



AMO POUR LA GESTION INTEGREE DU RISQUE D'INONDATION DES VIEUX SALINS ET AMELIORATION DE LA QUALITE DES EAUX DES CANAUX DE CEINTURE DES SALINS D'HYERES – ETUDE DE PROGRAMMATION

PHASE B – ANALYSE DU RUISSELLEMENT ET DU
TRANSPORT SEDIMENTAIRE – VIEUX SALINS

26 novembre 2019



Informations relatives au document

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Auteur(s)	Jonathan Cantarel / Alexis Chambe
Volume du document	Phase B : Analyse du ruissellement et transport sédimentaire
Version	V2
Référence	RIV0002

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Rédigé par	Visé par	Modifications
V1	24/07/2019	Jonathan Cantarel, Alexis Chambe	Hélène Maury	Version initiale
V2	26/11/2019	Jonathan Cantarel, Alexis Chambe	Hélène Maury	Compléments suite aux retours du SMBVG

DESTINATAIRES

Nom	Entité
Frédérique GIMOND-LANTERI	MTPM

SOMMAIRE

1 - CONTEXTE ET OBJECTIFS	5
1.1 - Contexte de l'étude	5
1.2 - Objectifs de l'étude	6
1.3 - Objectifs de la Phase B	6
2 - ANALYSE DU RUISSELLEMENT	7
2.1 - Définition du modèle hydraulique du ruissellement	7
2.1.1 - Emprise du modèle	7
2.1.2 - Maillage de calcul	7
2.1.3 - Caractéristiques des sous-bassins versants	9
2.1.3.1 - Définition des sous-bassins versants	9
2.1.3.2 - Définition des coefficients de ruissellement	10
2.1.3.3 - Définition des coefficients de rugosité	13
2.1.4 - Caractérisation de la pluviométrie	13
2.1.4.1 - Pluies de projet	13
2.1.4.2 - Pluie réelle de janvier 2014	17
2.2 - Calage du modèle	17
2.2.1 - Méthodologie	17
2.2.2 - Limites de la modélisation	19
2.2.3 - Résultats du calage	19
2.3 - Résultats	25
2.3.1 - Zones d'accumulation	25
2.3.2 - Axes d'écoulements	27
3 - ANALYSE QUALITATIVE DU TRANSIT SEDIMENTAIRE	29
3.1 - Caractérisation de l'évolution morphodynamique	29
3.1.1 - Principes de base	29
3.1.2 - Evolution morphodynamique à l'échelle des Vieux Salins	29
3.1.2.1 - Evolution morphologique	29
3.1.2.2 - Evolution du réseau hydrographique	31
3.1.2.3 - Evolution du lit des vallons observés sur le terrain	32
3.1.2.4 - Evolution des fossés pluviaux observés sur le terrain	33
3.1.3 - Synthèse	34
3.2 - Evaluation du transport solide	36
3.2.1 - Origine des matériaux solides	36
3.2.2 - Zones d'érosion sur le bassin versant	38
3.2.2.1 - Pluie de janvier 2014	40
3.2.2.2 - Pluie centennale	43
3.2.3 - Zone de dépôts	45
3.2.4 - Impact des ouvrages	46
3.3 - Conclusions	46

REFERENCES

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Localisation de la zone d'étude (source : Contrat de Baie Iles d'Or, TPM)	5
Figure 2 - emprise du modèle de ruissellement	7
Figure 3 - Présentation des zones de maillage du modèle	8
Figure 4 - Présentation du maillage à proximité des bâtiments	8
Figure 5 - Localisation des sous-bassins versants	9
Figure 6 - Schéma de principe de la corrélation entre imperméabilisation et ruissellement (source : www.coastal.ca.gov/nps/watercyclefacts.pdf)	10
Figure 7 - Occupation du sol sur le secteur d'étude (source : Corine land cover 2012)	11
Figure 8 - Histogramme des hauteurs de pluies en fonction du temps pour les pluies de projet	14
Figure 9 - Pluie de projet Keifer exceptionnelle de type Cap Cépet 2006, durée intense 15 minutes	16
Figure 10 - Relevés PHE disponibles et exploités pour le calage du modèle de ruissellement	18
Figure 11 - Relevés PHE disponibles et exploités pour le calage du modèle de ruissellement	21
Figure 12 – Comparaison phe / résultats modélisation – secteur ouest	22
Figure 13 - Comparaison phe / résultats modélisation – secteur est	23
Figure 14 - Principales Zones d'accumulations dans le modèle	26
Figure 15 - Principaux axes d'écoulements	28
Figure 16 - obstruction du canal de ceinture par transport solide	32
Figure 17 - Zones d'excavation defossé pluvial	33
Figure 18 – schéma de fonctionnement des érosions régressive et progressive	33
Figure 19 – évolution morphodynamique des vallons	35
Figure 20 - Incendie entre Hyères et la londes-les-maures	36
Figure 21 – cartographie de la géologie du bassin versant des vieux salins	37
Figure 22 – cartographie des pentes moyennes d'écoulement	38
Figure 23 - Transport solide sur la partie Ouest des Vieux Salins	40
Figure 24 - Transport solide sur la partie nord des vieux salins	41
Figure 25 - Cartographie de la force tractrice générée par les eaux de ruissellement lors de la pluie de janvier 2014	42
Figure 26 - Cartographie de la force tractrice générée par les eaux de ruissellement d'une pluie de période de retour 100 ans	44
Figure 27 - Confluence entre vallon et canal de ceinture (partie Ouest des vieux salins)	45
Figure 28 - Confluence entre vallon et canal de ceinture (partie Nord des vieux salins)	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des sous-bassins versants	9
Tableau 2 : Coefficients de ruissellement des sous-bassins versants	11
Tableau 3 : coefficients de ruissellement preconises par la doctrine misen 83	11
Tableau 4 : Paramètres des pluies de projet 10 et 100 ans	14
Tableau 5 : Pluie exceptionnelle de Cap Cépet 2006	15
Tableau 6 : pluie du 19 janvier 2014	17
Tableau 7 : comparaison des volumes infiltrés selon le modèle utilisé	24
Tableau 8 : Limite de force tractrice pour différents matériaux	39
Tableau 9 : Valeurs des coefficients en fonction de la forme du cours d'eau	39

1 - CONTEXTE ET OBJECTIFS

1.1 - Contexte de l'étude

Les Salins d'Hyères sont composés en deux grandes entités : le Salin des Pesquiers (550 hectares) et les Vieux Salins (350 hectares). Ils sont propriété du Conservatoire du Littoral et sont gérés par la Métropole de Toulon Provence Méditerranée, assistée du Parc National de Port-Cros et de la ville d'Hyères.



FIGURE 1 - LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE (SOURCE : CONTRAT DE BAIE ILES D'OR, TPM)

Ces sites constituent aujourd'hui des plans d'eau de profondeur, surface et salinité variable, présentant un intérêt culturel et historique mais également un intérêt écologique important.

Par ailleurs, les deux sites font l'objet d'un second plan de gestion récemment validé dont les orientations correspondent à une préservation visant d'une part, à accroître leur intérêt écologique et paysager, et d'autre part, à y développer une ouverture raisonnée au public. Il s'agit également d'intégrer les sites aux enjeux socio-économiques locaux comprenant la gestion des risques majeurs.

Territoires de l'entre terre et mer, ces sites sont le réceptacle des eaux des bassins versants immédiats et sont sous l'influence des cotes marines car en lien direct avec la mer via les canaux d'alimentation. Ils sont ainsi soumis à deux types de risques :

- Le risque inondation par débordement de cours d'eau, ruissellement et surcotes marines ;
- Le risque de pollutions chronique ou accidentelle particulièrement dans les canaux de ceinture.

1.2 - Objectifs de l'étude

L'étude de programmation fixe les deux objectifs principaux suivants :

- **Prévenir le risque inondation** des zones habitées en amont et en aval des Vieux Salins selon un schéma de gestion intégrant les équilibres écologiques et paysagers de ce site naturel remarquable ;
- **Limiter les risques de pollution** et améliorer la qualité des eaux des canaux de ceinture des Vieux Salins et du Salin des Pesquiers.

L'étude est articulée selon 6 phases :

- **Phase A** : Etat des lieux
- **Phase B** : Analyse du ruissellement et du transport sédimentaire (Vieux Salins)
- **Phase C** : Modélisation hydraulique en situation d'aléas (Vieux Salins)
- **Phase D** : Etude des incidences au regard des outils et des objectifs de gestion naturalistes et paysagers
- **Phase E** : Caractérisation des contaminants impactant la qualité des milieux aquatiques
- **Phase F** : Définition du programme d'actions

Le présent rapport correspond au rendu de la Phase B.

1.3 - Objectifs de la Phase B

Les objectifs de cette deuxième phase d'étude sont :

- **Quantifier le ruissellement** des bassins versants amont des Vieux Salins, en distinguant les zones de ruissellement et les zones d'accumulation ;
- **Caractériser les apports sédimentaires** pouvant engendrer des désordres hydrauliques au sein des Vieux Salins.

2 - ANALYSE DU RUISSELLEMENT

2.1 - Définition du modèle hydraulique du ruissellement

Le ruissellement correspond aux « écoulements superficiels des eaux de pluie sur toute surface qui ne s'infiltré pas dans le sol. On parlera du « petit chevelu » de cours d'eau, fossés, écoulements sur voiries, écoulements en réseau enterrés, regroupés sous le vocable ruissellement pluvial ».

La modélisation hydraulique du ruissellement, réalisée dans cette étude, permet d'observer les principaux axes d'écoulements et les zones d'accumulation. Ces données sont ensuite comparées avec les témoignages des plus hautes eaux (PHE) observées par les riverains.

2.1.1 - Emprise du modèle

L'emprise du modèle de ruissellement reprend les bassins versants à l'amont des Vieux Salins présentés en Phase A et une partie du bassin versant d'un vallon affluent rive gauche du Gapeau passant par Sainte-Eulalie.

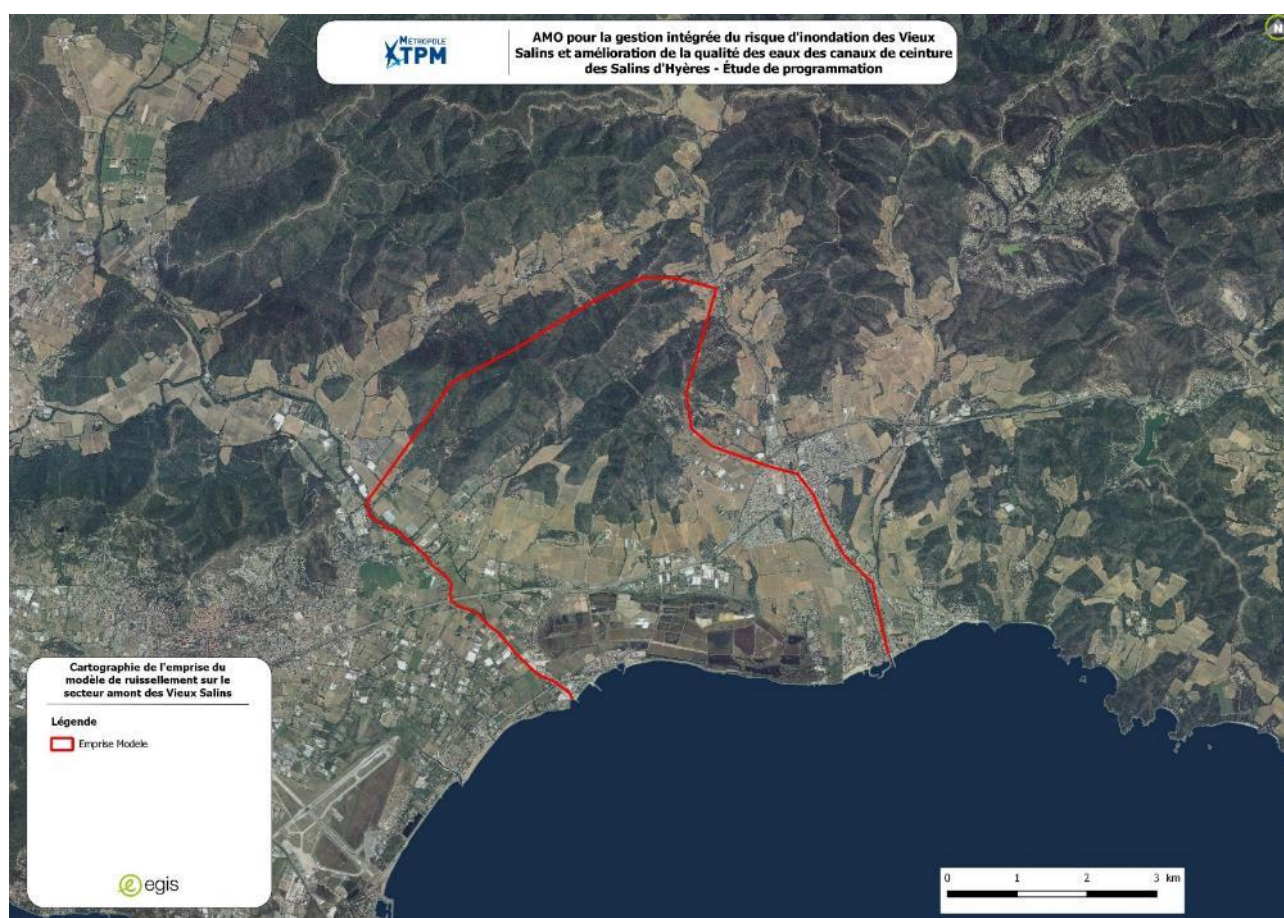


FIGURE 2 - EMPRISE DU MODELE DE RUISSELLEMENT

2.1.2 - Maillage de calcul

Le maillage sur l'emprise du modèle a été divisé en deux parties.

Sur les zones urbanisées à enjeux, les zones en périphérie des zones urbaines, les hameaux ruraux et les zones de développement à urbaniser, un maillage de calcul fin a été réalisé. L'aire minimale de maille est ici égale à 20 m².

Sur les zones naturelles et agricoles sans enjeux, un maillage de calcul large a été réalisé, l'aire maximale de maille étant de 100 m².

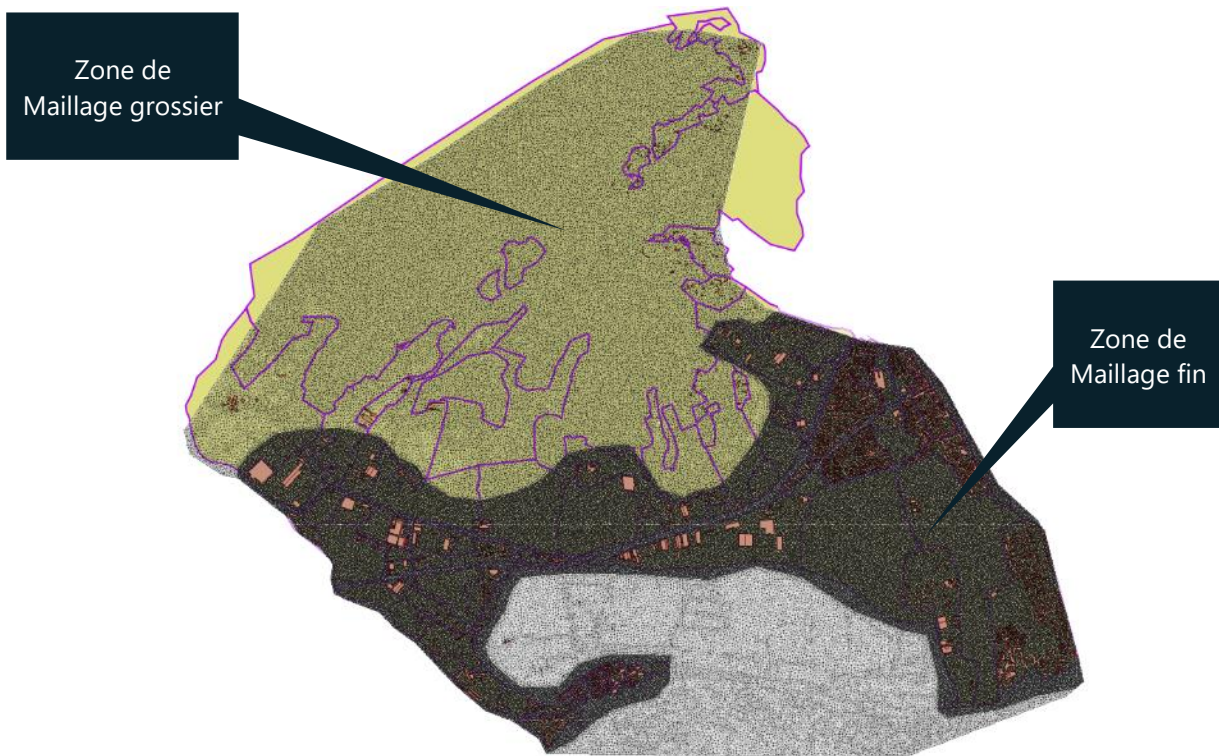


FIGURE 3 - PRESENTATION DES ZONES DE MAILLAGE DU MODELE

L'effet obstacle des bâtiments a été pris en compte : ils sont considérés comme imperméables au ruissellement et ne laissent pas transiter d'écoulement. Les bâtiments ayant une superficie inférieure à 25 m² n'ont pas été pris en compte.

