille du modèle	45 863
Taille des mailles	3.5 m dans l'axe du vallon et sur les axes routiers et ferroviaires De 5 à 10 m ailleurs
Régime de la modélisation	Régime permanent
Conditions limites	Amont : injection d'hydrogrammes sur le modèle surfacique 2D Aval : niveau de crue décennale de l'Arc



3.3.10 Vallon de la Blaque (11)

Emprise	214 ha
Affluents modélisés	Le vallon de la Blaque sur tout son linéaire
Type de modélisation	Couplage surface 2D – ouvrages hydrauliques 1D
Nombre de maille du modèle	163 123
Taille des mailles	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 1 m (le long des fossés et à proximité des ouvrages) ; ✓ 4 m (sur les secteurs urbanisés et dans l'axe du talweg) ; ✓ 12 m en lit majeur.
Régime de la modélisation	Régime transitoire
Conditions limites	<p>A l'amont : injection d'hydrogrammes répartis le long du linéaire de la Blaque</p> <p>A l'aval : niveau d'eau en crue décennale de l'Arc</p>

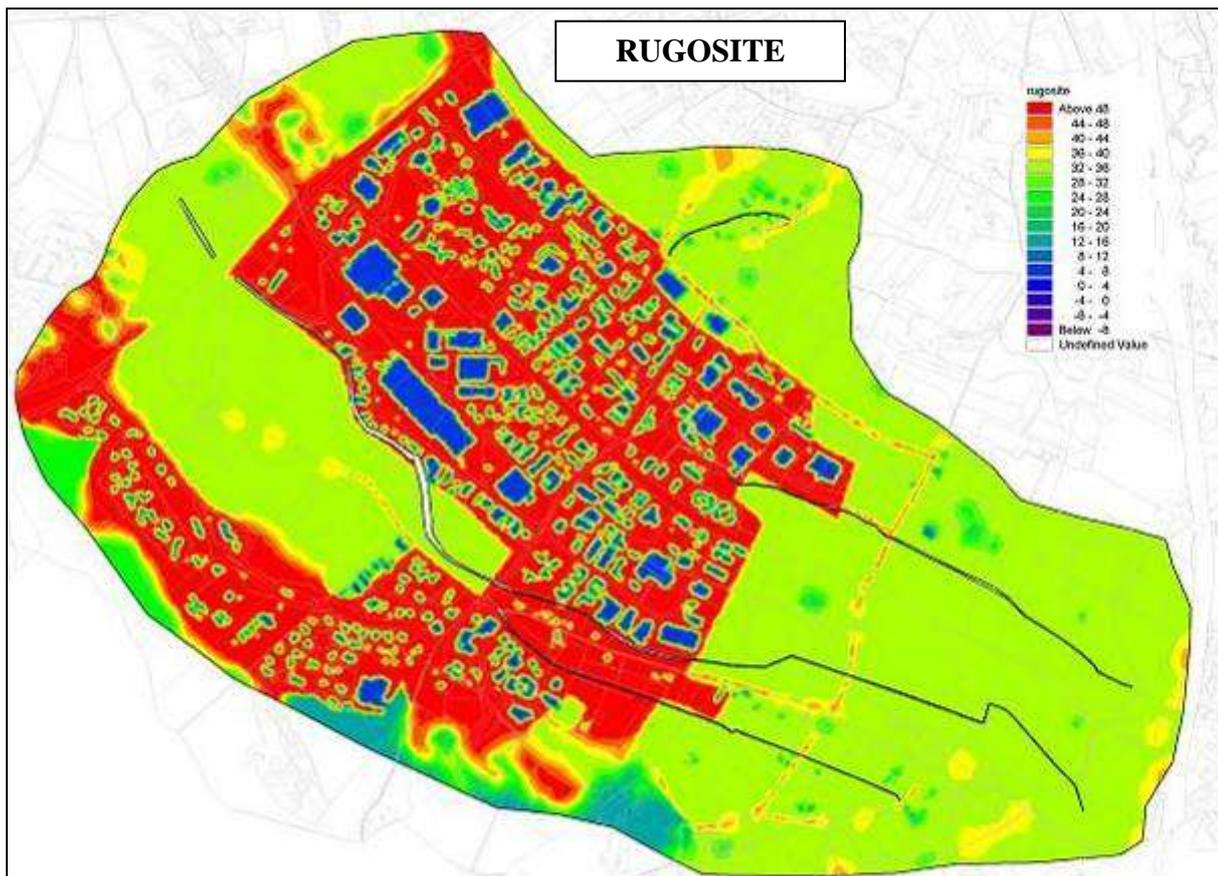


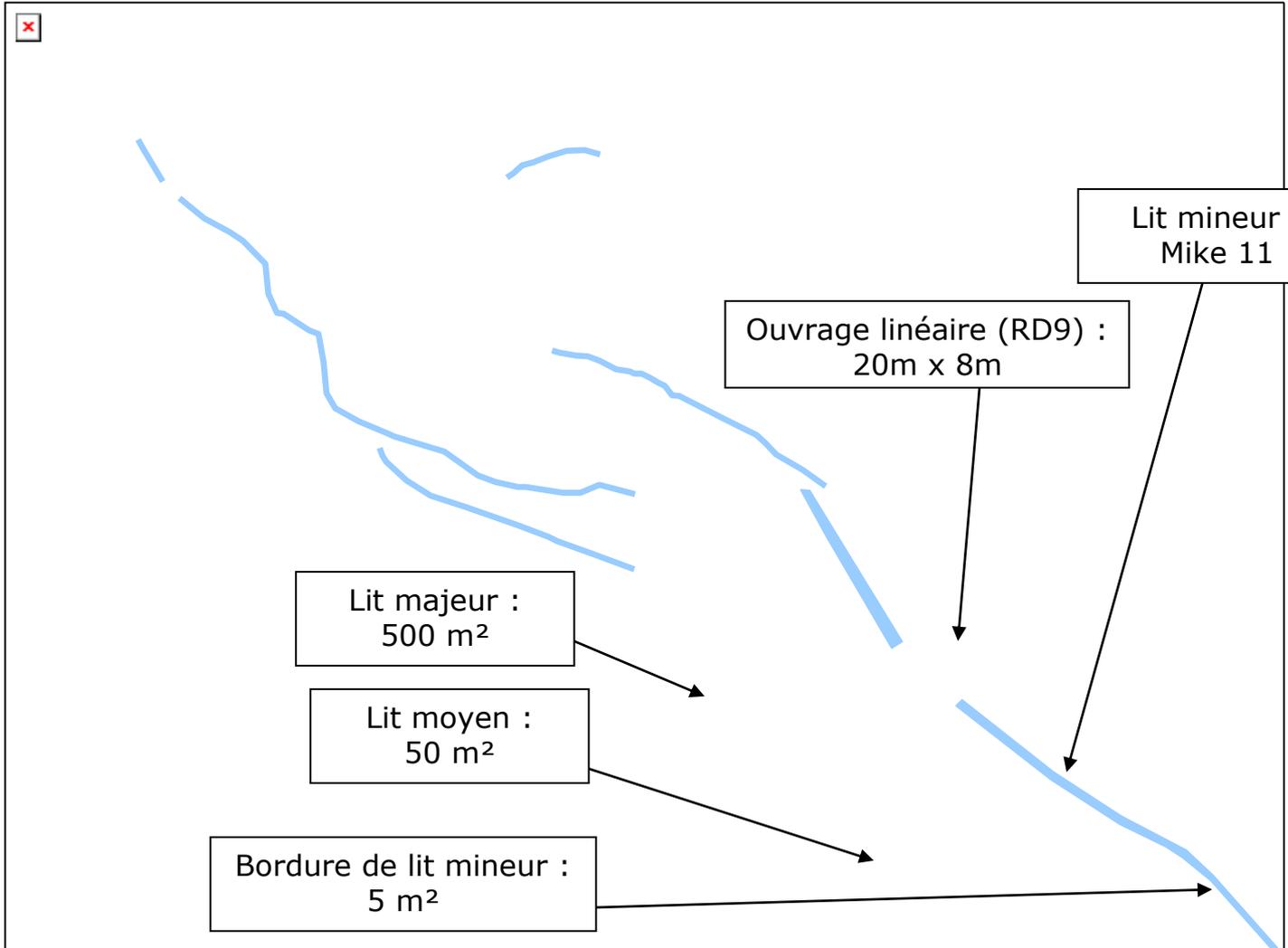


3.3.11 Les Milles ZI (13)

Modèle 13.1 : les Milles amont

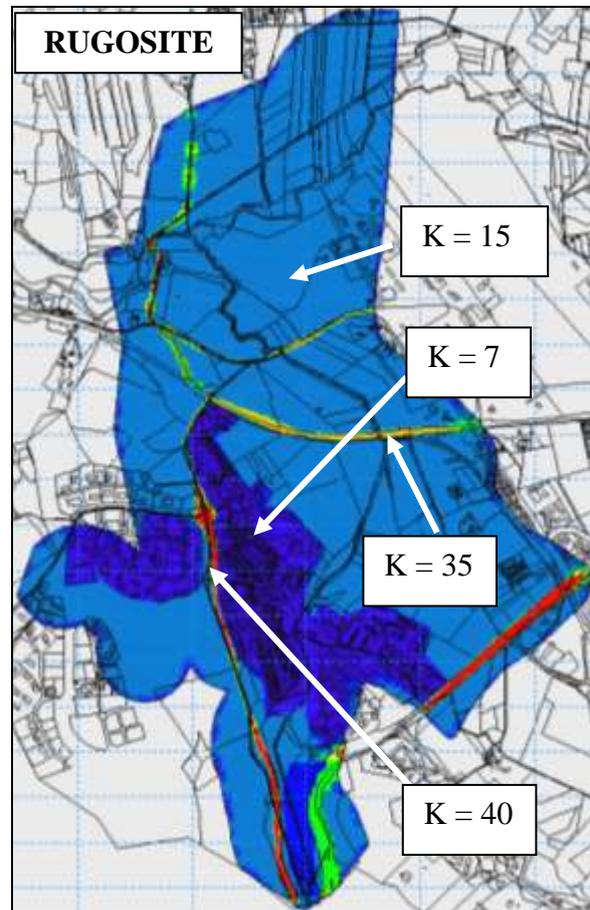
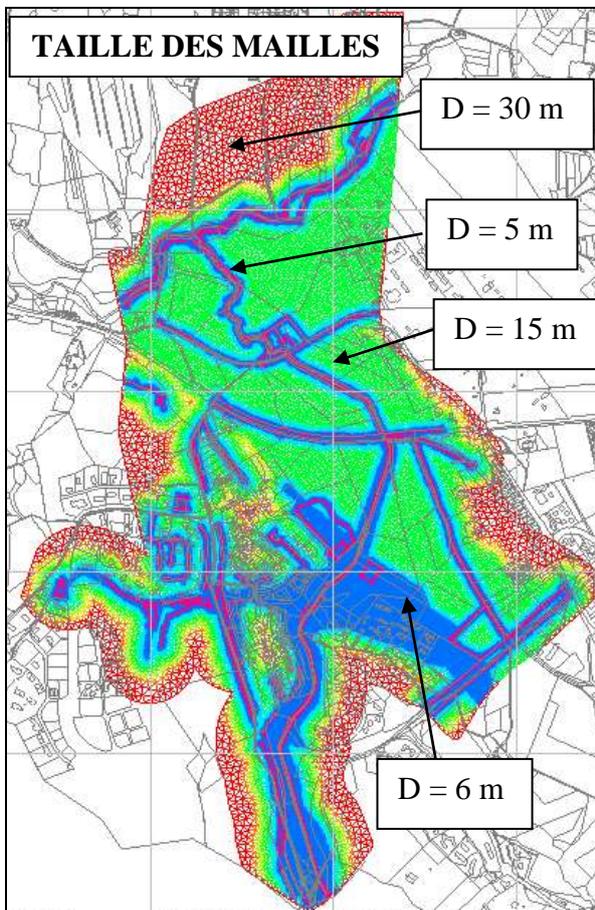
Emprise	776 ha
Affluents modélisés	La petite Jouine – Le Grand Vallat – Le Ruisseau Robert
Type de modélisation	Couplage réseau 1D – cours d'eau 1D – surface 2D
Nombre de maille du modèle	154 569
Taille des mailles	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 5 m² (en bordure de lit mineur) ; ✓ 50 m² lit moyen ; ✓ 500 m² en lit majeur.
Régime de la modélisation	Régime transitoire
Type d'aléa	Cours d'eau
Conditions limites	<p>A l'amont : injection d'hydrogrammes sur le 2D surface et dans le réseau 1D</p> <p>A l'aval : hauteur critique sur la RD9</p>
Remarques	Définition du remblai routier de la RD9

