CIREST

Définition des travaux de remise en état d'un merlon et protection de berge - Rivière des Marsouins - Ilet Coco

PHASE 2 : ETUDE HYDRAULIQUE

Ville & Transport
Région Réunion
121 boulevard Jean Jaurès
CS 31005
97404 SAINT-DENIS CEDEX
Tel. : 02 62 90 96 00
Fax : 02 62 90 96 01

DATE : JUILLET 2019 **REF : 4702454-R2C / EMI**

D	Version modifiée suite aux remarques MOA du 17/07/19	19/07/2019	CHe		
C	Version modifiée suite aux remarques MOA du 15/07/19	16/07/2019	EMi		
B	Version modifiée suite aux remarques MOA du 3/07/19	12/07/2019	EMi		
A	Version initiale	28/06/2019	EMi		
INDICE	*OBJET DE LA MODIFICATION*	*DATE*	*VISA EMETTEUR*	*VISA RELECTURE*	*VISA APPROBATION*

SOMMAIRE

1. PREAMBULE 5
1.1. CONTEXTE GENERAL 5
1.2. CONTEXTE HYDRAULIQUE 5
1.3. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA MISSION 6
2. DONNEES DISPONIBLES 8
3. CONTEXTE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE 9
3.1. CONTEXTE HYDROLOGIQUE 9
3.1.1. Bassin versant 9
3.1.2. Débits de pointe 10
3.1.3. Hypothèse retenue 11
3.1.4. Crues historiques 12
3.2. ETAT DES LIEUX 13
3.2.1. Axes d'écoulements 13
3.2.2. Ouvrages hydrauliques 16
3.3. FONCTIONNEMENT HYDROGEOMORPHOLOGIQUE 19
3.3.1. Mécanismes 19
3.3.2. Evolution en plan 19
3.3.2.1. A L'ECHELLE DE L'ILET 19
3.3.2.2. AU DROIT DE LA ZONE D'ETUDE 21
3.3.3. Evolution en altimétrie 25
3.4. CONDITIONS D'ECOULEMENT 27
3.4.1. Données exploitées 27
3.4.2. Présentation du modèle 2019 27
3.4.2.1. LOGICIEL 27
3.4.2.2. EMPRISE MODELISEE 27
3.4.2.3. HYPOTHESES 28
3.4.3. Niveaux d'eau et vitesses 28
3.4.4. Répartition des débits 32
3.4.5. Débordements – hauteurs d'eau 34
4. REFECTION DU MERLON 36
4.1. DESCRIPTION DE LA SOLUTION 1 36
4.1.1. Merlon longitudinal 36
4.1.2. Merlon transversal 38
4.1.3. Protection des berges du bras principal en amont et en aval de l'ouvrage 38
4.1.4. Protection de la berge RG du bras de décharge 39
4.1.5. Schéma de principe 39
4.2. DESCRIPTION DE LA SOLUTION 2 41
4.2.1. Merlon 41
4.2.2. Protection des berges du bras principal en amont et en aval de l'ouvrage 42
4.2.3. Protection de la berge RG du bras de décharge 42
4.2.4. Schéma de principe 42
4.3. PERIODE DE RETOUR DE DIMENSIONNEMENT 44
4.4. ENTRETIEN ET INSPECTION 44
5. INCIDENCE DU PROJET SUR L'HYDRAULIQUE 45
5.1. ZONE INONDABLE 45
5.2. RISQUE DE RUPTURE 46

6. CADRAGE REGLEMENTAIRE 51
7. ESTIMATIF 53
7.1. REALISATION DES TRAVAUX 53
7.2. ENTRETIEN 55
7.3. COUT TOTAL SUR 50 ANS 56
8. ETUDES COMPLEMENTAIRES 57
9. DUREE DE REALISATION DES TRAVAUX 57
10. ANALYSE MULTI CRITERES 58