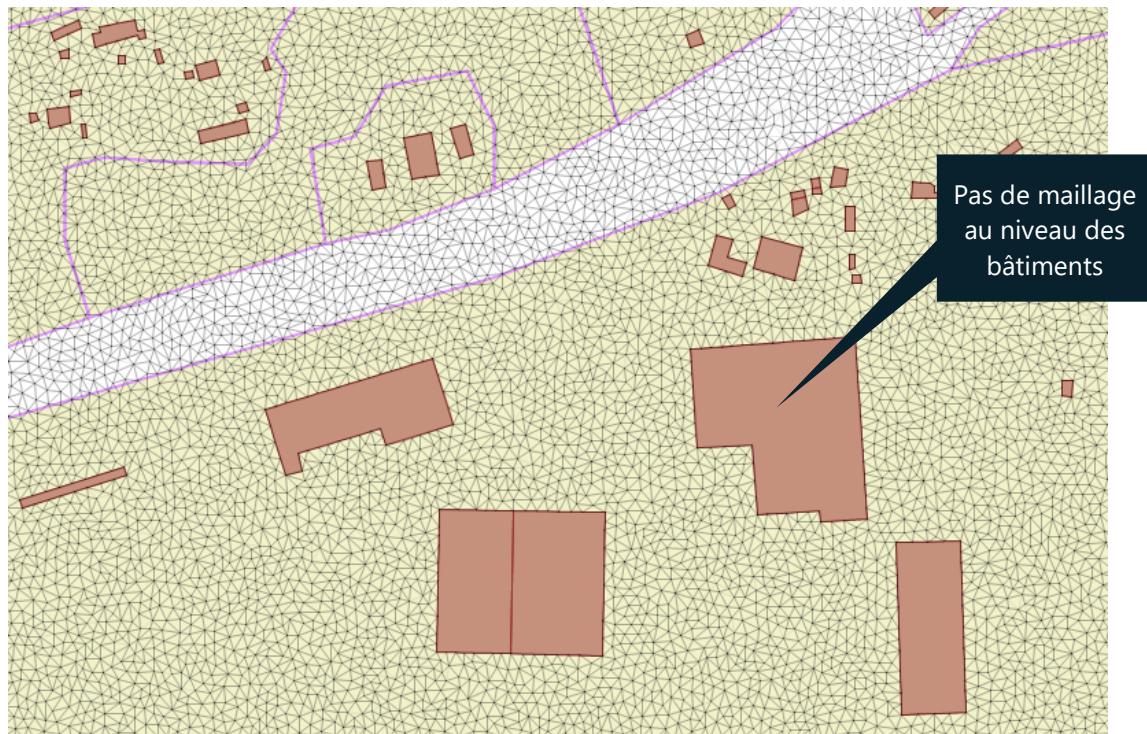


FIGURE 4 - PRESENTATION DU MAILLAGE A PROXIMITE DES BATIMENTS

2.1.3 - Caractéristiques des sous-bassins versants

2.1.3.1 - Définition des sous-bassins versants

Comme expliqué dans le rapport de phase A, le territoire d'étude a été découpé en 8 sous-bassins versants. Leur surface varie de 0.16 km² pour le plus petit à 1.52 km² pour le plus large. La figure ci-dessous localise les différents sous-bassins versants et le tableau reprenant leurs caractéristiques.

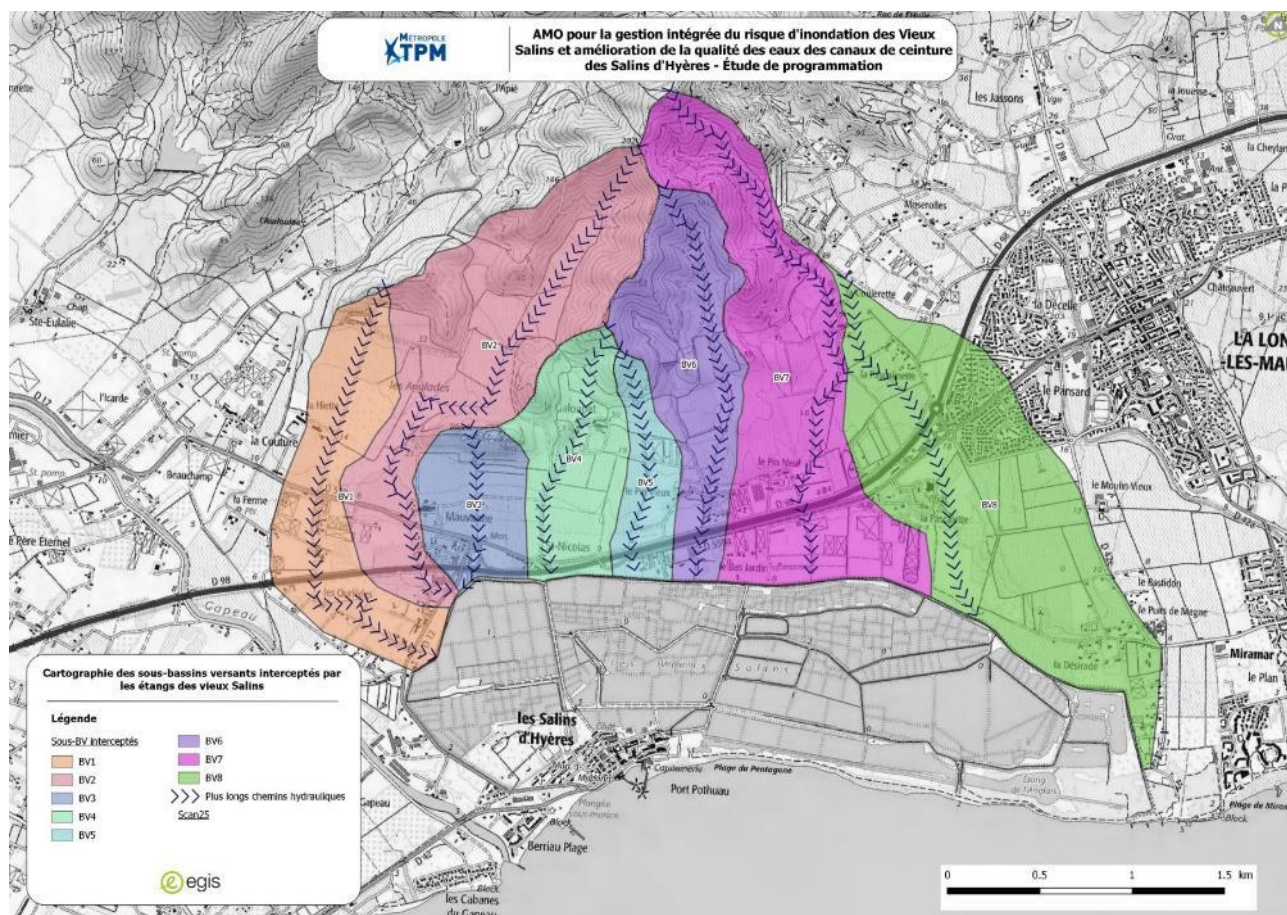


FIGURE 5 - LOCALISATION DES SOUS-BASSINS VERSANTS

TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES DES SOUS-BASSINS VERSANTS

BASSINS	AIRE (KM ²)	LONGUEUR (M)	PENTE (M/M)	TC PASSINI (MIN)	TC VENTURA (MIN)	TC MOYEN (MIN)
BV1	0.872	2064	0.06	33	30	32
BV2	0.164	2652	0.08	17	11	14
BV3	0.44	3304	0.10	24	16	20
BV4	0.647	930	0.10	18	20	19
BV5	0.314	1437	0.10	16	13	14
BV6	0.895	1280	0.11	20	22	21
BV7	1.637	2224	0.09	34	33	33
BV8	1.517	3144	0.04	55	47	51

2.1.3.2 - Définition des coefficients de ruissellement

Un modèle hydraulique de ruissellement n'utilise pas les mêmes méthodes de transformation pluie-débit qu'un modèle hydraulique 1D/2D d'écoulement fluvial.

Dans une **modélisation hydraulique fluviale**, des hydrogrammes de crue sont utilisés et permettent de caractériser un débit de pointe et un volume de crue. Dans le cadre de cette étude, en phase A, ces hydrogrammes ont été estimés par la méthode SCS qui permet d'intégrer l'infiltration initiale due à la captation par la végétation ou des dépressions de surface et une infiltration constante définie par les caractéristiques géologiques du sol.

Le **modèle de ruissellement** traduit quant à lui la réalité physique du ruissellement. Il repose essentiellement sur des caractéristiques d'infiltration du sol et de rugosité (propagation des écoulements). Il dépend ainsi essentiellement du coefficient de ruissellement et du coefficient de Strickler.

Le **coefficient de ruissellement** est dépendant de l'occupation du sol. A l'échelle de l'emprise du projet, différentes zones d'occupation sont visibles. Certaines parties sont plus rurales, d'autres plus urbaines.

L'urbanisation influence directement l'écoulement des eaux. Sur une surface imperméabilisée, le ruissellement va augmenter et l'infiltration va baisser. L'image ci-dessous explique ce principe. De plus les écoulements seront plus rapides sur une surface imperméabilisée en comparaison d'une surface constituée de cultures.

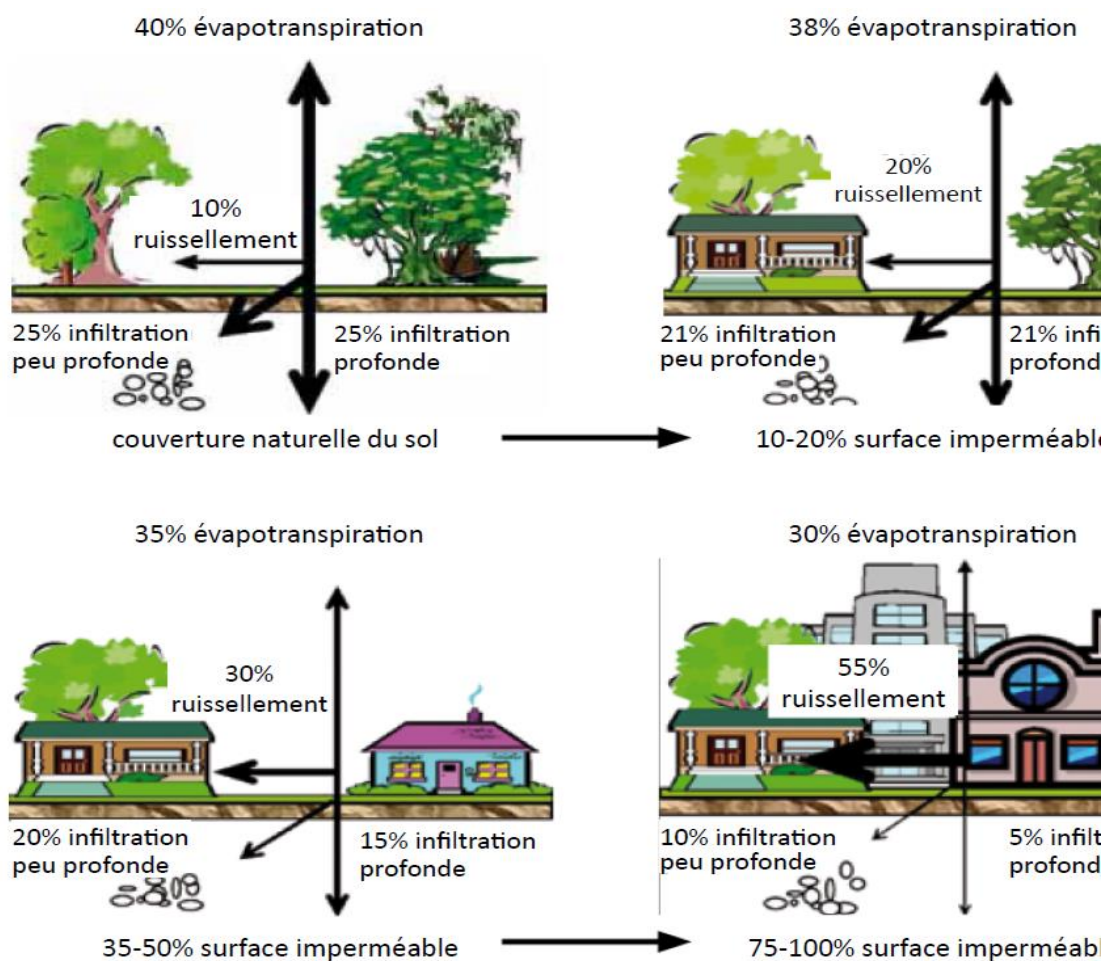


FIGURE 6 - SCHEMA DE PRINCIPE DE LA CORRELATION ENTRE IMPERMEABILISATION ET RUISSELLEMENT
(SOURCE : WWW.COASTAL.CA.GOV/NPS/WATERCYCLEFACTS.PDF)

Ainsi, un coefficient de ruissellement a été attribué à chaque sous-bassin versant. Il correspond à la pondération de chaque type d'occupation des sols du sous-bassin versant concerné.

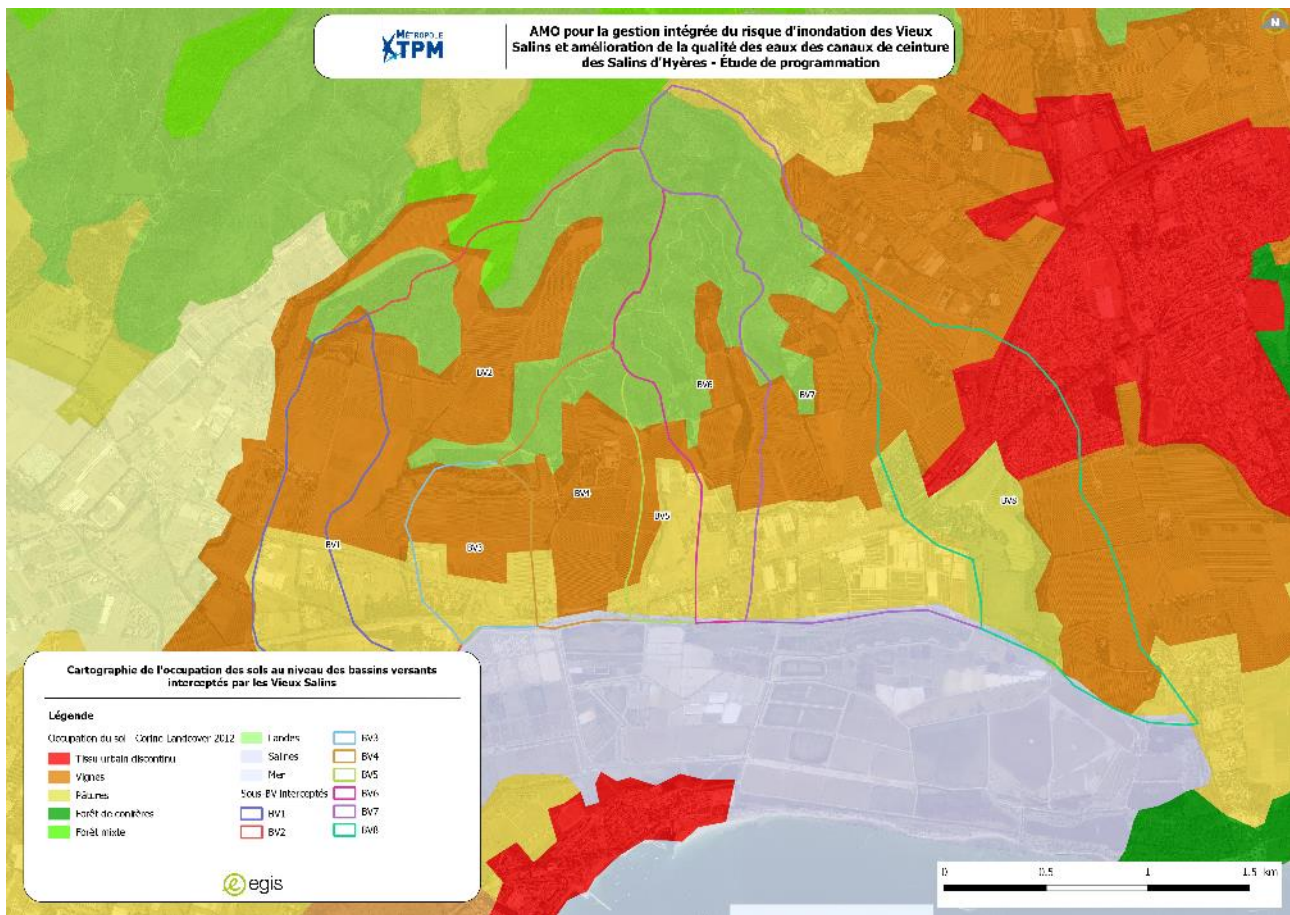


FIGURE 7 - OCCUPATION DU SOL SUR LE SECTEUR D'ETUDE (SOURCE : CORINE LAND COVER 2012)

Deux valeurs de coefficients de ruissellement (**Cr**) ont été attribuées à chaque sous-bassin versant selon que l'événement pluvieux est **fréquent** (pluie décennale) ou **exceptionnel** (pluie centennale, pluie type janvier 2014 ou septembre 2006 au Cap Cépet).

TABLEAU 2 : COEFFICIENTS DE RUISSÈLEMENT DES SOUS-BASSINS VERSANTS

Sous_BV	Aire (km ²)	Cr (fréquent)	Cr (exceptionnel)
BV1	0.874	0.34	0.47
BV2	1.639	0.3	0.45
BV3	0.44	0.4	0.52
BV4	0.647	0.35	0.45
BV5	0.313	0.49	0.6
BV6	0.896	0.4	0.52
BV7	1.638	0.46	0.47
BV8	1.517	0.37	0.44

Les valeurs de coefficient de ruissellement sont en accord avec les valeurs moyennes fixées par la doctrine MISEN 83 pour ce type d'occupation du sol.

TABLEAU 3 : COEFFICIENTS DE RUISSÈLEMENT PRECONISES PAR LA DOCTRINE MISEN 83

Occupation du sol		Pluie annuelle-biennale Q1 - Q2	Pluie centennale à exceptionnelle (sols saturés en eau) Q100 – Qrare – Qexcep
Zones urbaines		0,80	0,90
Zones industrielles et commerciales		0,60 – 0,80	0,70 – 0,90
Toitures		0,90	1
Pavages, chaussée revêtue, piste		0,85	0,95
Sols perméables avec végétation	Pente		
	<2%	0,05	0,25
	2%<I<7%	0,10	0,30
	>7%	0,15	0,40
Sols imperméables avec végétation	Pente		
	<2%	0,13	0,35
	2%<I<7%	0,18	0,45
	>7%	0,25	0,55
Forêts		0,10	0,25
Résidentiel	lotissements	0,30 – 0,50	0,40 – 0,70
	collectifs	0,50 – 0,75	0,60 – 0,85
	habitat dispersé	0,25 – 0,40	0,40 – 0,65
Terrains de sport		0,10	0,30

2.1.3.3 - Définition des coefficients de rugosité

Les coefficients de rugosité (Strickler) permettent de définir la capacité d'une surface à accélérer les écoulements. Plus un sol est rugueux, moins les vitesses sont importantes.

Les coefficients de Strickler utilisés sont :

- 5 pour les zones boisées ;
- 15 pour les zones de cultures ;
- 25 pour les zones urbaines ;
- 50 pour les routes.

L'ENSEMBLE DES COEFFICIENTS PRIS EN COMPTE EST EN COHERENCE AVEC LES ETUDES MENEES SUR LE BASSIN VERSANT DU GAPEAU.

2.1.4 - Caractérisation de la pluviométrie

2.1.4.1 - Pluies de projet

Trois pluies de projet ont été utilisées dans ce modèle de ruissellement. Il s'agit de pluie de projet Keifer d'une période de retour 10 ans, 100 ans et une pluie de projet exceptionnelle calée sur les paramètres recalculés de la pluie réelle de Cap Cépet 2006.