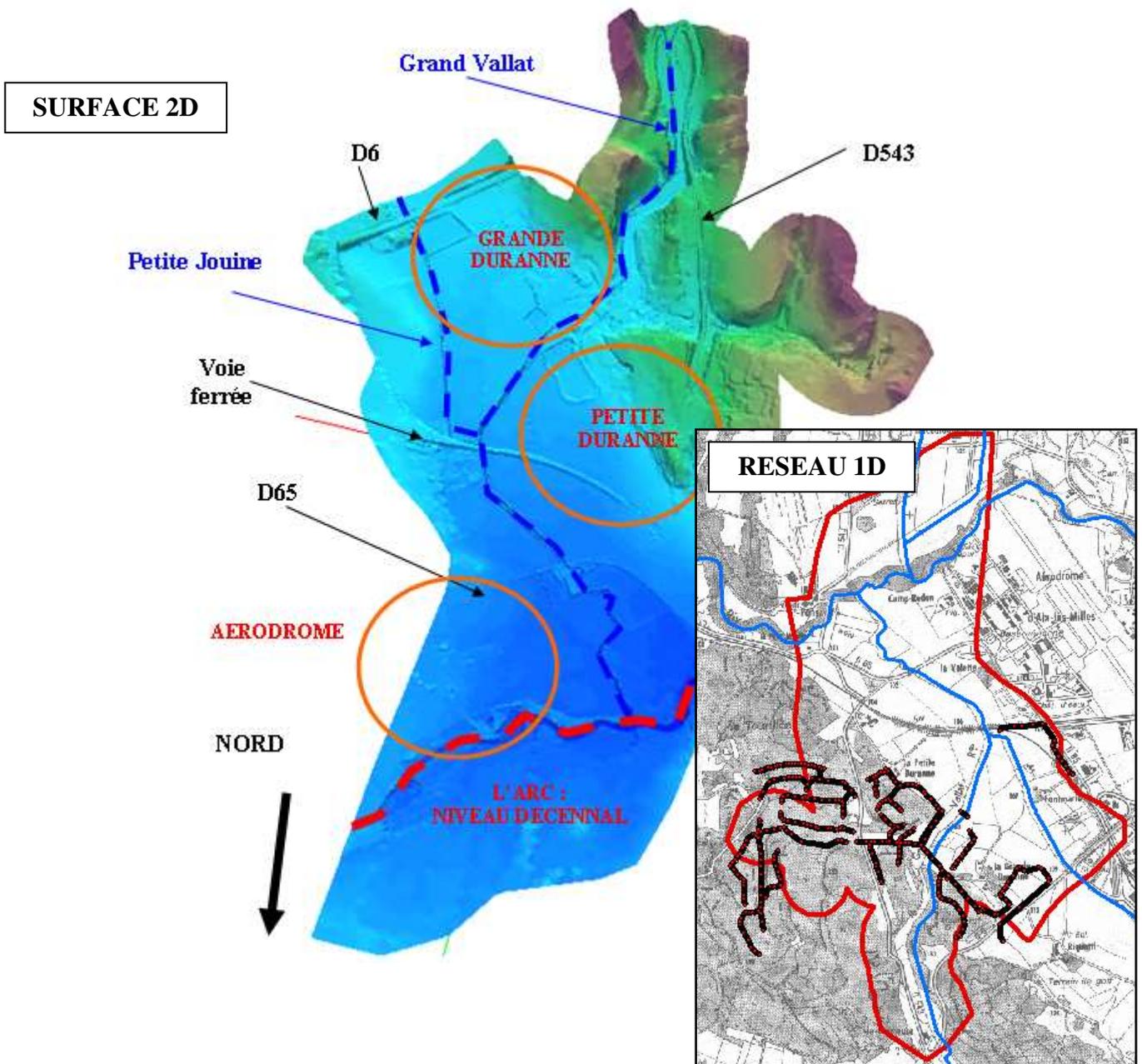




Modèle 13.2 : les Milles aval (ZAC Duranne)

Emprise	470 ha
Affluents modélisés	La petite Jouine – Le Grand Vallat
Type de modélisation	Couplage réseau 1D – surface 2D
Nombre de maille du modèle	11 191
Taille des mailles	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 5 m en bordure de lit mineur et fossé et axe routier; ✓ 6 m à 15 m en emprise hydrogéomorphologique ; ✓ 30 m ailleurs
Régime de la modélisation	Régime transitoire
Conditions limites	<p>A l'amont : injection d'hydrogrammes sur le 2D surface et dans le réseau 1D</p> <p>A l'aval : l'Arc en crue décennale</p>





4 Évaluation de l'aléa

La carte d'aléa a été déterminée par le croisement des valeurs maximales des hauteurs et des vitesses en tout point du modèle.

Deux grilles de caractérisation de l'aléa ont été créées afin de caractériser au mieux l'aléa en fonction de la cause de l'inondation :

- Si les inondations sont majoritairement engendrées par des débordements de réseaux pluviaux (conduites ou fossés) et des débordements de vallons urbains, la grille aléa ruissellement est retenue ;
- Si les inondations sont principalement engendrées par des débordements de talwegs en milieu naturel, la grille aléa cours d'eau est appliquée."

La grille aléa ruissellement comporte les 4 suivantes:

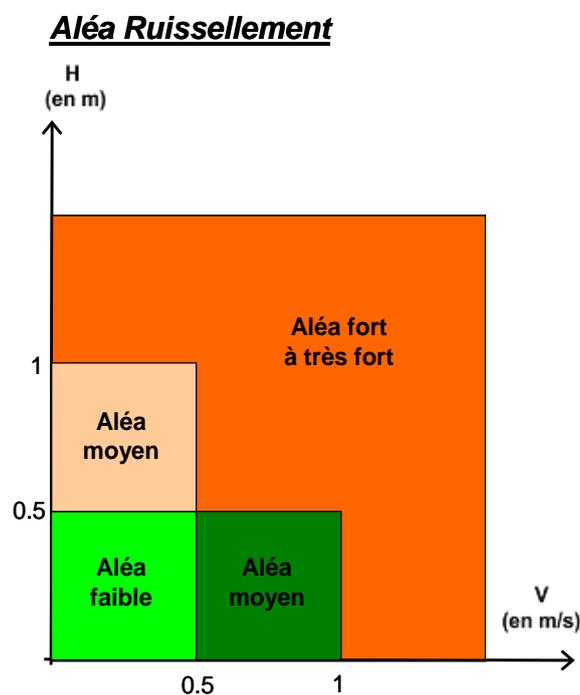


Figure 4-1 : Aléa ruissellement

La grille aléa cours d'eau comporte 2 classes :