TABLEAUX

TABL. 1 - DONNEES DISPONIBLES 8
TABL. 2 - DEBITS DE POINTE RETENUS POUR DIFFERENTES PERIODE DE RETOUR 11
TABL. 3 - CRUES LES PLUS SIGNIFICATIVES ENREGISTREES ENTRE 1998 ET 2018 SUR LA RIVIERE DES MARSOUINS AVEC DEBITS ESTIMES 12
TABL. 4 - CARACTERISTIQUES DE L'ECOULEMENT AU DROIT DU MERLON DANS LE BRAS PRINCIPAL 32
TABL. 5 - REPARTITION DES DEBITS [M^3/S] 34
TABL. 6 - LONGUEUR DU RESSAUT SUR LE MERLON LONGITUDINAL 37
TABL. 7 - LONGUEUR DU RESSAUT SUR LE MERLON LONGITUDINAL 41
TABL. 8 - PERIODE DE RETOUR DE DIMENSIONNEMENT 44
TABL. 9 - RUBRIQUE LOI SUR L'EAU POTENTIELLEMENT CONCERNEE 51
TABL. 10 - ESTIMATIF DES TRAVAUX DE REALISATION DES OUVRAGES 53
TABL. 11 - ESTIMATIF – SOLUTION 1 DIMENSIONNEMENT 5 M/S 53
TABL. 12 - ESTIMATIF – SOLUTION 1 DIMENSIONNEMENT 4 M/S 54
TABL. 13 - ESTIMATIF – SOLUTION 2 DIMENSIONNEMENT 5 M/S 54
TABL. 14 - ESTIMATIF – SOLUTION 2 DIMENSIONNEMENT 4 M/S 55
TABL. 15 - ESTIMATIF DES TRAVAUX D'ENTRETIEN DES OUVRAGES SUR 50 ANS 55
TABL. 16 - ESTIMATIF DES TRAVAUX + ENTRETIEN DES OUVRAGES SUR 50 ANS 56
TABL. 17 - COUT ANNUEL MOYEN SUR 50 ANS 56
TABL. 18 - ANALYSE MULTI CRITERES 58

FIGURES

FIG. 1. LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE 7
FIG. 2. BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE DES MARSOUINS AU DROIT DE L'ILET DANCLAS 9
FIG. 3. HYDROGRAMMES DE CRUES (REF. /6/) 10
FIG. 4. FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE 15
FIG. 5. MERLON DE SURVERSE VERS LE BRAS DE DECHARGE (PHOTO 2017) 16
FIG. 6. COMPARAISON DES VUES AERIENNES HISTORIQUES 20
FIG. 7. FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DE LA RIVIERE DES MARSOUINS AU DROIT DE LA ZONE D'ETUDE (ORTHOPHOTO 2008) 22
FIG. 8. EVOLUTION DE LA RIVIERE DES MARSOUINS AU DROIT DE LA ZONE D'ETUDE (2008 – 2011 – 2014) 23
FIG. 9. EVOLUTION DE LA RIVIERE DES MARSOUINS AU DROIT DE LA ZONE D'ETUDE (1949 – 1997) 24
FIG. 10. DIFFERENCE DES FONDS MODELISES (2019 / 2013) 25
FIG. 11. PROFILS EN LONG DES FONDS EXTREMES DE LA RIVIERE DES MARSOUINS 25
FIG. 12. VITESSES MAXIMALES ISSUES DES MODELISATIONS 31
FIG. 13. DEBITS MAXIMAUX – CRUE CENTENNALE, DECENNALE ET 700M^3/S 33
FIG. 14. HAUTEURS D'EAU MAXIMALES – CRUE CENTENNALE (MODELE 2D 2019) 35
FIG. 15. HAUTEURS D'EAU MAXIMALES – CRUE DECENNALE (MODELE 2D 2019) 35
FIG. 16. IMPLANTATION ET COUPE DE LA SOLUTION 1 40
FIG. 17. IMPLANTATION ET COUPE DE LA SOLUTION 2 43
FIG. 18. IMPACT SUR LES NIVEAUX D'EAU POUR LA SOLUTION 1 EN Q_{10} ($H_{PROJET} - H_{INITIAL}$) 47
FIG. 19. IMPACT SUR LES NIVEAUX D'EAU POUR LA SOLUTION 1 EN Q_{100} ($H_{PROJET} - H_{INITIAL}$) 48
FIG. 20. IMPACT SUR LES NIVEAUX D'EAU POUR LA SOLUTION 2 EN Q_{10} ($H_{PROJET} - H_{INITIAL}$) 49
FIG. 21. IMPACT SUR LES NIVEAUX D'EAU POUR LA SOLUTION 2 EN Q_{100} ($H_{PROJET} - H_{INITIAL}$) 50

1. PREAMBULE

1.1. CONTEXTE GENERAL

Le secteur d'Ilet Danclas est situé dans le lit majeur de la Rivière des Marsouins, sur la commune de Saint-Benoit.