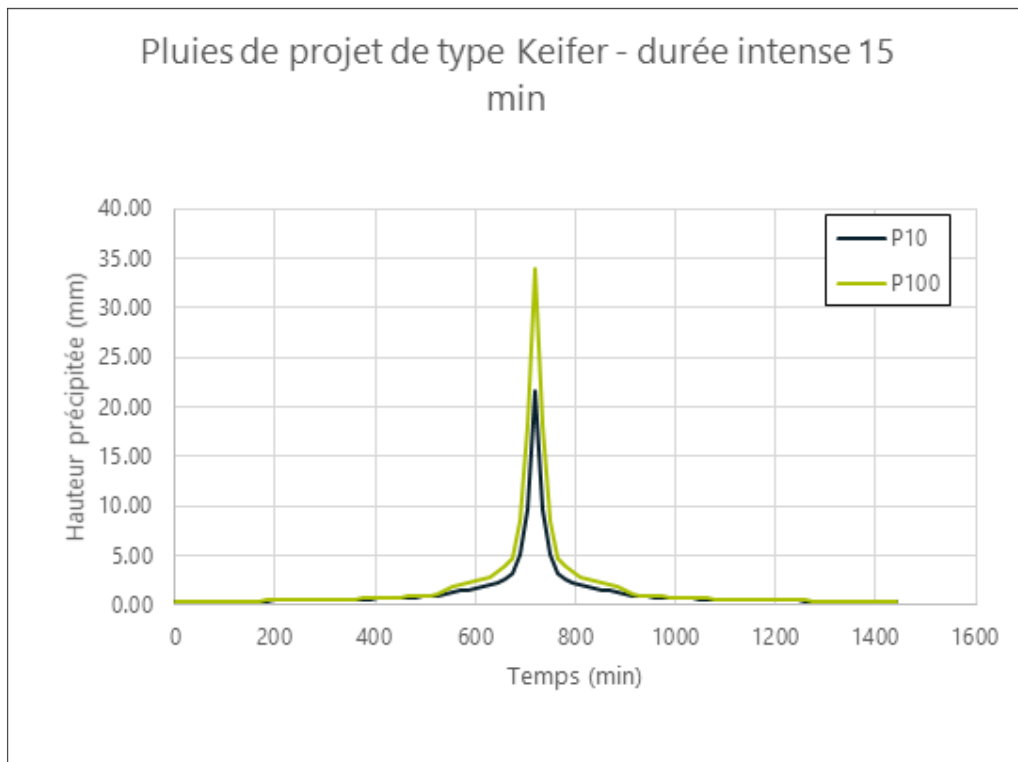
Les occurrences 10 et 100 ans ont été définies à partir des coefficients de Montana de la station Météo-France de Hyères-le-Palyvestre :

Durée de la pluie	Coefficients de Montana pour P10	
	a	b
$6 \text{ mn} < t < 1 \text{ h}$	4.436	0.416
$1 < t < 6 \text{ h}$	11.154	0.647
$6 < t < 24 \text{ h}$	19.120	0.737

Durée de la pluie	Coefficients de Montana pour P100	
	a	b
$15 \text{ mn} < t < 1 \text{ h}$	5.656	0.338
$1 < t < 6 \text{ h}$	23.440	0.695
$6 < t < 24 \text{ h}$	52.410	0.822

TABLEAU 4 : PARAMETRES DES PLUIES DE PROJET 10 ET 100 ANS

	Pluie de projet Keifer 10 ans	Pluie de projet Keifer 100 ans
Période de retour	10 ans	100 ans
Durée totale	24 heures	24 heures
Durée intense	15 minutes	15 minutes
Intensité Maximale	86.3 mm/h	135.9 mm/h

**FIGURE 8 - HISTOGRAMME DES HAUTEURS DE PLUIES EN FONCTION DU TEMPS POUR LES PLUIES DE PROJET**

La durée de la pluie est prise à 24h pour permettre l'évaluation d'un volume caractéristique. Cette approche est différente pour l'évaluation d'un ruissellement urbain où une intensité maximale est recherchée (pluie plus courte).

La pluie de projet de Keifer de type Cap Cépet 2006 a été utilisée afin de définir une pluie de projet exceptionnelle sur les bassins versants des affluents du Gapeau dans le cadre de la réalisation du Plan de Prévention des Risques d'Inondation. Cette pluie présente en effet des cumuls exceptionnels sur des durées courtes.

TABLEAU 5 : PLUIE EXCEPTIONNELLE DE CAP CEPET 2006

DUREE DE LA PLUIE	CAP CEPET (SEPTEMBRE 2006)
30 MN	66
1H	102
3H	140
24H	159

HAUTEUR DES PRECIPITATIONS / SOURCE: METEOFRANCE	
---	--

Les coefficients de Montana recalculés pour cette pluie sont présentés ci-après :

<i>Durée de la pluie</i>	Coefficients de Montana pour P100	
	a	b
<i>t < 15 min</i>	125.01	0.15
<i>15 < t < 30 min</i>	114.13	0.21
<i>30 min < t < 1 h</i>	102.2	0.37
<i>1 h < t < 2 h</i>	102.2	0.63

Avec $h=a.t^{1-b}$ le cumul en mm, t la durée de pluie en heure et a en mm/h.

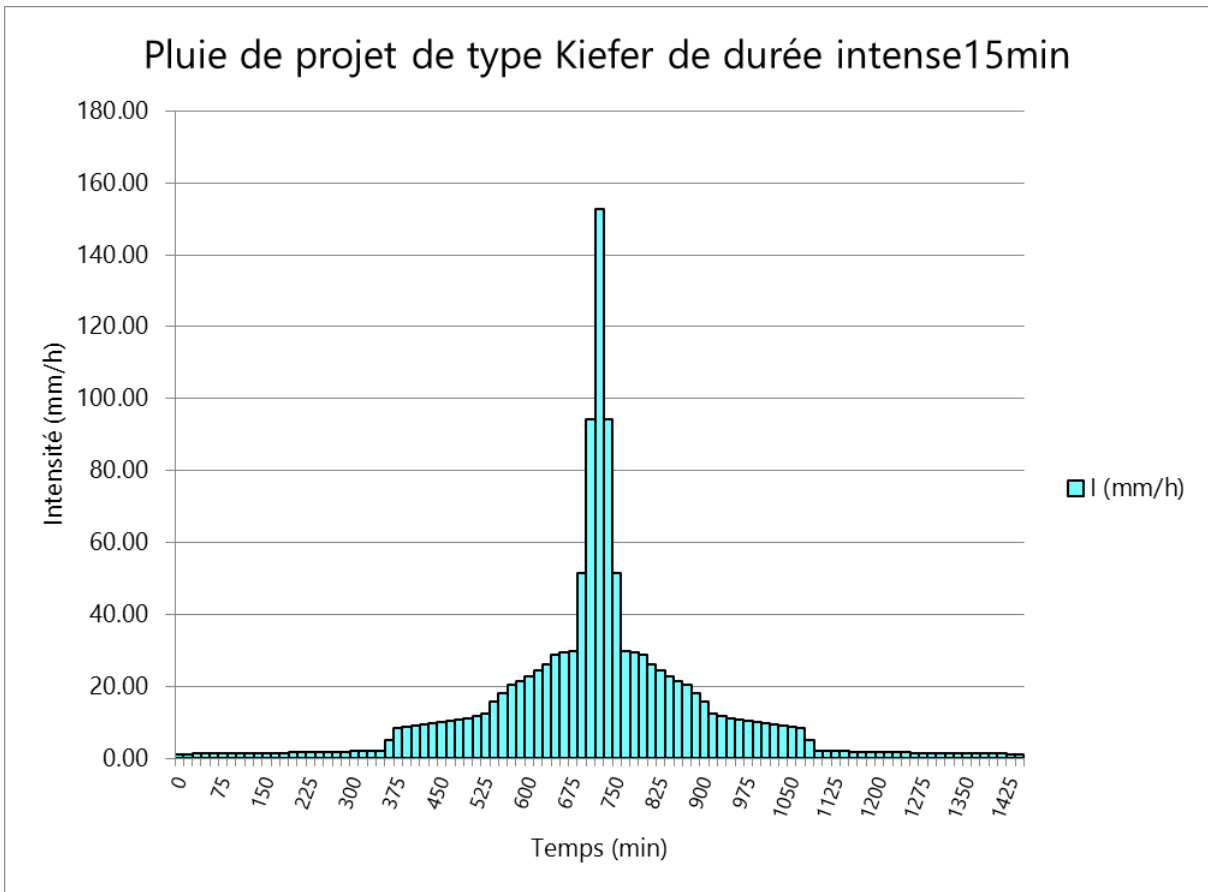


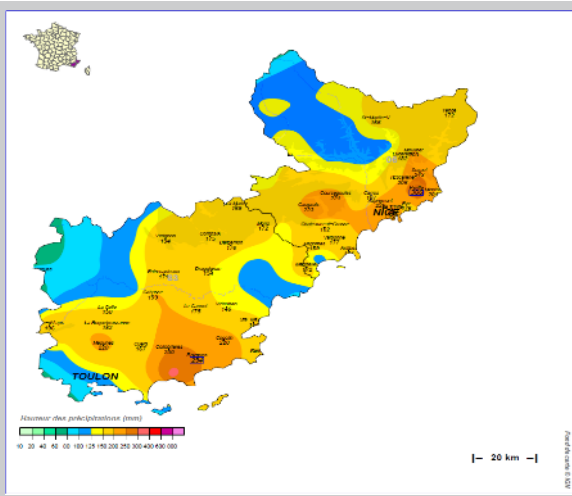
FIGURE 9 - PLUIE DE PROJET KEIFER EXCEPTIONNELLE DE TYPE CAP CEPET 2006, DUREE INTENSE 15 MINUTES

2.1.4.2 - Pluie réelle de janvier 2014

La pluie réelle du 18 et 19 janvier 2014 a servi de pluie de calage. Ses caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-après :

TABLEAU 6 : PLUIE DU 19 JANVIER 2014

DUREE DE LA PLUIE	MARAVENNE (JANVIER 2014)
30 MIN	-
1H	72
3H	127
24H	180

HAUTEUR DES PRECIPITATIONS / SOURCE : METEOFRANCE


2.2 - Calage du modèle

2.2.1 - Méthodologie

Le calage du modèle de ruissellement se base sur la connaissance d'un événement réel suffisamment renseigné. Il consiste à jouer sur les paramètres du modèle de sorte à ce que les débits de pointe et la zone d'inondation modélisés soient le plus fidèles aux observations faites lors de l'événement.

Par ailleurs, le modèle doit également être calé de sorte à ce que les débits de pointe observés aux exutoires de chaque sous-bassin versant soient équivalents aux débits estimés par le modèle hydrologique (HEC-HMS).

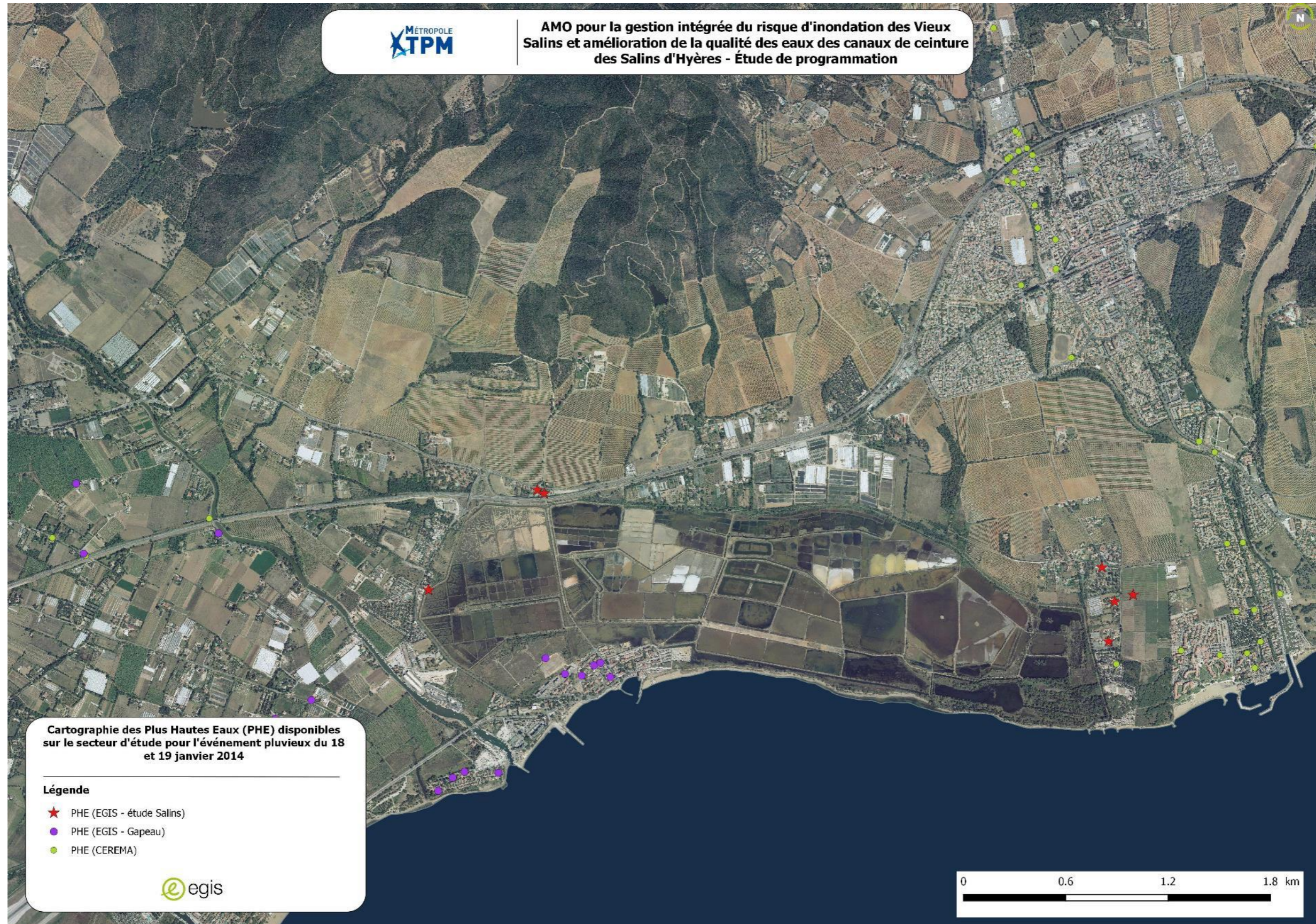
Une fois les résultats jugés satisfaisants, les paramètres sont bloqués afin de pouvoir lancer des simulations plus théoriques (crue de projet).

L'événement de calage utilisé dans le cadre de cette étude est l'épisode pluvieux du **18 et du 19 janvier 2014** ayant entraîné une crue cinquantennale des affluents du Gapeau et du Pansard.

Sur le périmètre d'étude :

- 7 témoignages de PHE ont été identifiés lors de la semaine de terrain réalisée en mars 2019 ;
- 6 témoignages de PHE ont été identifiés lors de l'étude du Gapeau sur la commune de Hyères ;
- 18 témoignages de PHE ont été identifiés par le CEREMA à la suite de la crue de 2014 sur la commune de La Londe-les-Maures.

La figure ci-dessous reprend les différentes PHE obtenues.



Cartographie des Plus Hautes Eaux (PHE) disponibles sur le secteur d'étude pour l'événement pluvieux du 18 et 19 janvier 2014

Légende

- ★ PHE (EGIS - étude Salins)
- PHE (EGIS - Gapeau)
- PHE (CEREMA)






FIGURE 10 - RELEVES PHE DISPONIBLES ET EXPLOITES POUR LE CALAGE DU MODELE DE RUISSELLEMENT

2.2.2 - Limites de la modélisation

Le modèle de ruissellement ne prend compte que des apports directs des bassins versants interceptés par les Salins. Les apports du Gapeau et du Pansard sont par conséquent sous-estimés dans leurs zones de débordements respectives.

→ Les données PHE associées à ces zones n'ont par conséquent pas servi de base de calage au modèle.

N.B : Il est important de préciser qu'un modèle de ruissellement ne permet pas une représentation infaillible du fonctionnement hydraulique de la zone étudiée. En effet, sa représentativité est fortement dépendante de la qualité du modèle numérique de terrain (MNT) et des contraintes de maillage qui lui sont appliquées. Les éléments pouvant influencer localement les écoulements ne peuvent tous être renseignés, ce qui peut expliquer certains écarts entre une situation observée lors d'un événement et celle représentée dans une modélisation.

2.2.3 - Résultats du calage

L'emprise de la zone inondable correspondant à l'événement des 18 et 19 janvier 2014 a été digitalisée à partir de la photographie aérienne post-crue disponible.

Cette digitalisation a été réalisée selon l'appréciation des :

- Zones d'inondation visibles depuis la photographie aérienne (zones boueuses, traces d'accumulations, points bas) :



■ Axes d'écoulements ou de ravinement identifiés :



Cette emprise a ensuite été comparée avec celle fournie par la modélisation hydraulique du ruissellement afin de vérifier que le fonctionnement hydraulique modélisé est cohérent avec les observations faites lors de l'événement.

La comparaison des données de modélisation et des relevés de PHE disponibles montre que le modèle représente fidèlement les hauteurs d'eau observées durant l'épisode des 18 et 19 janvier 2014 sur les secteurs influencés par le ruissellement provenant des bassins versants interceptés par les Vieux Salins.

Les quelques différences observables sur la cartographie ci-dessous sont principalement dues à la représentation de la topographie des lieux. En effet, il n'est pas possible de représenter de manière exacte l'ensemble des éléments influençant les écoulements tels que les murets, réseaux pluviaux ou fossés.

- Les écarts de hauteurs d'eau entre les observations et les modélisations sont comprises entre 5 et 20 cm. Compte tenu des incertitudes liées à la fiabilité des témoignages, la représentation du terrain naturel et les hypothèses de modélisation, les résultats sont jugés satisfaisants au regard des données disponibles.