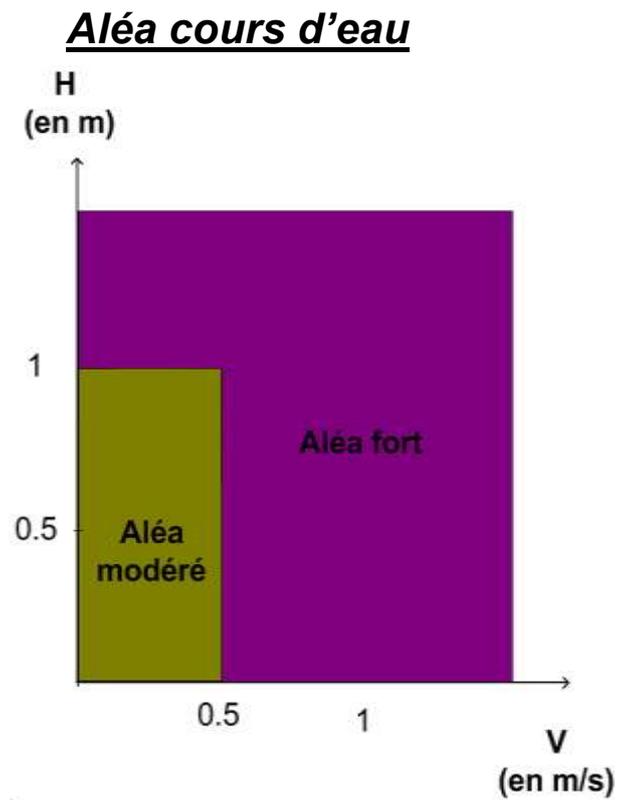


Figure 4-2 : Aléa cours d'eau

5 Correction et lissage de l'aléa

5.1 Correction des données HGM

Des discordances sont apparues sur certains secteurs entre l'enveloppe hydrogéomorphologique établie par SIEE et l'enveloppe de la zone inondable issue des modélisations hydrauliques. L'enveloppe hydrogéomorphologique SIEE a donc été modifiée à partir d'une nouvelle analyse hydrogéomorphologique (analyse du terrain, de la géologie...) et de l'exploitation de la topographie issue du lidar avec l'algorithme Exzeco (300 itérations, lidar 1m, bruitage 1m).

4 secteurs ont fait l'objet de correction. Ils sont présentés ci-dessous.

Secteur de Celony

Justification : mauvais positionnement de l'HGM (pour partie en crête de bassin versant)

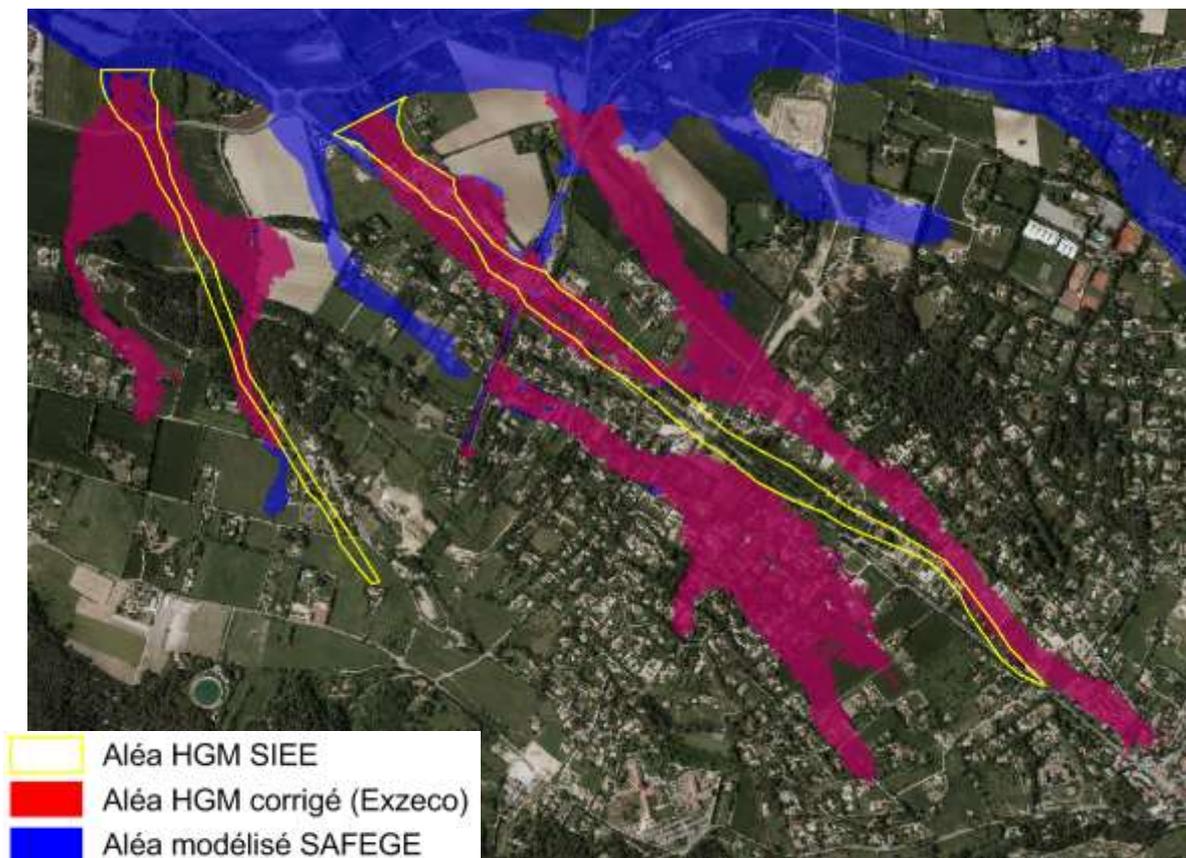


Figure 5-1 : aléa redéfini sur le secteur de Celony

Luynes, Frères Gris

Justification : mauvais débouché de l'HGM (pour partie en crête)

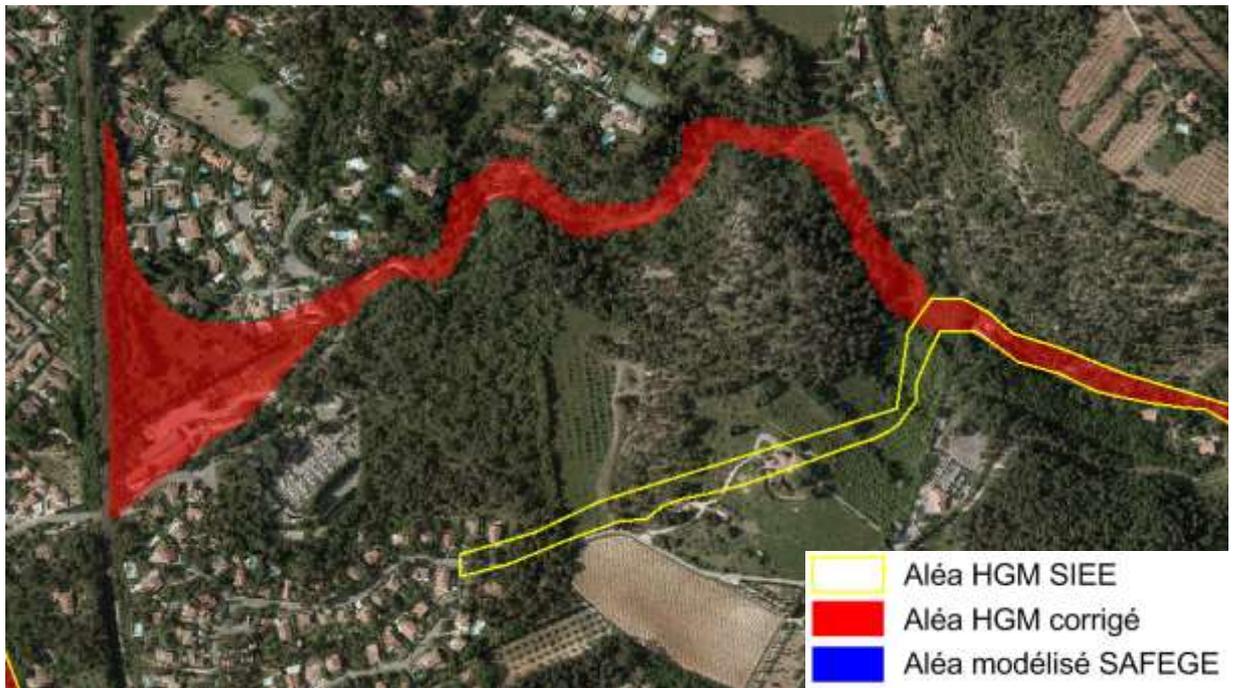


Figure 5-2 : aléa redéfini sur le secteur de Luynes, Frères Gris

Luynes, Mas de Luynes

Justification : mauvais positionnement de l'HGM par rapport à l'axe d'écoulement.