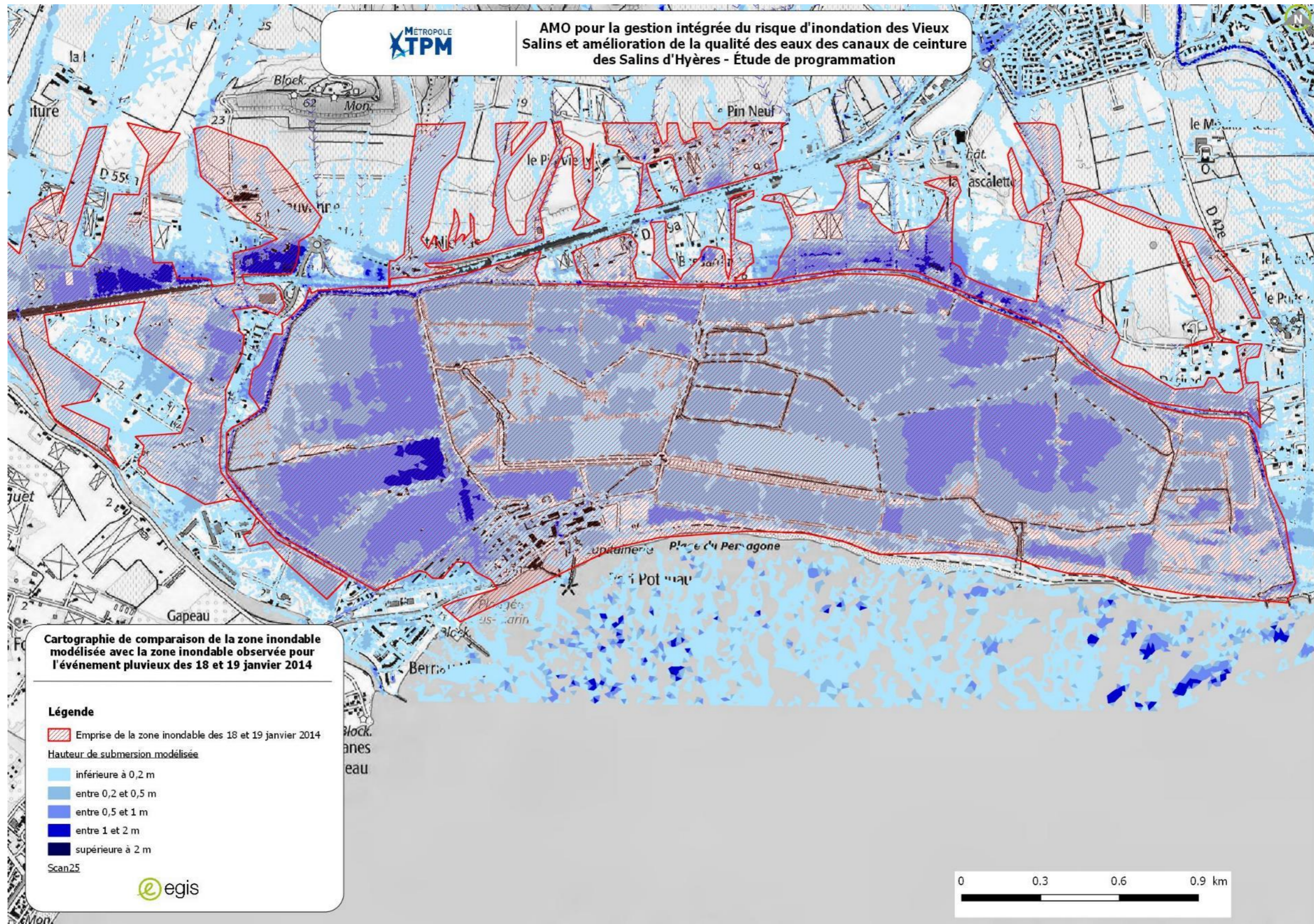


FIGURE 11 - RELEVES PHE DISPONIBLES ET EXPLOITÉS POUR LE CALAGE DU MODÈLE DE RUISSELLEMENT

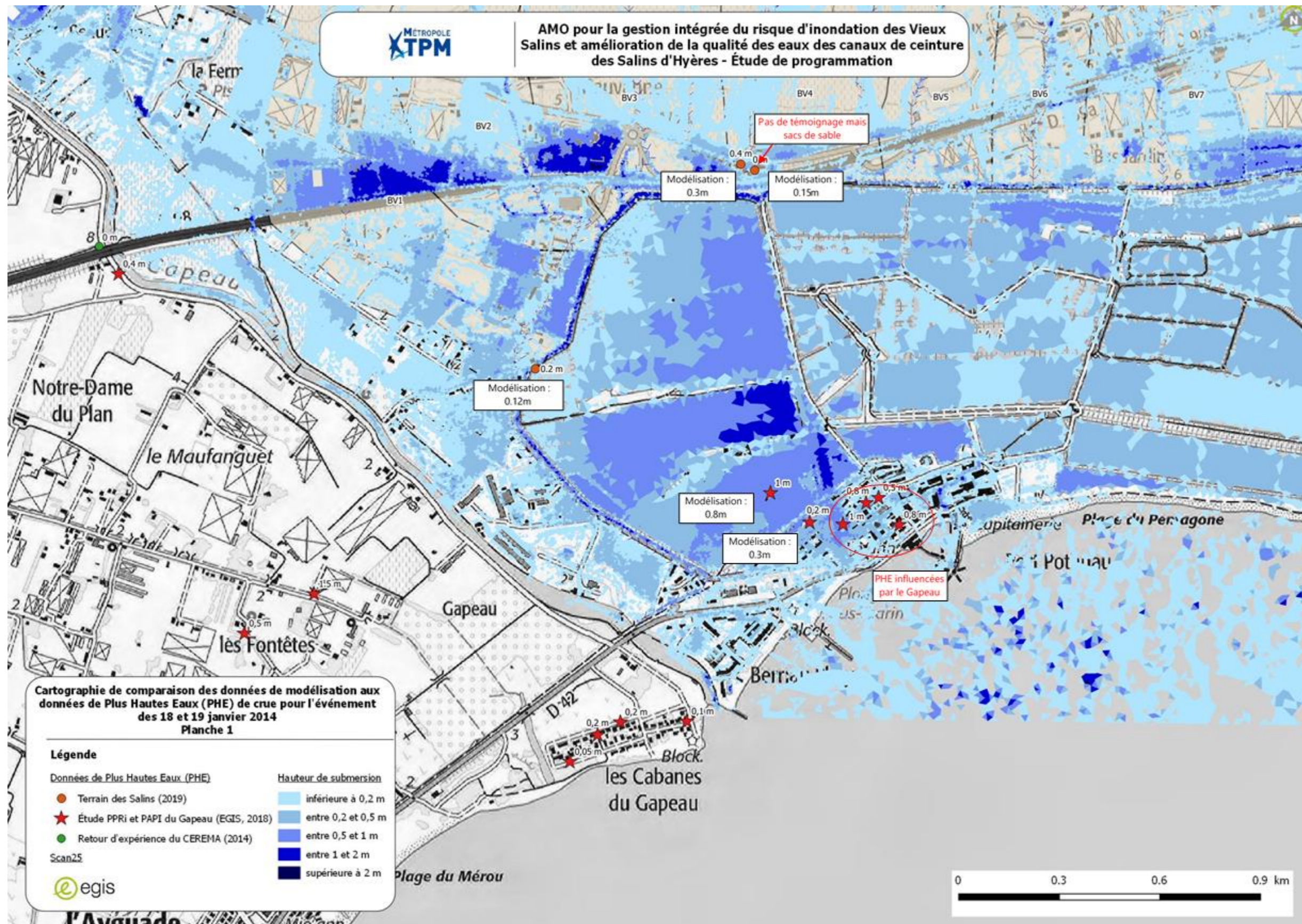


FIGURE 12 – COMPARAISON PHE / RESULTATS MODELISATION – SECTEUR OUEST

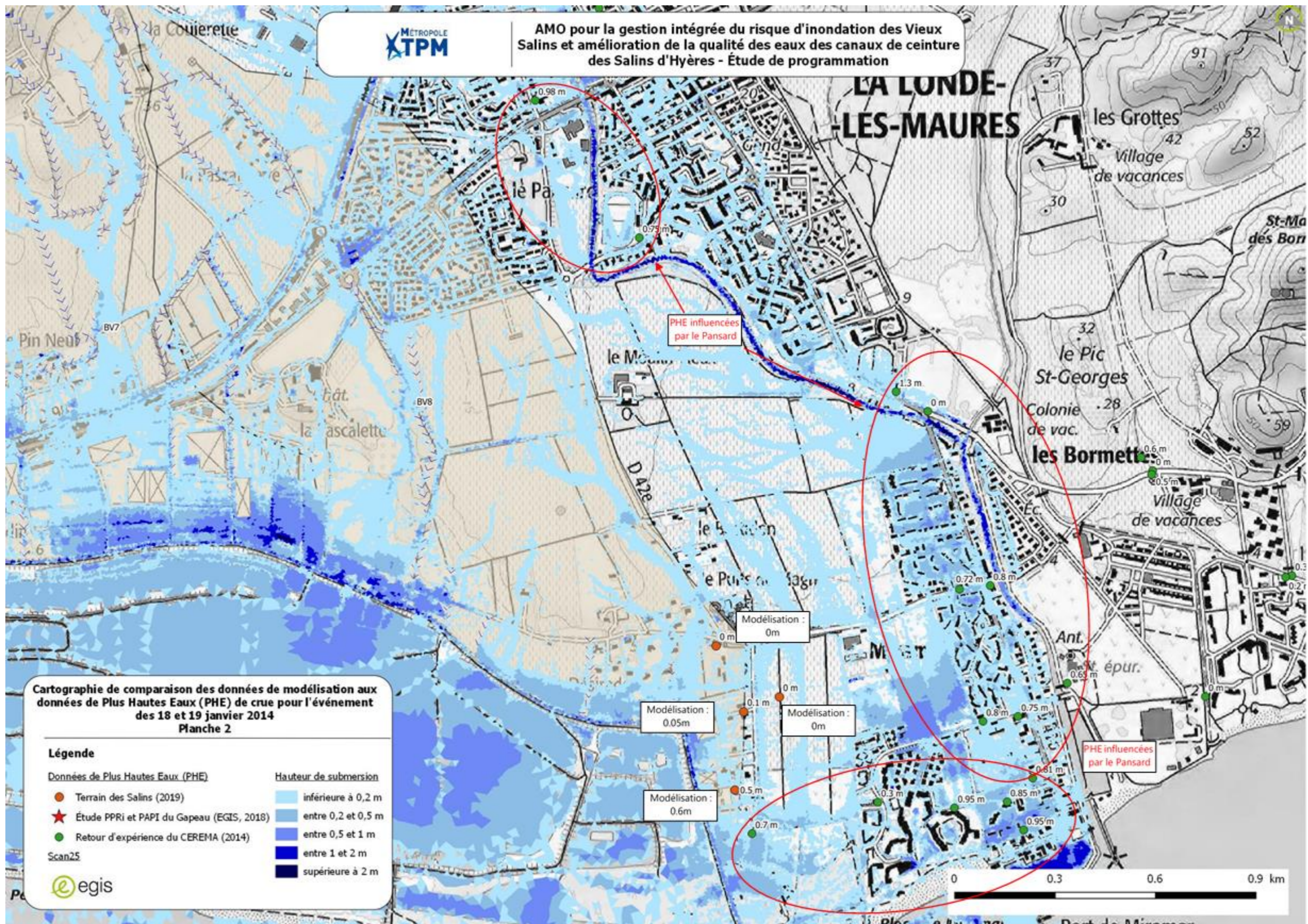


FIGURE 13 - COMPARAISON PHE / RESULTATS MODELISATION - SECTEUR EST

Les volumes de pluie infiltrés calculés par le modèle hydrologique et ceux obtenus par la modélisation hydraulique ont été comparés. Ils permettent de contrôler que les deux méthodes de transformation pluie-débit sont cohérentes.

Le tableau ci-dessous présente le travail de calage.

TABEAU 7 : COMPARAISON DES VOLUMES INFILTRES SELON LE MODELE UTILISE

<i>Sous-Bassin</i>	Aire (km ²)	V₁₀ infiltré (m³)		V₁₀₀ infiltré (m³)	
		Modèle hydrologique	Modèle hydraulique	Modèle hydrologique	Modèle hydraulique
<i>BV1</i>	0.872	57 100	70 517	67 600	80 493
<i>BV2</i>	1.64	118 200	147 112	142 800	164 113
<i>BV3</i>	0.44	27 700	33 484	30 900	38 116
<i>BV4</i>	0.647	47 800	53 811	54 500	64 657
<i>BV5</i>	0.314	18 300	19 229	20 100	21 462
<i>BV6</i>	0.895	56 300	68 510	62 800	77 988
<i>BV7</i>	1.637	109 500	109 539	130 600	152 891
<i>BV8</i>	1.517	71 700	75 895	172 194	182 269

L'analyse montre que l'écart entre les volumes infiltrés selon les deux méthodes de transformation est globalement compris entre 5 et 20%.

→ Au regard de l'ensemble des données de comparaison disponibles, le calage est jugé satisfaisant.

2.3 - Résultats

Les résultats sont présentés en annexes. Les cartographies correspondantes représentent les hauteurs d'eau maximales et les vitesses d'écoulement pour :

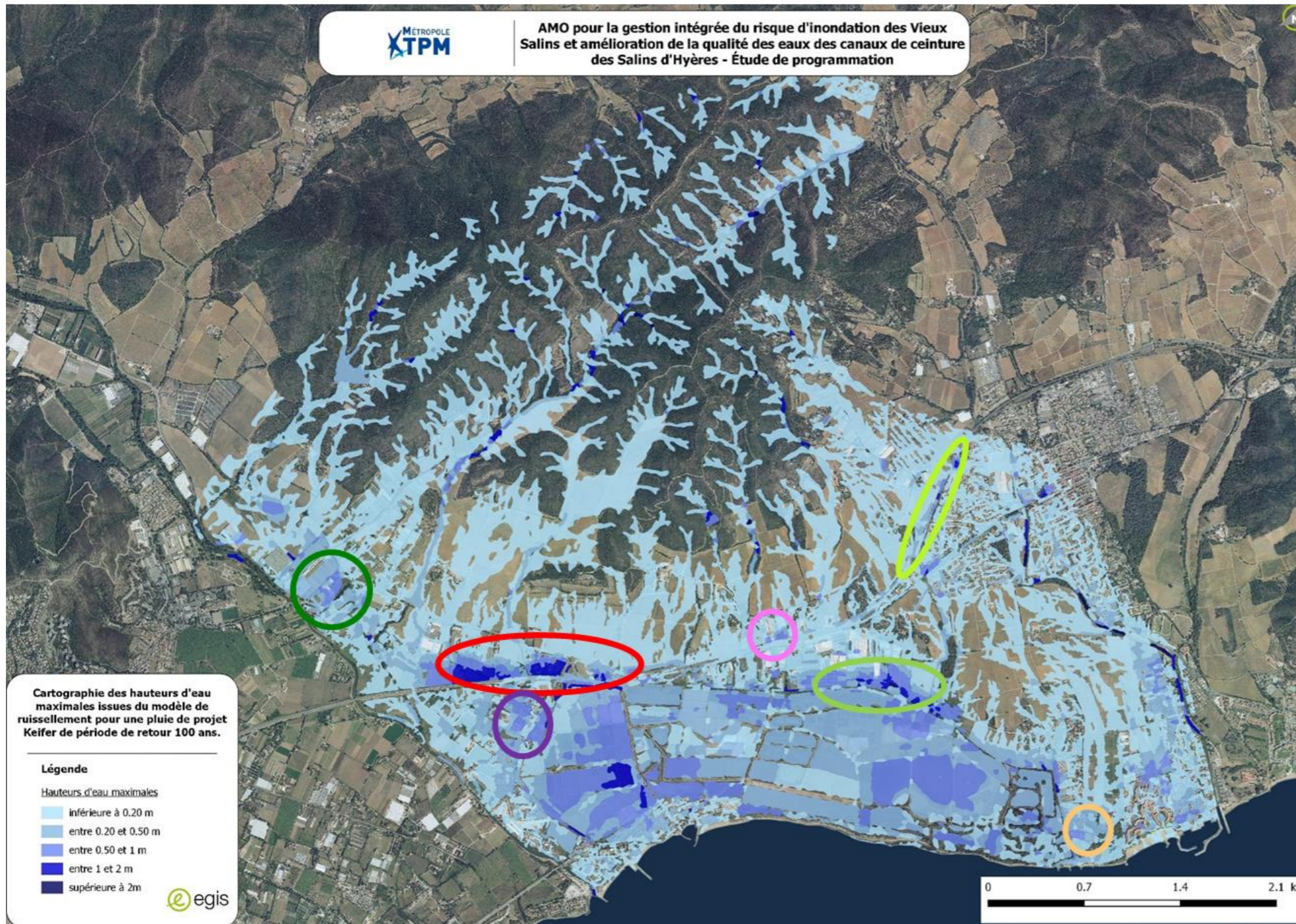
- Une pluie de projet Keifer 10 ans
- Une pluie de projet Keifer 100 ans
- La pluie de projet Keifer établie à partir de la pluie réelle du Cap Cépet en septembre 2006
- La pluie réelle du 18 et 19 janvier 2014

2.3.1 - Zones d'accumulation

D'après le modèle de ruissellement, plusieurs zones d'accumulation sont identifiables sur le secteur d'étude :

- Le hameau de Saint-Nicolas
- Le secteur situé au Nord de la branche Est du canal de ceinture
- Le secteur à l'Ouest de la branche Ouest du canal de ceinture au niveau du camping le Capricorne
- Le Camping du Pansard à l'Est des Vieux Salins
- Le lieu-dit le Pin Neuf
- La RD98 au niveau de la Londe-les-Maures
- Le croisement entre le chemin des Maures et de la Route de Nice

Sur la commune de La Londe-les-Maures, il est observé un apport important de la part du Pansard sur sa rive droite.



- => Hameau de Saint-Nicolas
- => Secteur Nord branche Est du canal de ceinture
- => Secteur Ouest branche Ouest du canal de ceinture Camping le Capricorne
- => Camping le Pansard
- => Lieu dit le Pin Neuf
- => La Londe-les-Maures RD98
- => Croisement Chemin des Maures – Route de Nice

FIGURE 14 - PRINCIPALES ZONES D'ACCUMULATIONS DANS LE MODELE

2.3.2 - Axes d'écoulements

Le hameau de Saint-Nicolas est relativement impacté par le ruissellement, il reçoit les eaux du bassin versant situé en amont mais également des apports depuis la D559A et de la RD98.

Cette même route RD98 est responsable d'apports non négligeables pour le secteur situé au Nord de la branche Ouest du canal de ceinture des Vieux Salins.

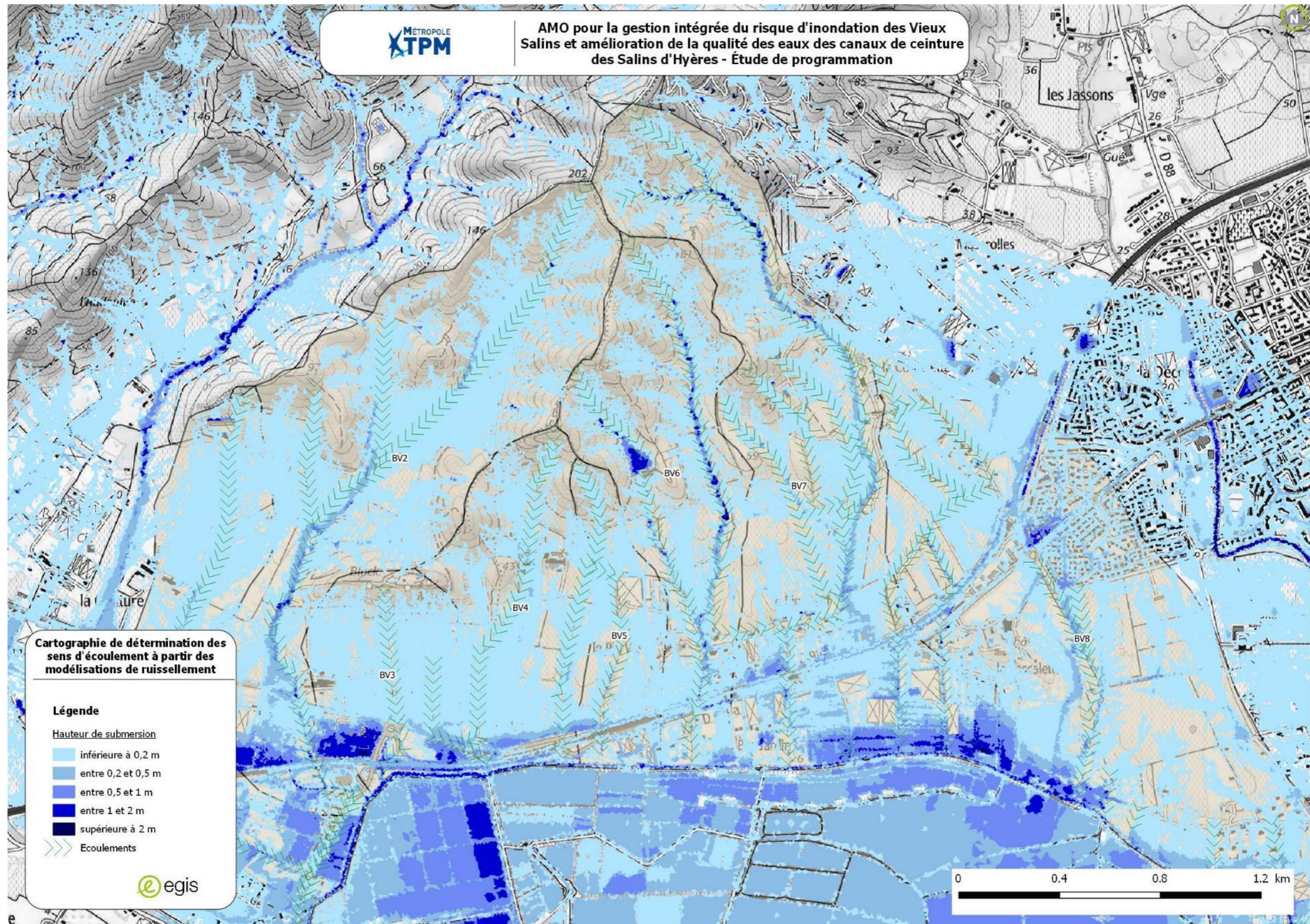


FIGURE 15 - PRINCIPAUX AXES D'ÉCOULEMENTS

3 - ANALYSE QUALITATIVE DU TRANSIT SEDIMENTAIRE

3.1 - Caractérisation de l'évolution morphodynamique

3.1.1 - Principes de base

Les principes de base suivants sont essentiels pour comprendre l'évolution morphologique en plan (retrait, avancée des berges, évolution des chenaux) et l'évolution morphologique linéaire (variation des pentes et du profil en long). Ces principes permettent d'observer les variations sur la zone d'étude des Vieux Salins.

Toute rivière tend vers un profil d'équilibre lui permettant d'assurer la continuité du transport des matériaux solides produits dans le bassin par érosion.

Toute singularité d'un cours d'eau, qu'elle soit topographique telle que des verrous (élargissement ou rétrécissement du lit), des confluences ou une singularité géologique, détermine des tendances naturelles généralement observées sur le profil en long :

- Diminution de la pente en amont d'un verrou ;
- Augmentation de la pente en aval d'un verrou ;
- Diminution de la pente à la confluence avec un autre cours d'eau peu productif car la capacité de transport solide augmente.

Les actions de l'homme peuvent également influencer les pentes et le profil en long :

- Un rétrécissement artificiel du lit (avec par exemple un endiguement, des culées resserrées d'un pont ou des remblais) provoque une incision du lit car la rivière possède alors une capacité de transport solide supérieure ;
- Des extractions dans le lit provoquent des abaissements locaux du fond mais induisent également des abaissements en amont et en aval par érosion régressive (vers l'amont) ou progressive (vers l'aval).

L'alimentation de la rivière en matériaux solides conditionne également l'évolution de son profil en long. Ces apports peuvent être réguliers et répartis linéairement par érosion des versants, ou bien d'apports de masse (éboulement) générant un afflux massif de matériaux qui sont progressivement mobilisés lors des crues.

3.1.2 - Evolution morphodynamique à l'échelle des Vieux Salins

Cette évolution morphodynamique a été réalisée à l'aide des photographies aériennes disponibles (1950-1965, 2007, 2013, 2018).

3.1.2.1 - Evolution morphologique

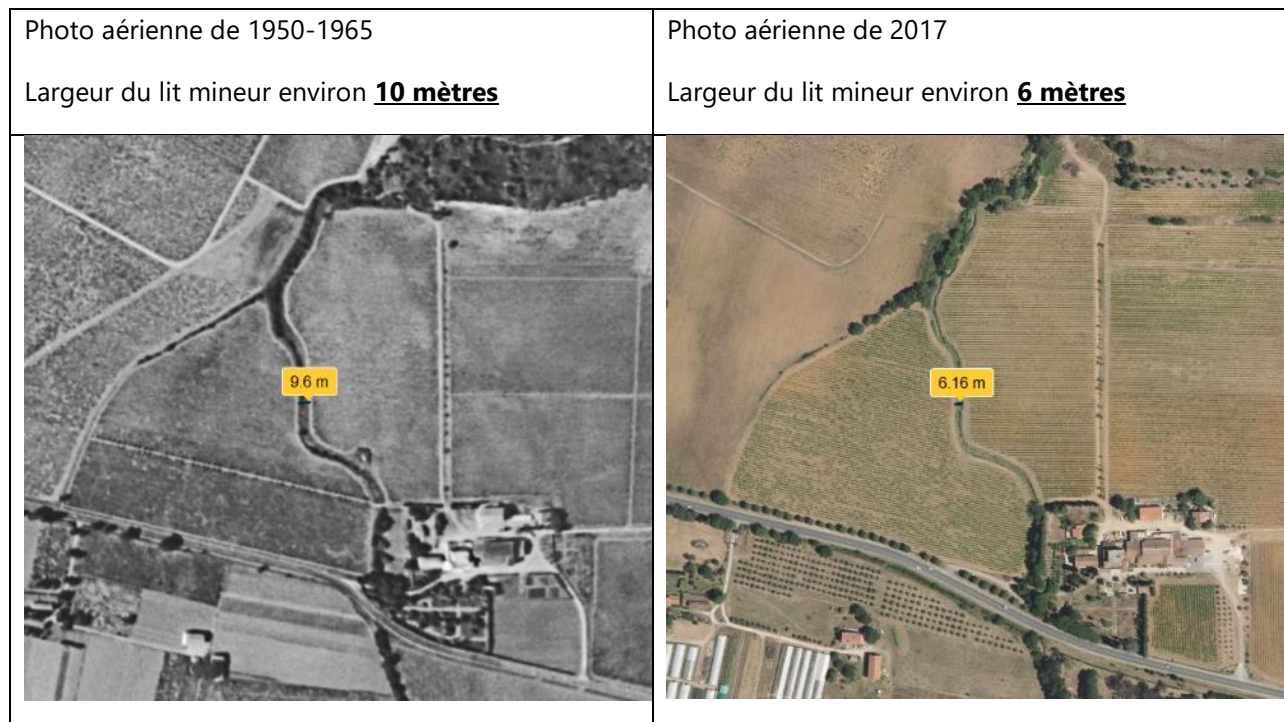
Les cartes ci-dessous permettent de comprendre l'évolution des cours d'eau depuis les années 1950 jusqu'à aujourd'hui. On observe :

- Une réduction de la largeur du lit mineur ;
- Une chenalisation du lit ;
- Une modification de l'occupation du sol.

Cette évolution morphologique est liée au développement de l'activité agricole sur le secteur.

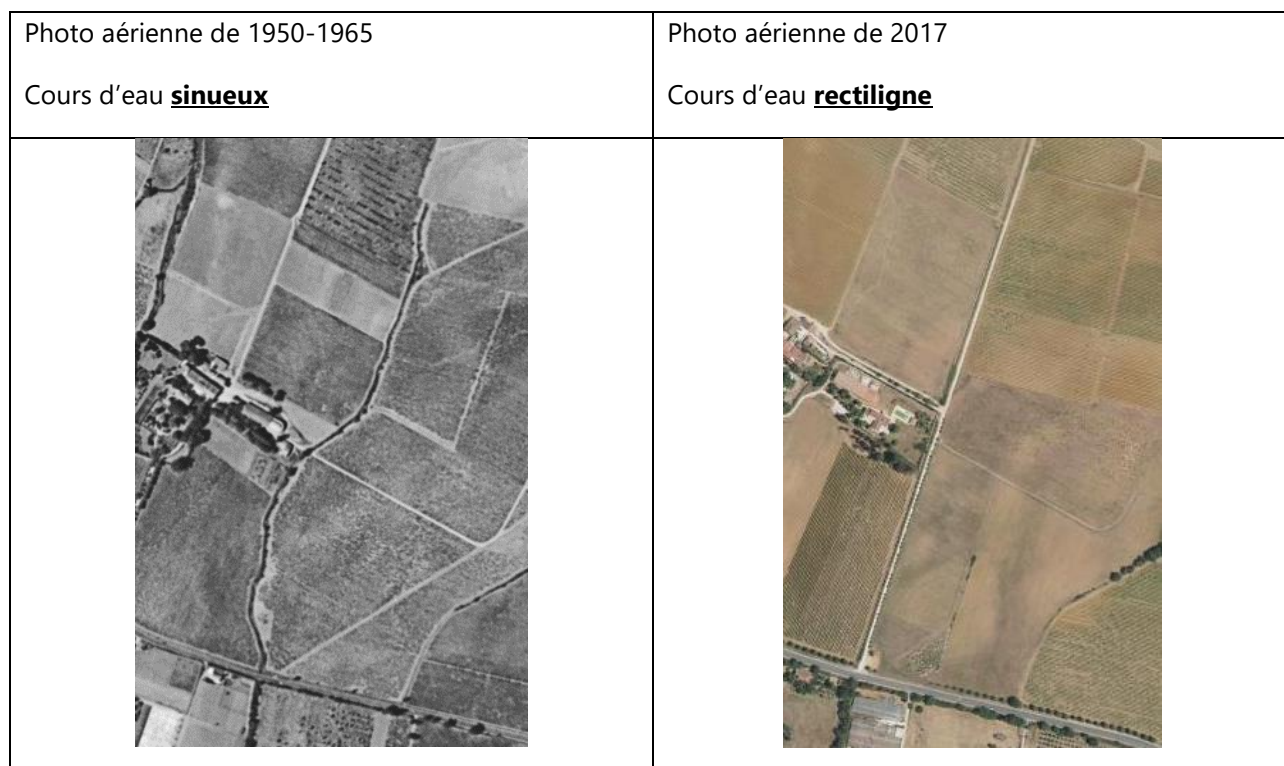
3.1.2.1.1 - Réduction de la largeur du lit mineur

D'après les photographies aériennes, certains vallons ont subi une réduction de la largeur du lit mineur depuis les années 60. Ce rétrécissement du lit du vallon va provoquer une augmentation de la force tractrice et donc une augmentation du transport sédimentaire.



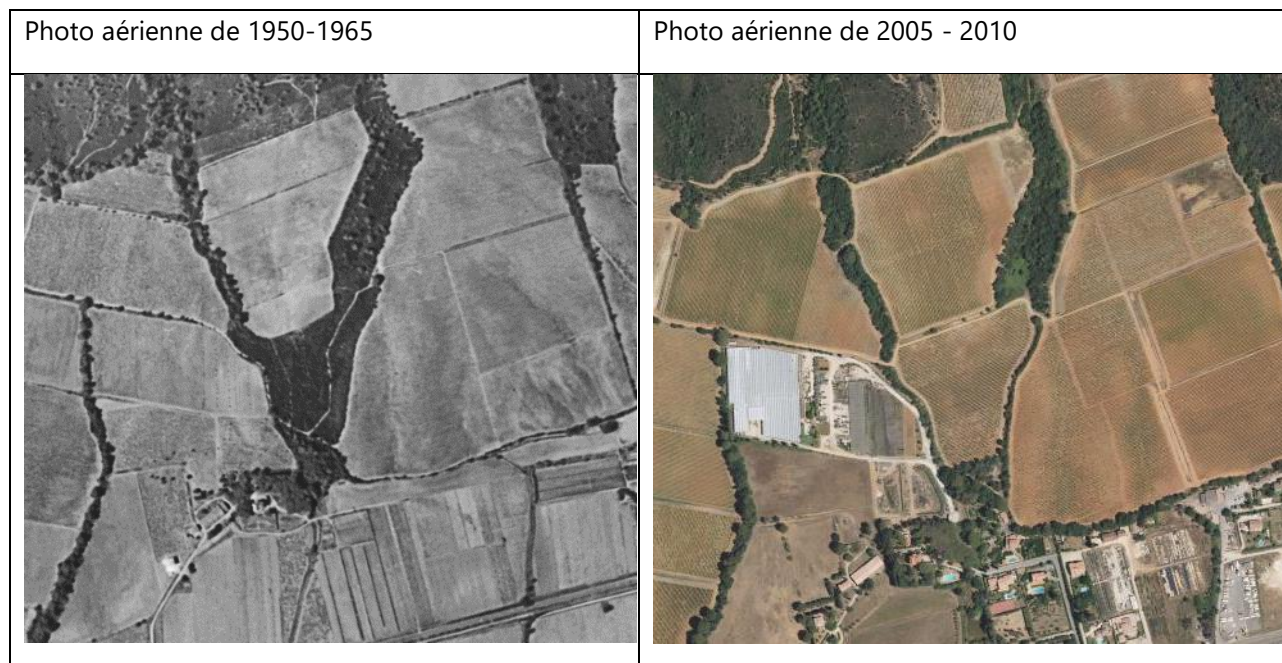
3.1.2.1.2 - Chenalisation du lit

Certains cours d'eau du fait de la répartition des terrains (remembrement) sont devenus rectilignes. De plus de nombreux ouvrages ont été réalisés afin de traverser ces fossés. Ces ouvrages créent des pertes de charges pouvant créer des embâcles ou des sédimentations.



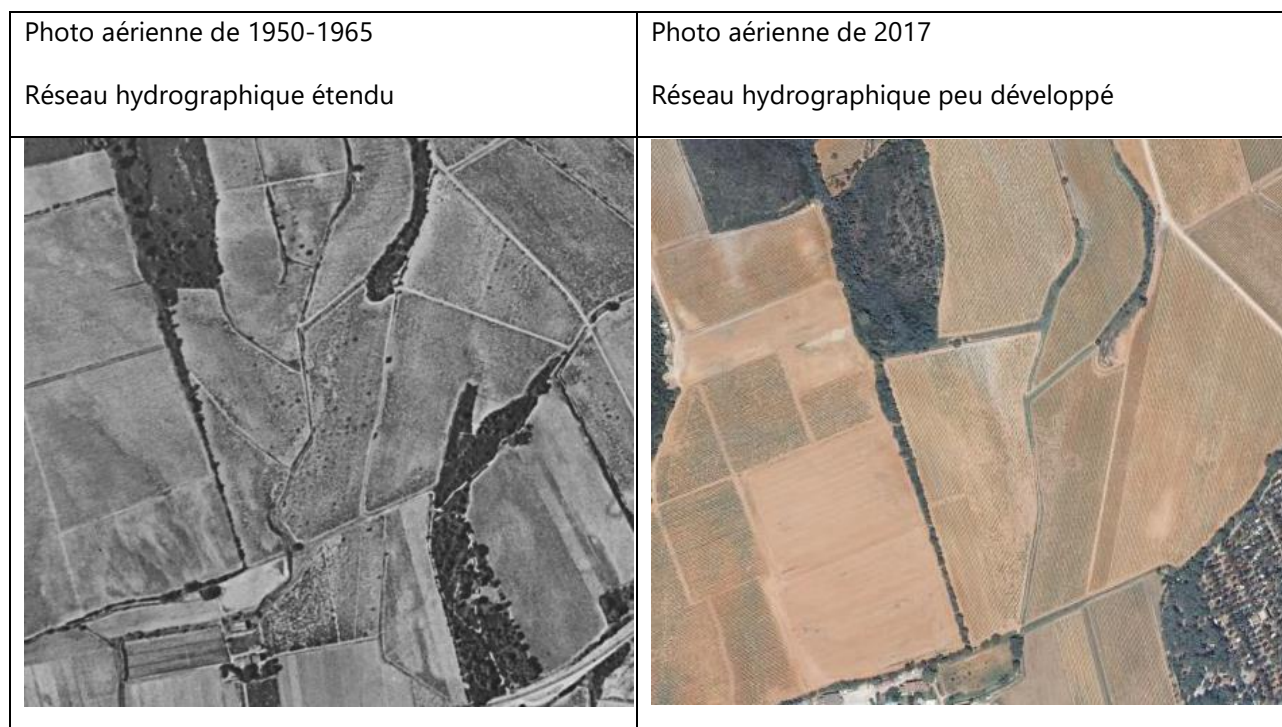
3.1.2.1.3 - Modification de l'occupation du sol

Toujours d'après ces photographies aériennes, une partie de la surface boisée a disparue et a été remplacée par des parcelles agricoles.



3.1.2.2 - Evolution du réseau hydrographique

D'après les premières données disponibles sur le secteur, le réseau hydrographique a évolué de manière significative depuis les années 60. Avec l'exploitation des terres, les talwegs / fossés ont été supprimés et les terrains drainés. Les axes d'écoulements sont plus restreints. Le temps de concentration est augmenté et le transport solide également.



3.1.2.3 - Evolution du lit des vallons observés sur le terrain

Lors des visites de terrain sur le site des Vieux Salins, une forte incision des vallons a été observé. En effet, d'après les photos ci-dessous, le fond du lit est pavé (nombreuses roches visibles).



Ainsi, il apparait très clairement que l'évolution morphodynamique des vallons induit des phénomènes d'incision. Il y a donc une progression vers l'aval des matériaux solides. Ces sédiments sont ensuite transportés vers l'aval jusqu'au canal de ceinture.



FIGURE 16 - OBSTRUCTION DU CANAL DE CEINTURE PAR TRANSPORT SOLIDE

3.1.2.4 - Evolution des fossés pluviaux observés sur le terrain

Il a été observé sur la commune de La Londe-les-Maures, à l'est du camping de La Pascalinette, une excavation du fossé pluvial.