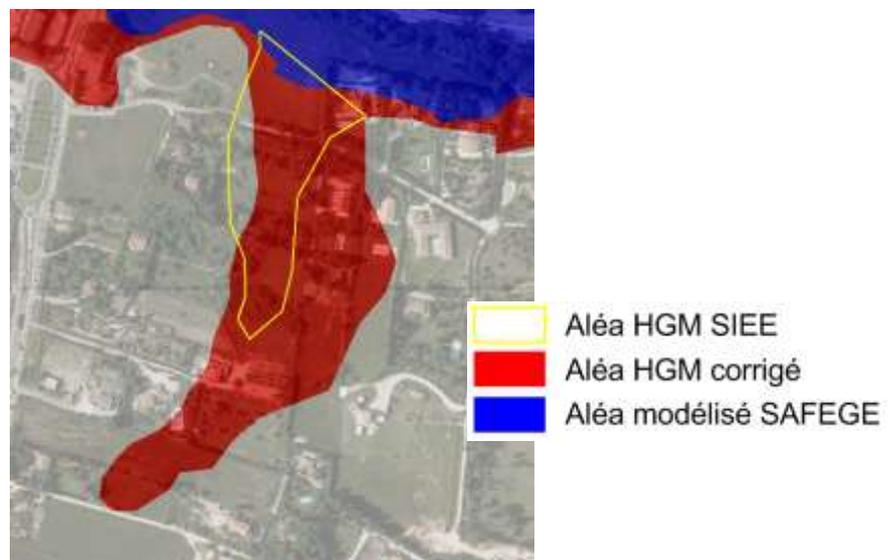
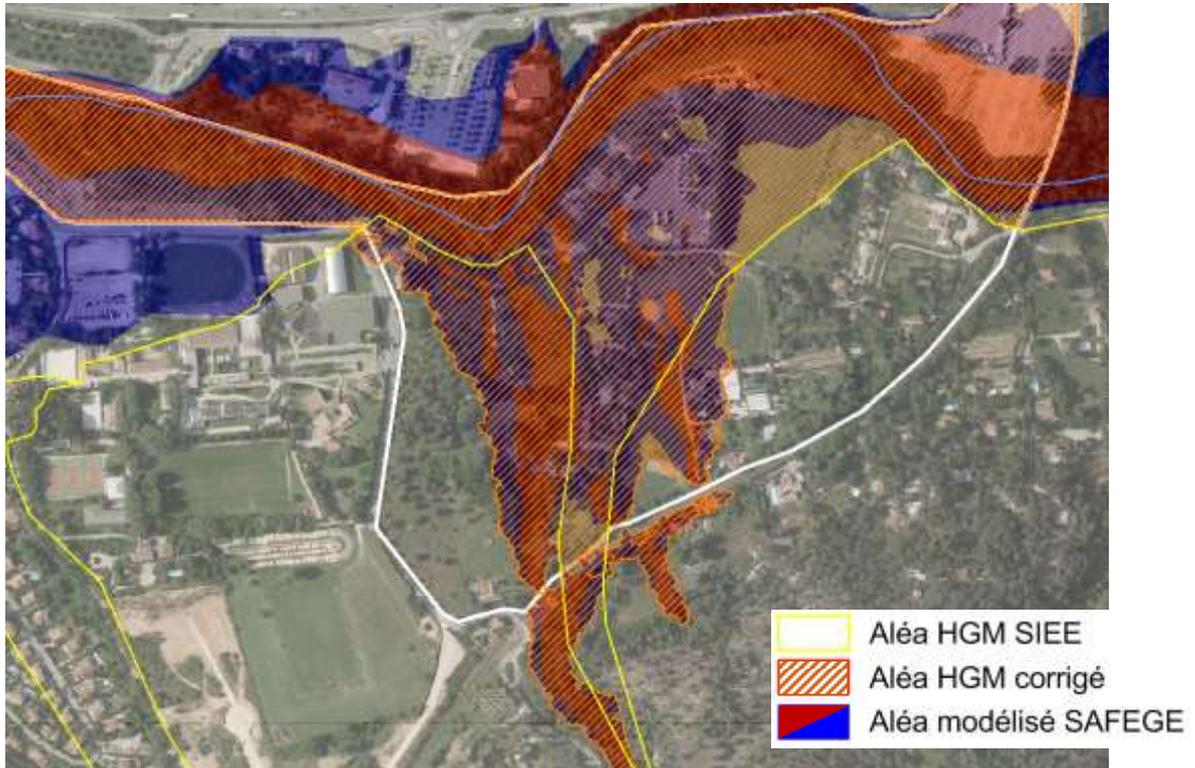


Figure 5-3 : aléa redéfini sur le secteur de Luynes, Mas de Luynes

Aix-en-Provence, La Pauliane

Justification : l'emprise HGM ne prenait pas en compte le remblai de la voie ferrée. L'aléa HGM a été redéfini par la fusion de l'HGM existant et de l'aléa résultant de la modélisation d'une crue exceptionnelle de période de retour 1000 ans.



5.2 Lissage

Tout au long du processus de validation des résultats de modélisation, les résultats bruts de la modélisation 2D ont été présentés sous la forme d'une mosaïque de triangles de plus ou moins grande superficie, de quelques m² à quelques centaines de m². Du croisement des hauteurs vitesses résulte une cartographie morcelée, présentant un caractère de pastillage, ce qui la rend délicate à utiliser pour l'établissement d'un zonage réglementaire. Cette représentation, peu physique, avait pour avantage de conserver les valeurs exactes des résultats de modélisation, sans reclassification des données et donc sans perte d'information.

Le Maître d'Ouvrage a donc souhaité que soit réalisée une prestation de simplification et lissage de l'aléa, destinée à adapter l'aléa pour l'établissement d'un zonage inondation à annexer au PLU.

Ce travail a été réalisé selon les étapes suivantes :

- Suppression des éléments d'aléas isolés dont la superficie est inférieure à 100 m².

- Traitement hiérarchique des couches d'aléas à l'aide de l'algorithme de Chaikin disponible dans le logiciel GRASS_SIG pour lissage.
- Finalisation manuelle du lissage par un opérateur.

Un exemple de ce travail de lissage est présenté ci-dessous.

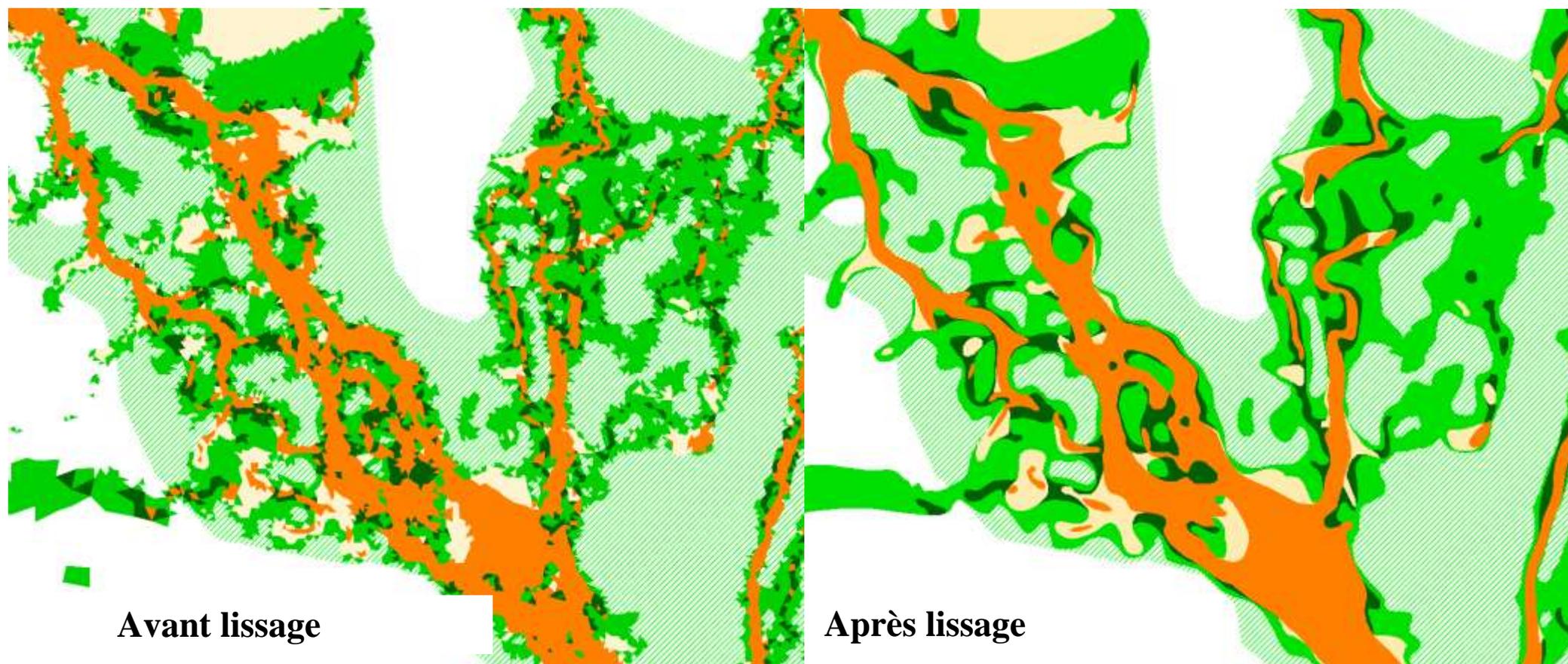


Figure 5-4 : exemple de simplification et de lissage de l'aléa