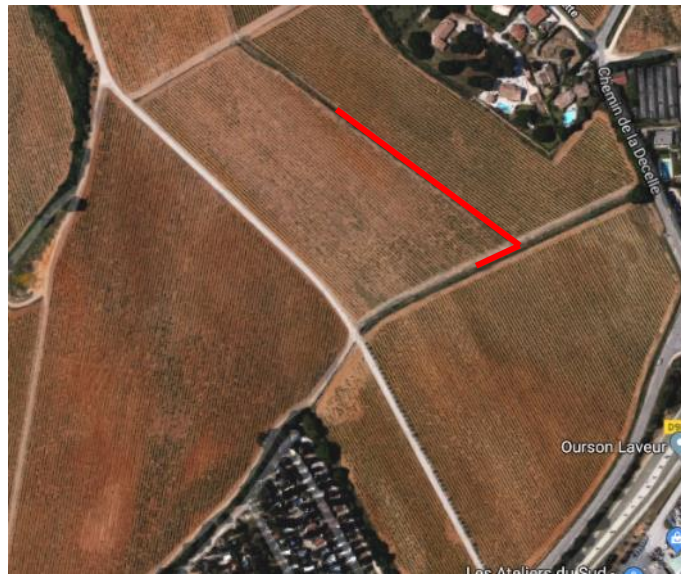
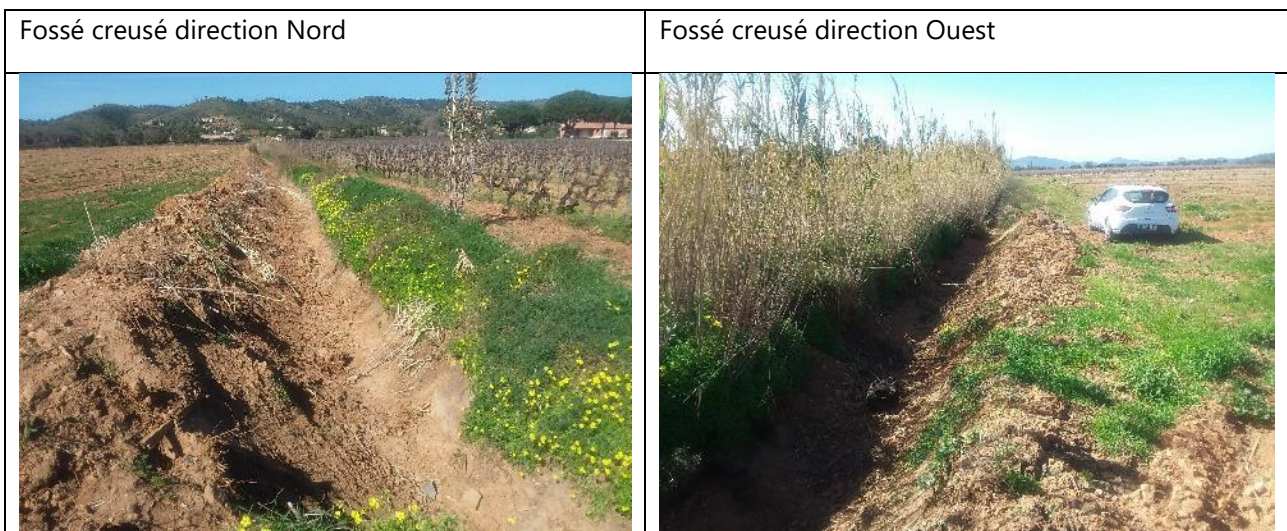


FIGURE 17 - ZONES D'EXCAVATION DEFOSSÉ PLUVIAL



Le cours d'eau va rechercher sa pente d'équilibre, cette excavation du lit va donc entrainer une érosion régressive vers l'amont et une érosion progressive vers l'aval du lit du cours d'eau.

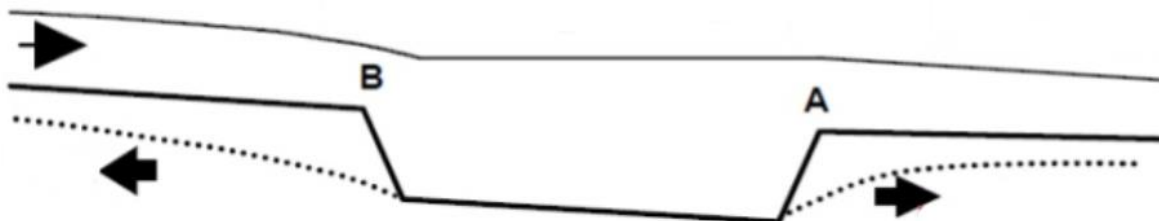


FIGURE 18 – SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DES EROSIONS REGRESSIVE ET PROGRESSIVE

3.1.3 - Synthèse

D'après les informations ci-dessus et la carte présente en page suivante, les évolutions suivantes peuvent être mises en avant (depuis 1950 environ) :

- De nombreuses évolutions morphodynamiques induisent une augmentation du transport solide. Il s'agit de :
 - La suppression des sinuosités (chenalisation) et donc une augmentation des vitesses d'écoulement ;
 - La diminution de la largeur du vallon ;
 - La suppression de talwegs / fossés ;
 - L'artificialisation des berges (enrochements, murets, etc.).

- Quelques évolutions morphodynamiques induisent une diminution du transport sédimentaire et donc un dépôt des matériaux solides :
 - La création de cours d'eau/vallons/fossés.
 - La modification de cours d'eau avec une création de sinuosités.
 - La création de zones de rétention pour les sédiments (étangs, mares).
 - L'élargissement des berges.

L'ÉVOLUTION MORPHODYNAMIQUE DES VALLONS ET LA MODIFICATION DE L'OCCUPATION DU SOL INDUIT DONC UNE AUGMENTATION DE LA CAPACITÉ DE TRANSPORT SOLIDE.

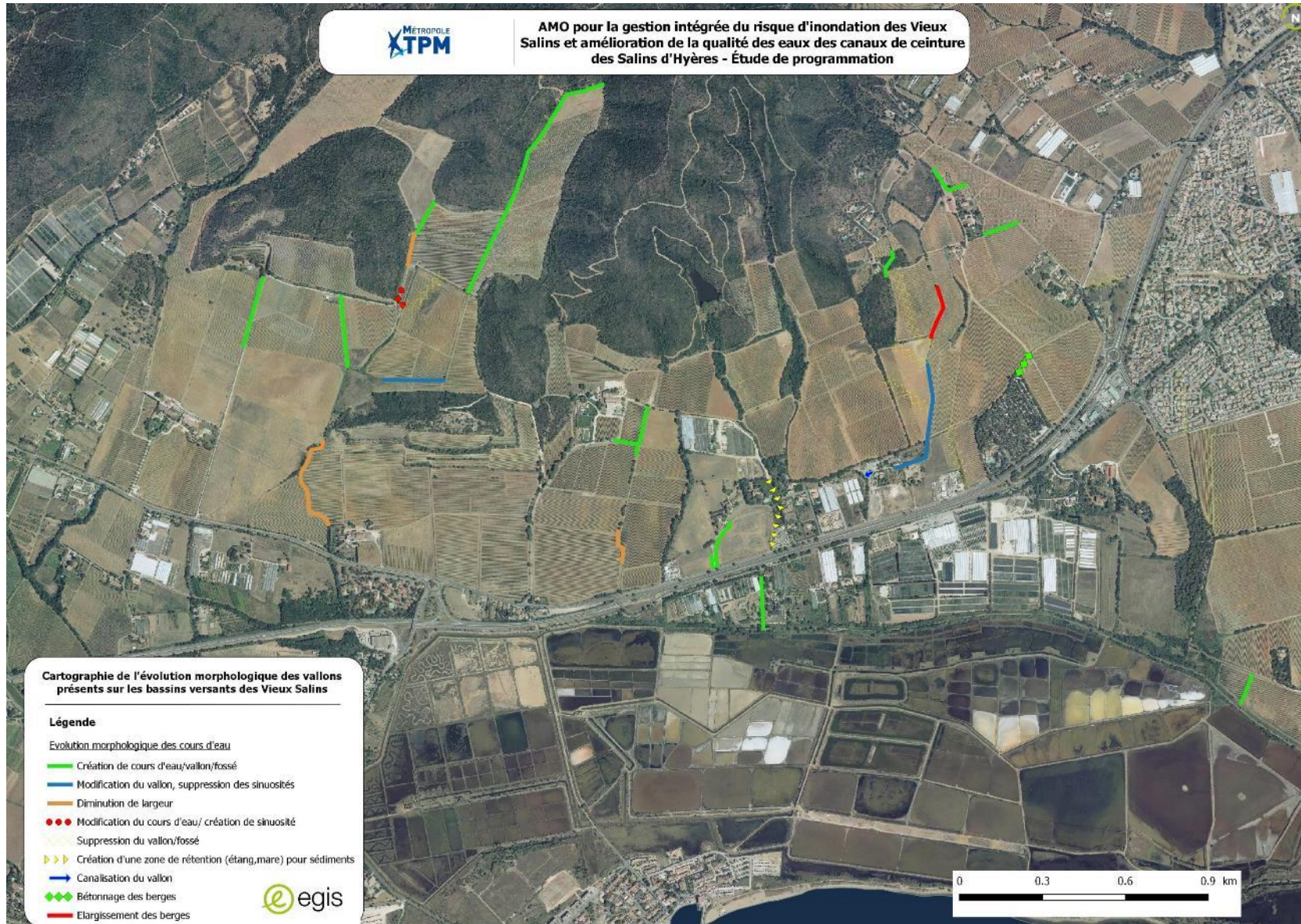


FIGURE 19 – EVOLUTION MORPHODYNAMIQUE DES VALLONS

3.2 - Evaluation du transport solide

3.2.1 - Origine des matériaux solides

Les matériaux arrivant dans le canal de ceinture proviennent des berges des vallons ou encore des parcelles agricoles présentes sur les bassins versants interceptés par les Vieux Salins.

La partie basse du bassin versant est principalement constituée d'alluvions fluviales récentes et de Würm. Cette géologie est caractérisée par des éléments de petites tailles comme des sables, des limons, des cailloutis ou encore des graviers.

Ce type de sol est particulièrement sensible aux phénomènes d'érosion. Lors d'épisodes pluvieux intenses, le transport solide sera relativement important sur la partie basse du bassin versant.

La partie haute du bassin versant est principalement constituée de Quartzites et de Phyllades, ces roches sont qualifiées de dures. Ainsi, pour la partie haute du bassin versant, les vallons se trouvant sur ces roches vont subir une faible érosion tandis que les vallons situés sur le Würm seront sensibles à l'érosion.

Il est à noter qu'une partie du bassin versant a été touchée par un incendie en septembre 2017. Plus de 400 hectares sont partis en fumée lors de cet incendie, certaines zones boisées ont été touchées. Cet événement a ainsi diminué l'occupation des sols avec une diminution des surfaces boisées. Les phénomènes d'érosion ont été augmentés.



FIGURE 20 - INCENDIE ENTRE HYERES ET LA LONDES-LES-MAURES

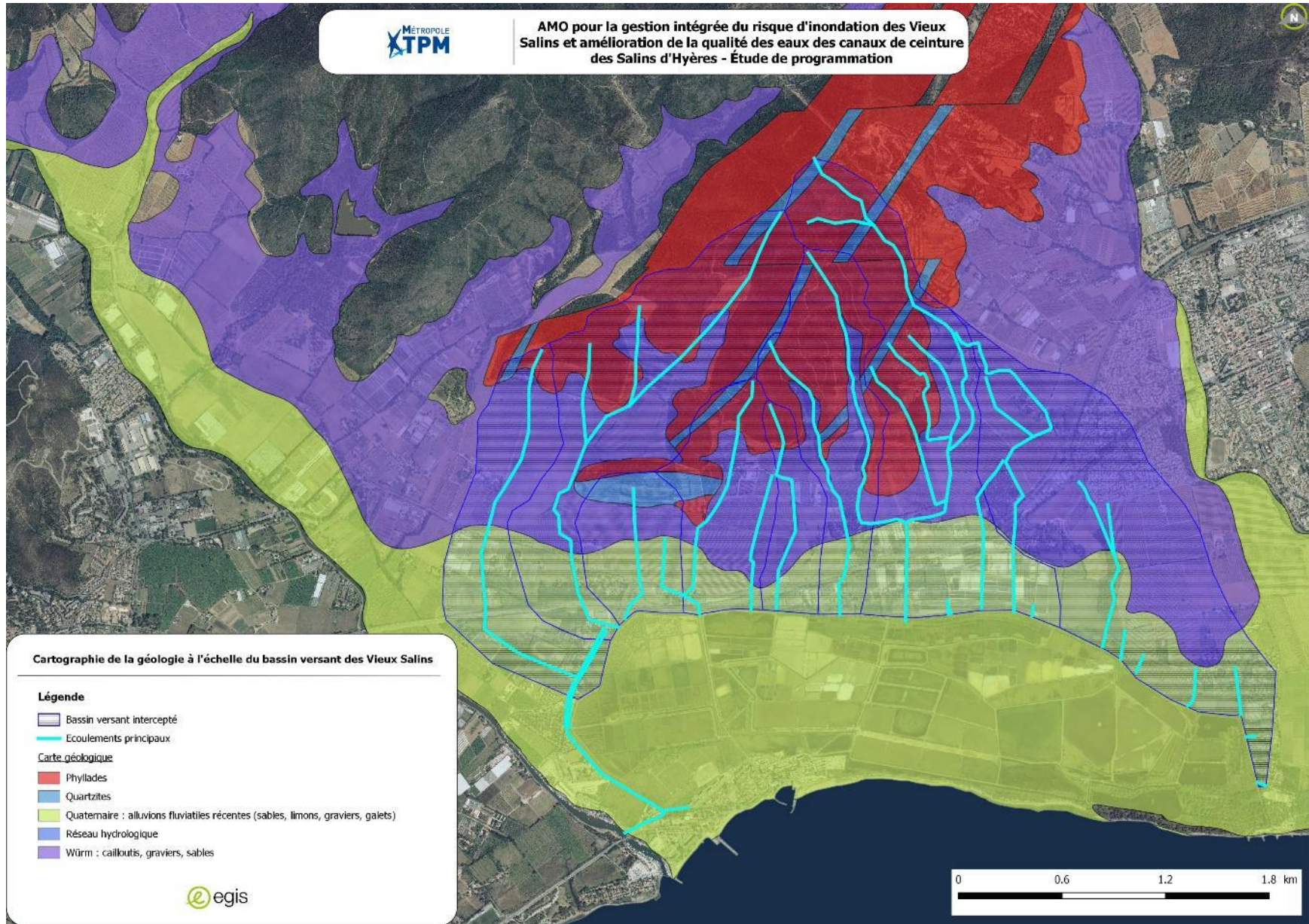


FIGURE 21 – CARTOGRAPHIE DE LA GEOLOGIE DU BASSIN VERSANT DES VIEUX SALINS

3.2.2 - Zones d'érosion sur le bassin versant

Le lit mineur des cours d'eau est constamment formé et déformé. Ces mouvements du lit sont dus aux sédiments. Le déplacement des sédiments au sein du lit du cours d'eau est variable dans le temps et l'espace et est influencé par les changements d'écoulement.

Pour comprendre le déplacement de ces sédiments, il convient d'étudier la force tractrice. Celle-ci correspond à la mise en mouvement de l'ensemble de la couche du lit. En fonction de la force qui s'exerce sur le fond parallèlement à la ligne de charge du lit, la force tractrice est capable de mettre en mouvement les matériaux du fond.

Un élément solide situé dans le lit mineur, sur les berges ou dans le lit majeur sera emporté une fois que la contrainte de cisaillement sur le fond sera supérieure à la contrainte de cisaillement critique.

La carte ci-dessous reprend les différentes pentes utilisées pour les vallons lors de cette analyse du transport solide.

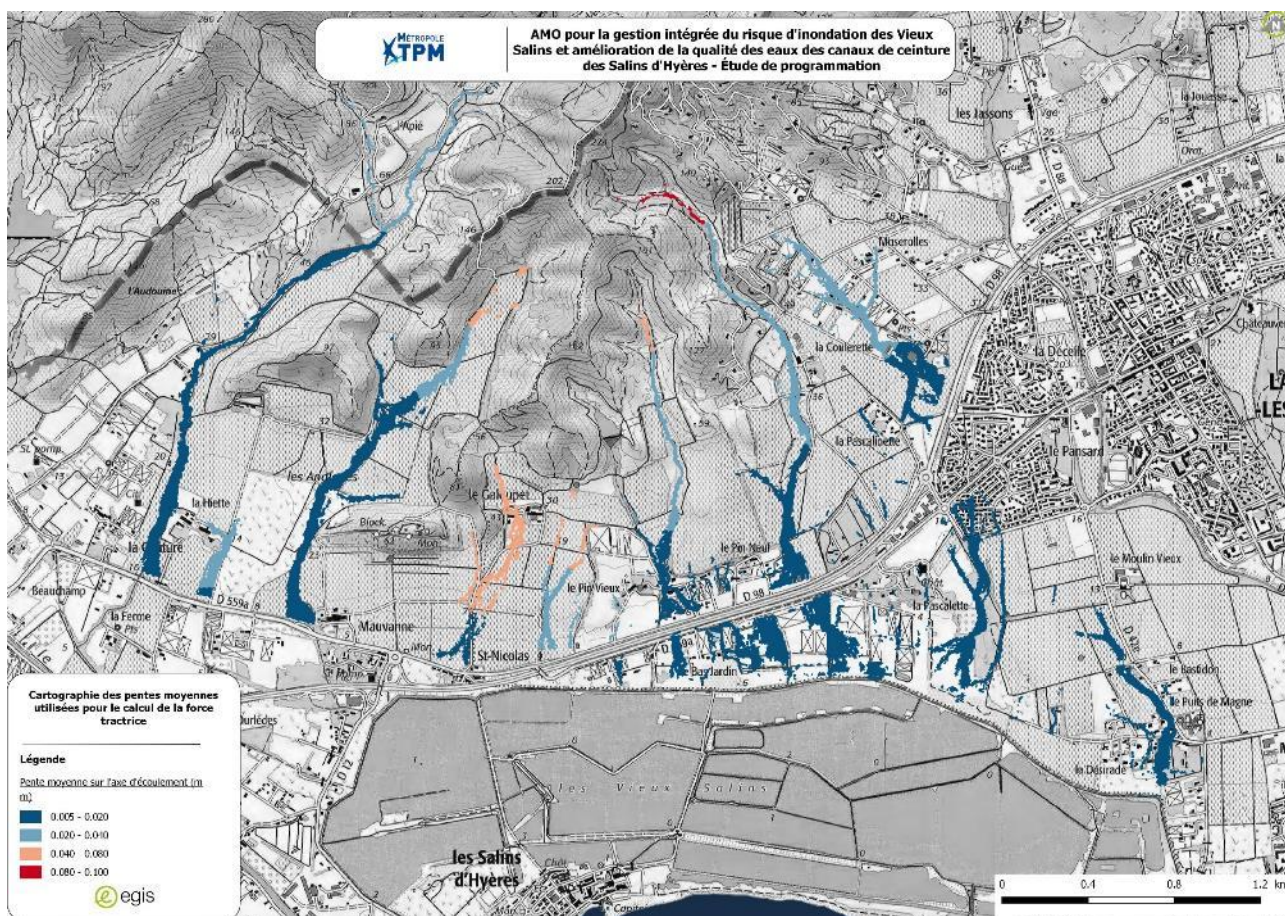


FIGURE 22 – CARTOGRAPHIE DES PENTES MOYENNES D'ÉCOULEMENT

Le tableau ci-dessous est issu du Guide relatif à l'érosion réalisé par Aquaterra-Solutions et permet de lier la force tractrice avec le type de matériau entraîné.

TABLEAU 8 : LIMITE DE FORCE TRACTRICE POUR DIFFERENTS MATERIAUX

Matériaux / Végétaux	Limites de force tractrice (tensions tangentielles) en N/m ²
Sable ou gravier fin	8 à 10
Pelouse, longtemps soumise à débit	15 à 18
Pelouse, sollicitée pendant peu de temps	20 à 30
Hélophytes	30 à 40
Couche de branches	35 à 45
Galets Ø 50 à 100 mm	40 à 60
Tapis anti-érosif, bionattes	80 à 180
Perré /enrochement, selon la taille	70 à 300
Gabions matelas, géomats renforcés	180 à 300
Tapis anti-érosif renforcé avec remplissage de fibres	400 à 670

La formule utilisée pour calculer la force tractrice est la suivante :

$$\text{Force tractrice } \tau = \rho \times l^{0,25} \times k^{-1,5} \times V_{\max}^{1,5}$$

Avec τ la force tractrice en N/m²

ρ le poids de l'eau en N/m³
 l la pente du tronçon en m/m

K le coefficient de rugosité

V_{max} la vitesse max en m/s

Un coefficient final a été ajouté à cette formule afin d'avoir une valeur corrigée de la force tractrice :

TABLEAU 9 : VALEURS DES COEFFICIENTS EN FONCTION DE LA FORME DU COURS D'EAU

Situation/Forme du cours d'eau	Valeur du Coefficient
Légèrement sinueux	1.10
Moyennement sinueux	1.35
Très sinueux ou à proximité d'un ouvrage	1.70

Les forces tractrices générées par les eaux de ruissellement lors de la pluie de janvier 2014 et pour une pluie de période de retour 100 ans sont présentées ci-après. Elles sont associées au type de matériaux pouvant être entraîné.

Seules les vitesses supérieures à 0.2 m/s ont été utilisées, en dessous les vitesses ne sont pas suffisantes pour entraîner des matériaux.

3.2.2.1 - Pluie de janvier 2014

Les principaux axes d'écoulements sont situés sur des sols agricoles principalement constitués de limons, sables et cailloutis. Ces parcelles agricoles ne sont pas délimitées par des haies ce qui favorise le transport solide.

3.2.2.1.1 - Secteur Ouest des Vieux Salins

Sur le secteur Ouest, les photos aériennes confirment le transport de matériaux solides depuis les vallons des bassins versants interceptés par les Vieux Salins.



FIGURE 23 - TRANSPORT SOLIDE SUR LA PARTIE OUEST DES VIEUX SALINS

3.2.2.1.2 - Secteur Nord des Vieux Salins

Sur le secteur Nord, l'importante turbidité des casiers indique que du transport solide a lieu depuis les vallons situés à l'amont des Vieux Salins.



FIGURE 24 - TRANSPORT SOLIDE SUR LA PARTIE NORD DES VIEUX SALINS

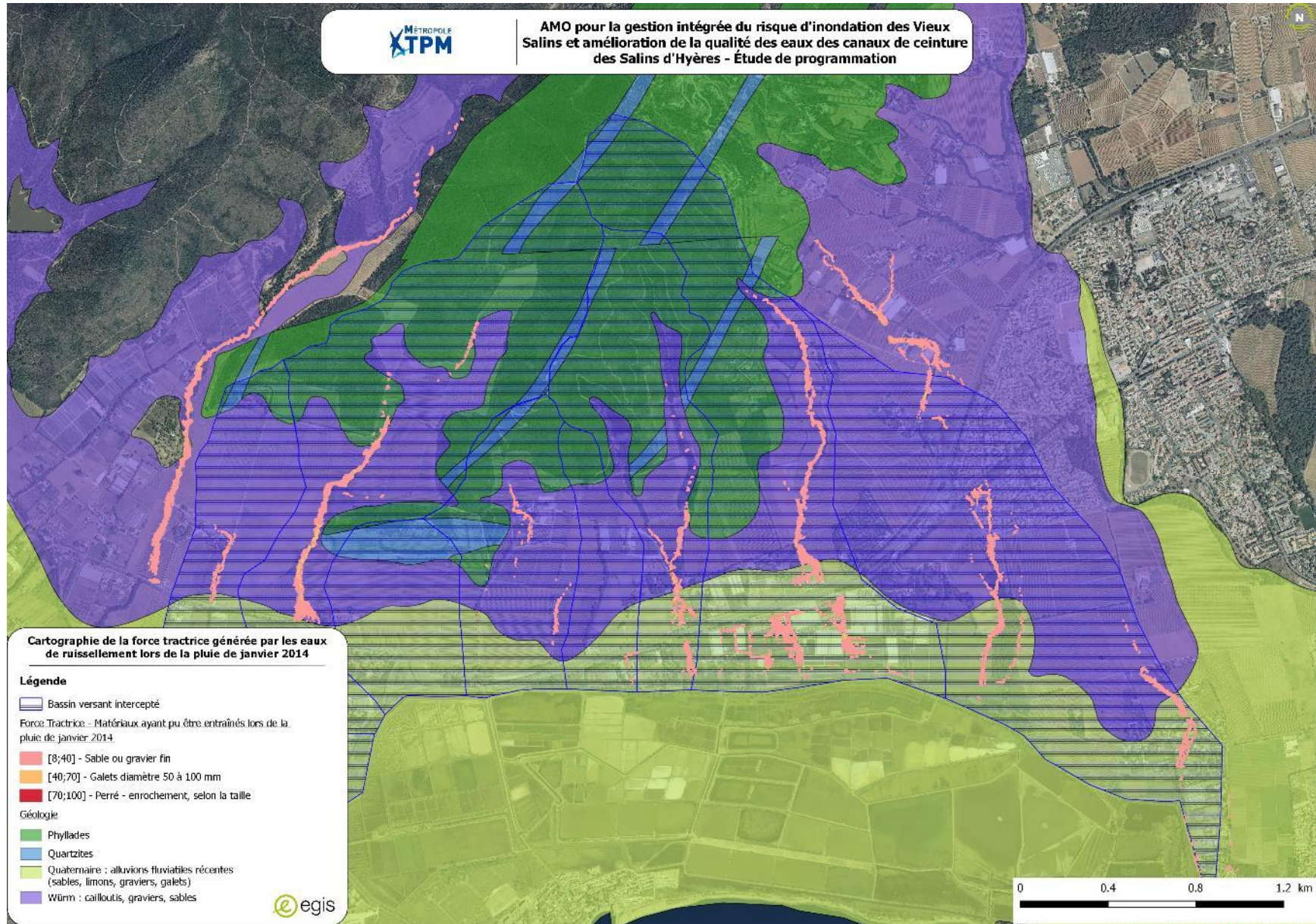


FIGURE 25 - CARTOGRAPHIE DE LA FORCE TRACTRICE GENEREE PAR LES EAUX DE RUISSELLEMENT LORS DE LA PLUIE DE JANVIER 2014

3.2.2.2 - Pluie centennale

Lors d'une pluie centennale, les matériaux solides tels que du sable, du gravier ou encore des galets pourraient être entraînés et ainsi venir obstruer les canalisations ou encore le canal de ceinture.

A l'amont des vallons, ceux-ci sont situés sur une géologie caractéristique des sols durs cependant, la forte pente sur ces parties des vallons induit une certaine érosion des sols.

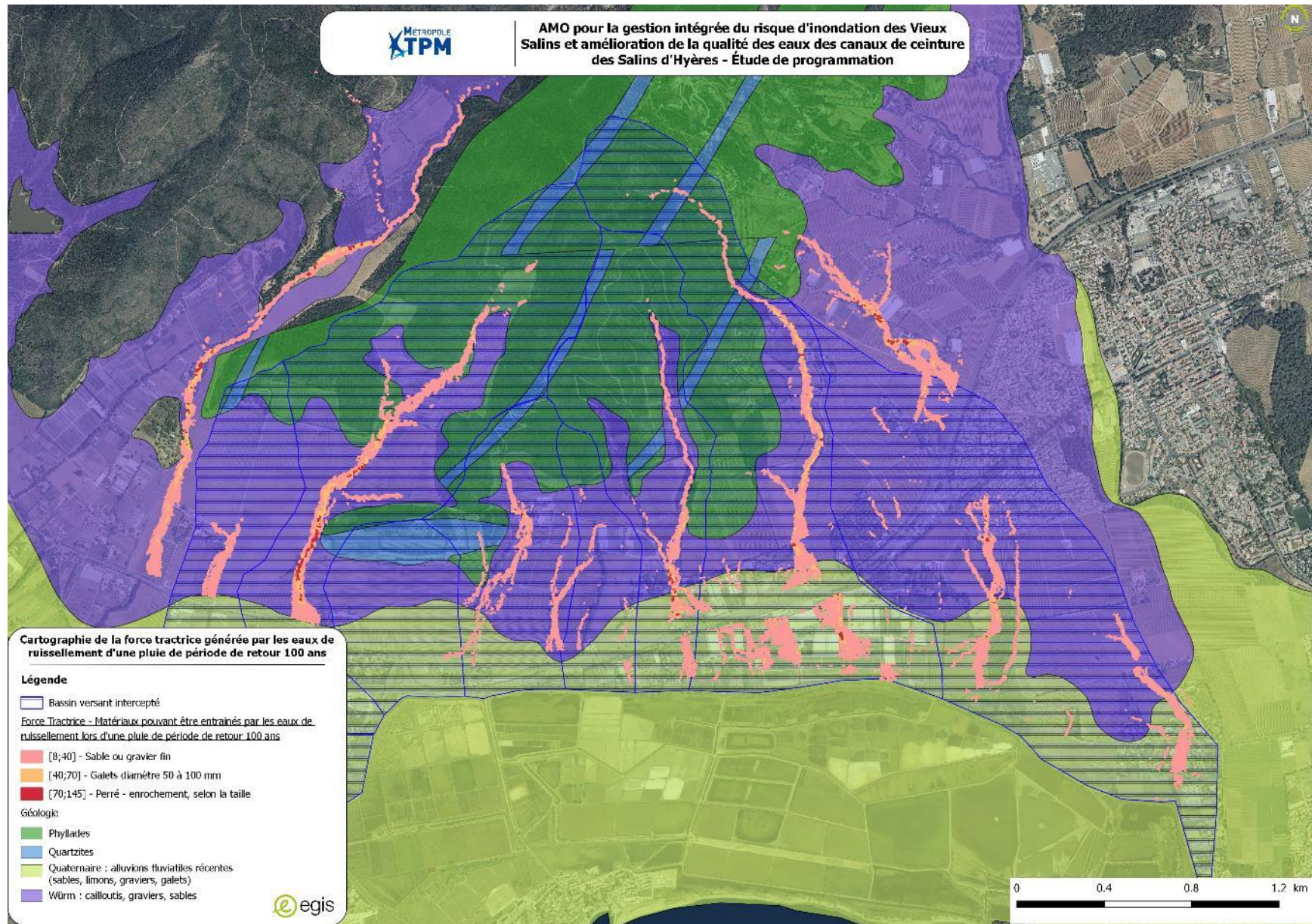


FIGURE 26 - CARTOGRAPHIE DE LA FORCE TRACTRICE GENEREE PAR LES EAUX DE RUISSELLEMENT D'UNE PLUIE DE PERIODE DE RETOUR 100 ANS

3.2.3 - Zone de dépôts

Les zones de dépôts sont situées au niveau de confluence entre un cours d'eau à forte pente et à faible pente. Dans le cas de cette étude, le canal de ceinture des Vieux Salins présente de très faibles vitesses d'écoulement. Les sédiments et les matériaux solides transportés dans le canal de ceinture vont avoir tendance à se déposer du fait de la faible vitesse. Il est ainsi observé dans le canal de ceinture des zones de dépôts de matériaux fins (sable), provenant des vallons amont.

La confluence entre les vallons (*ayant une importante vitesse d'écoulement lors d'épisodes pluvieux*) avec le canal de ceinture (*ayant une faible vitesse même en cas de crue*) va entraîner un dépôt de sédiments.



FIGURE 27 - CONFLUENCE ENTRE VALLON ET CANAL DE CEINTURE (PARTIE OUEST DES VIEUX SALINS)



FIGURE 28 - CONFLUENCE ENTRE VALLON ET CANAL DE CEINTURE (PARTIE NORD DES VIEUX SALINS)

3.2.4 - Impact des ouvrages

Les vallons rejoignant le canal de ceinture sont caractérisés par un fonctionnement similaire les uns des autres : ils possèdent une forte pente d'écoulement en tête de bassin versant où ils traversent des zones boisées puis agricoles, puis ils rejoignent la partie plus urbanisée en aval avec traversée de la RD98 où leur pente se réduit avant de se rejeter dans le canal de ceinture.

La rupture de pente engendre un dépôt de sédiment, dépôt confirmé par les observations (§3.2.3). De plus, la présence d'ouvrages hydrauliques de traversée de la RD98 engendre un phénomène d'accélération des vitesses en amont des ouvrages (réduction de section). Cette accélération contribue à un transport sédimentaire augmenté en amont des ouvrages. A contrario, en aval, les sédiments transportés se déposent, phénomène d'autant plus marqué du fait de la rupture de pente.

3.3 - Conclusions

La présente étude a permis d'analyser le transport solide à l'échelle des bassins versants des Vieux Salins. De nombreuses zones d'érosion ont été mises en évidence au niveau des linéaires des vallons présents sur les bassins versants.

Le transport solide présente un enjeu majeur aussi bien au niveau économique qu'au niveau hydraulique. Le transport sédimentaire est directement responsable de la modification de l'hydromorphologie des cours d'eau. Economiquement, le transport solide représente d'importants enjeux :

Accumulation de sédiments dans les canalisations/ouvrages	Eaux turbides dans les bâtiments
	

Présence de boue sur la chaussée	Curage nécessaire aux points de confluence pour maintenir la capacité hydraulique des ouvrages et des vallons.
	

Les informations récoltées sur le terrain indiquent que les vallons présents sur le bassin versant sont sujets à un fort transport sédimentaire. Ces matériaux solides vont être transportés jusqu'à l'aval au niveau du canal de ceinture, déposé dans le canal du fait de sa faible pente et favorisant ainsi l'exhaussement du lit du canal.

Cet exhaussement du lit diminue sa capacité hydraulique et favorise les débordements.

L'exhaussement peut être géré via :

- Une gestion des apports via des curages périodiques ;
- Une rétention des matériaux en amont via des aménagements spécifiques (pièges à sédiments).

Il conviendra de s'assurer que ces différentes solutions ne sont pas dommageables pour l'équilibre sédimentaire au sein du canal.

AFIN DE CONTROLER LE TRANSPORT SEDIMENTAIRE, IL SERA NECESSAIRE DE METTRE EN PLACE DES ACTIONS PERMETTANT DE DIMINUER LE TRANSPORT SOLIDE OU A MINIMA DE CONTROLER SON EVOLUTION.

ANNEXES

Cartographie des hauteurs d'eau
maximales issues du modèle de
ruissellement pour une pluie de projet
Keifer de période de retour 10 ans.

Légende

□ Bassins versants interceptés

■ Bâti

Hauteur de submersion

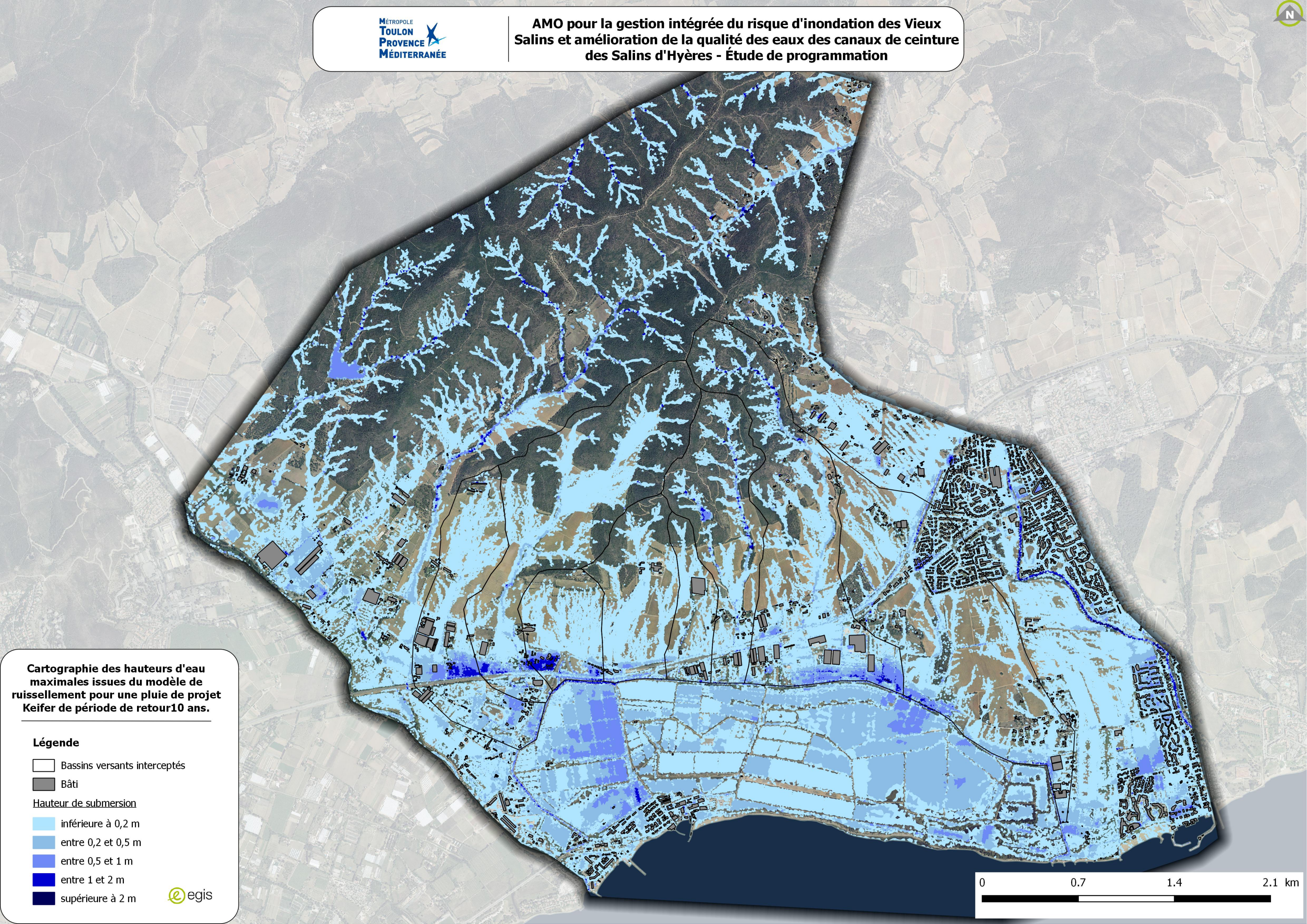
■ inférieure à 0,2 m

■ entre 0,2 et 0,5 m

■ entre 0,5 et 1 m

■ entre 1 et 2 m

■ supérieure à 2 m



Cartographie des vitesses maximales
issues du modèle de ruissellement pour
une pluie de projet Keifer de période de
retour 10 ans.

Légende

■ Bâti

Vitesses d'écoulement

■ inférieure à 0.5 m/s

■ entre 0.5 et 1 m/s

■ supérieure à 1 m/s

Cartographie des hauteurs d'eau
maximales issues du modèle de
ruissellement pour une pluie de projet
Keifer de période de retour 100 ans.

Légende

□ Bassins versants interceptés

■ Bâti

Hauteur de submersion

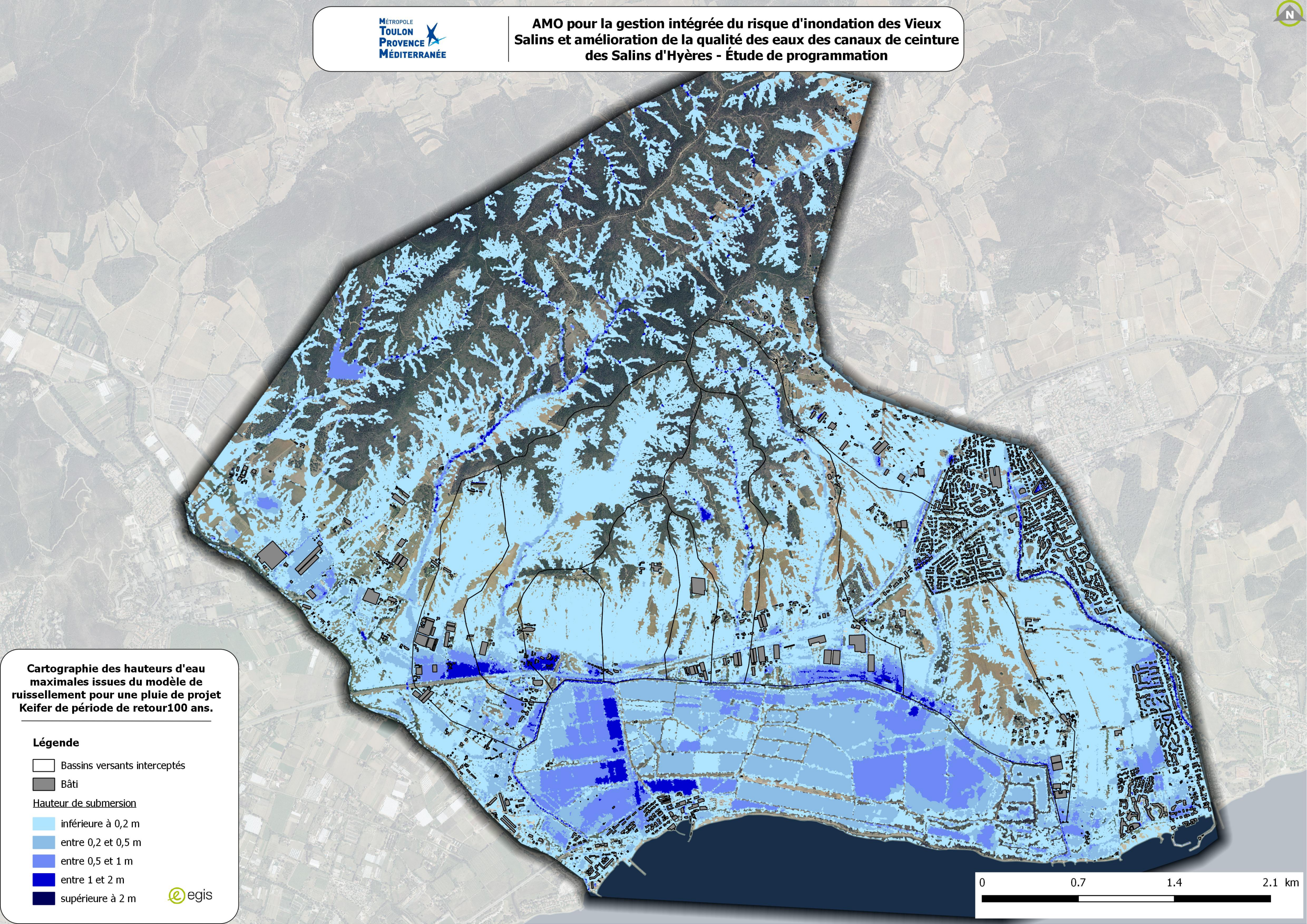
■ inférieure à 0,2 m

■ entre 0,2 et 0,5 m

■ entre 0,5 et 1 m

■ entre 1 et 2 m

■ supérieure à 2 m



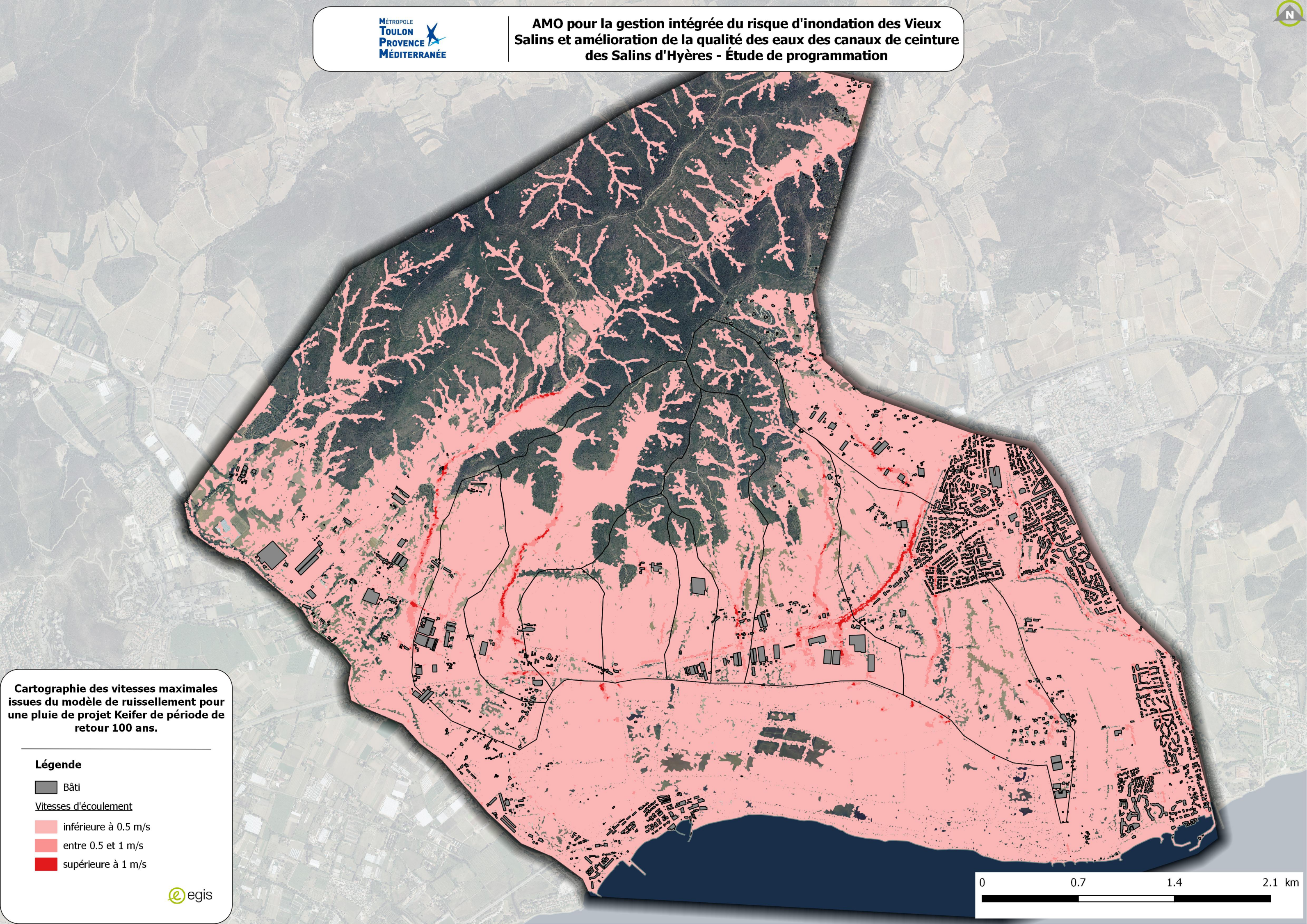
Cartographie des vitesses maximales
issues du modèle de ruissellement pour
une pluie de projet Keifer de période de
retour 100 ans.

Légende

Bâti

Vitesses d'écoulement

- inférieure à 0.5 m/s
- entre 0.5 et 1 m/s
- supérieure à 1 m/s



**Cartographie des hauteurs d'eau
maximales issues du modèle de
ruissellement pour une pluie de projet
Keifer type Cap Cépet 2006**


Légende

 Bassins versants interceptés

 Bâti

Hauteur de submersion

 inférieure à 0,2 m

 entre 0,2 et 0,5 m

 entre 0,5 et 1 m

 entre 1 et 2 m

 supérieure à 2 m

Cartographie des vitesses maximales
issues du modèle de ruissellement pour
une pluie de projet Keifer de type Cap
Cépet 2006

Légende

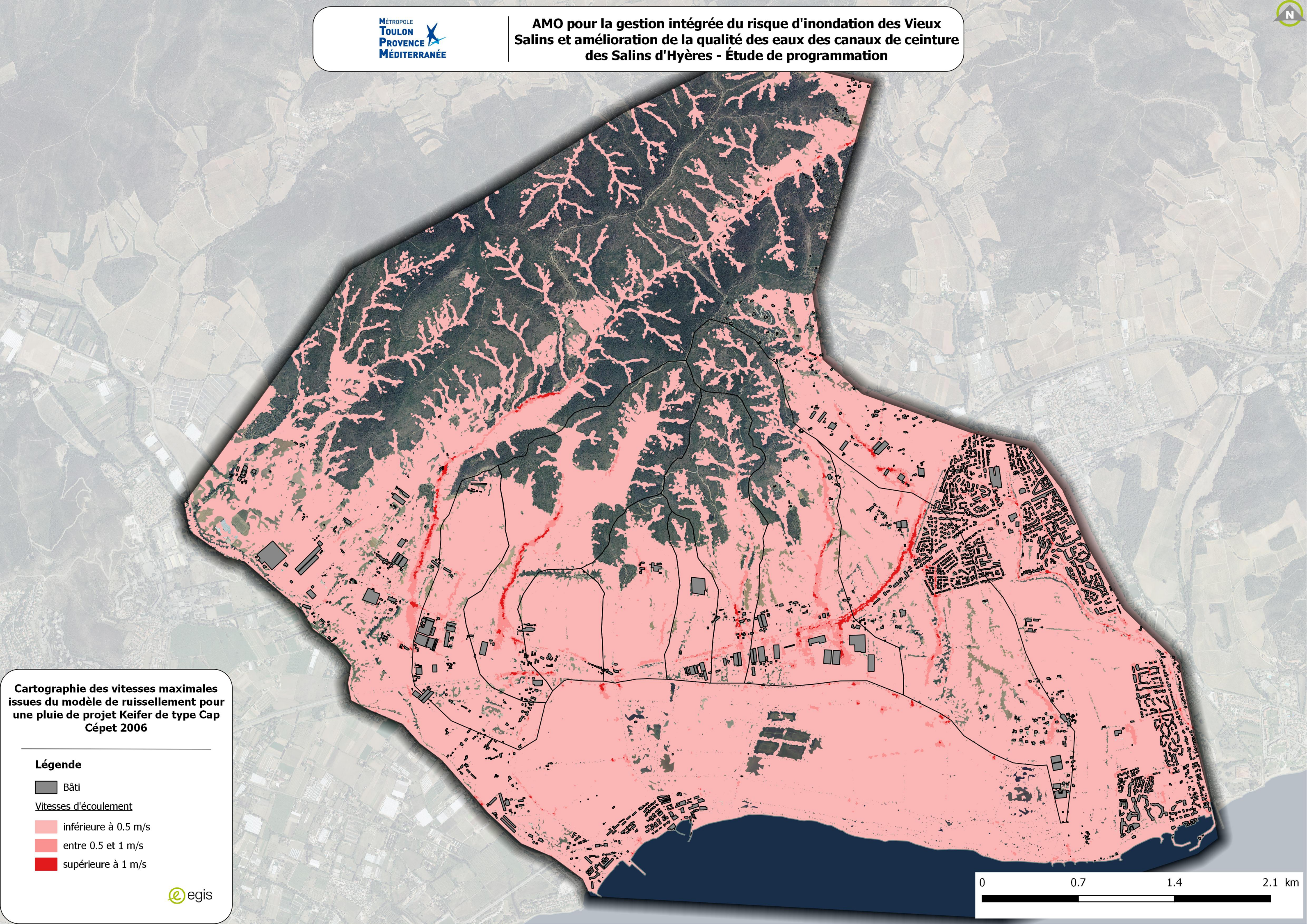
■ Bâti

Vitesses d'écoulement

■ inférieure à 0.5 m/s

■ entre 0.5 et 1 m/s

■ supérieure à 1 m/s



**Cartographie des hauteurs d'eau
maximales issues du modèle de
ruissellement pour la pluie réelle de
calage du 19 janvier 2014**


Légende

 Bassins versants interceptés

 Bâti

Hauteur de submersion

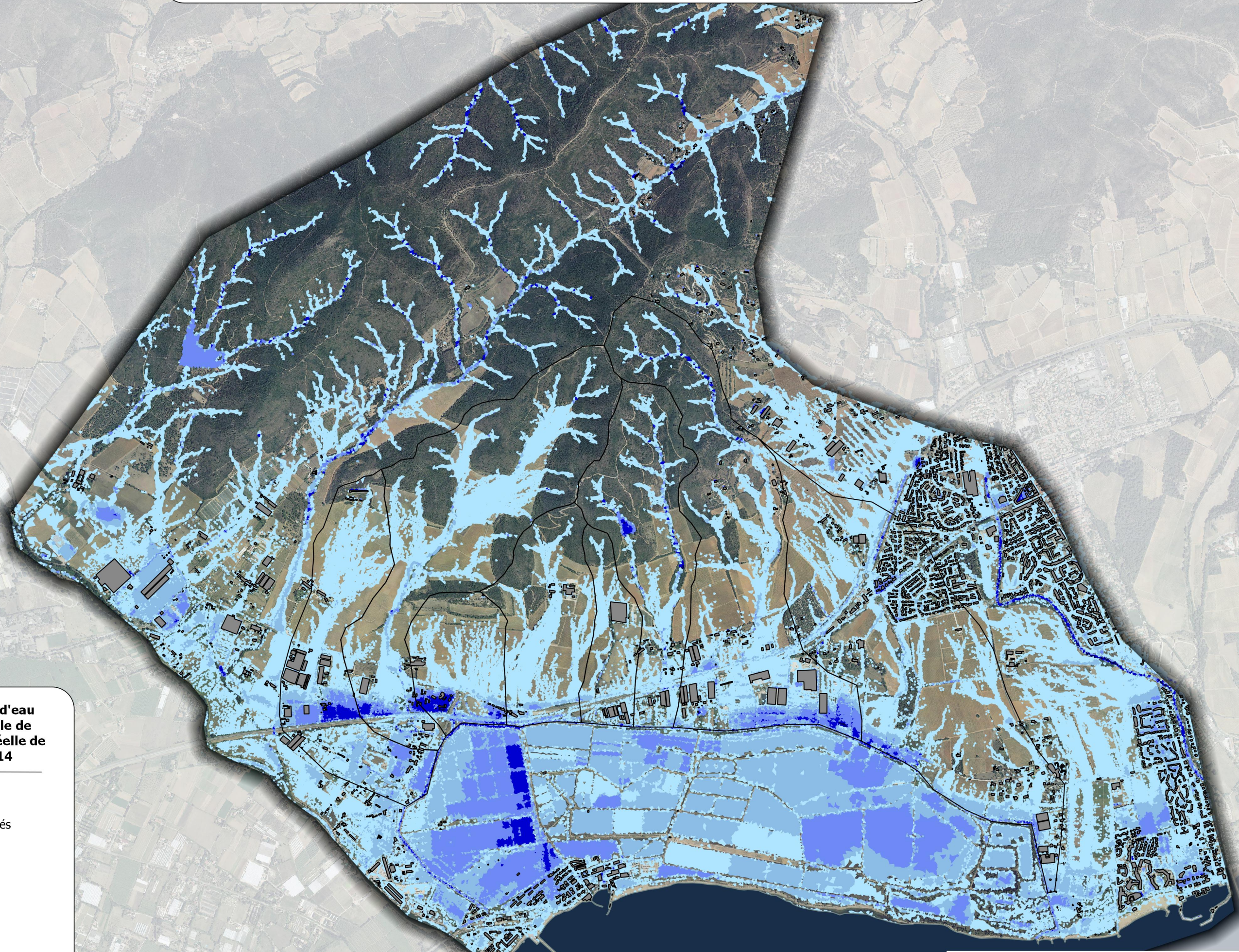
 inférieure à 0,2 m

 entre 0,2 et 0,5 m

 entre 0,5 et 1 m

 entre 1 et 2 m

 supérieure à 2 m



**Cartographie des vitesses maximales
issues du modèle de ruissellement pour
la pluie réelle du 19 janvier 2014**

Légende

■ Bâti

Vitesses d'écoulement

■ inférieure à 0.5 m/s

■ entre 0.5 et 1 m/s

■ supérieure à 1 m/s