Etant donné son emplacement, cet ilet peut être rapidement enclavé par submersion des radiers d'accès en cas d'évènement pluvieux important. Cet enclavement, et la dangerosité des écoulements à proximité immédiate de zones à enjeux, ont notamment causé des pertes de vie humaine ces dernières années.

Ainsi, il apparait nécessaire de mettre en place des mesures correctives afin de limiter cet enclavement et de sécuriser la population.

Plusieurs actions sont actuellement menées dans ce sens et intégrées dans la fiche action n°6.1 du Programme d'Action de Prévention du Risque Inondation (PAPI) du Territoire à Risque Inondation (TRI) de la commune de St Benoit.

Le présent rapport concerne plus particulièrement la réalisation d'une étude hydraulique permettant d'étudier les possibilités d'accroitre les écoulements dans le bras principal de la Rivière des Marsouins (rive gauche). Les aménagements proposés dans cette étude permettront alors de retarder les écoulements et la montée des eaux au niveau de l'ilet Coco afin que la population dispose d'une fenêtre d'évacuation plus importante lors des crues en limitant les débits au droit des radiers d'accès à l'ilet.

1.2. CONTEXTE HYDRAULIQUE

L'ilet est localisé sur une terrasse peu perchée située entre 2 bras de la rivière des Marsouins. Le bras rive gauche (bras principal) est actuellement en eau et le bras rive droite (Bras secondaire) est à sec en période d'étiage. Il se réalimente lors des épisodes pluvieux.

Le bras secondaire est alimenté en 2 endroits :

- en amont de l'ilet par surverse du bras principal sur un merlon,
- face à l'ilet Bethléem, par surverse du bras principal sur un merlon vers un 3ème bras appelé bras de décharge. Cet ouvrage, objet de la présente étude, est localisé sur la figure en page suivante. Ce bras de décharge a été réalisé de façon anthropique avant les années 1950.

1.3. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA MISSION

La Rivière des Marsouins présente des débits de crue élevé et une forte capacité de transport solide qui lui confère un potentiel érosif certain des berges de l'ilet.

Ainsi, lors de l'épisode Fakir en avril 2018, la surverse a cédé face à la pression des écoulements en crue de la Rivière des Marsouins.

Le bras de décharge a été fortement sollicité, avec détérioration de la berge rive gauche (cf. figure en page suivante).

La destruction de cette surverse a entrainé l'augmentation des débits transités vers le bras secondaire même lors des faibles crues. Cela a eu pour conséquence une augmentation de la fréquence du débordement au niveau des 2 radiers d'accès à l'ilet coco, et donc un isolement plus fréquent de l'ilet.

Le fonctionnement hydraulique de ce bras de décharge doit donc être questionné afin de vérifier son réel impact sur la réduction des inondations de l'ilet et d'étudier la possibilité de modifier son alimentation pour tendre vers un fonctionnement naturel de la Rivière des Marsouis avant la création de ce bras de décharge.

La CIREST souhaite donc mener une étude pour préciser les travaux à mettre en œuvre pour reconfigurer le site, au droit de la surverse et du bras de décharge.

Le MOA souhaite l'étude de plusieurs solutions :

- Une reprise de la surverse conformément à l'état initial (avant destruction de l'ouvrage par l'épisode Fakir) avec mise en place d'une surverse vers le bras secondaire;
- Une reprise du merlon de protection du bras secondaire sans mis en place de surverse.

La mission confiée à ARTELIA comporte :

- La réalisation de levés topographiques
- La réalisation d'une étude hydraulique : objet du présent document
- La réalisation du dossier loi sur l'eau.

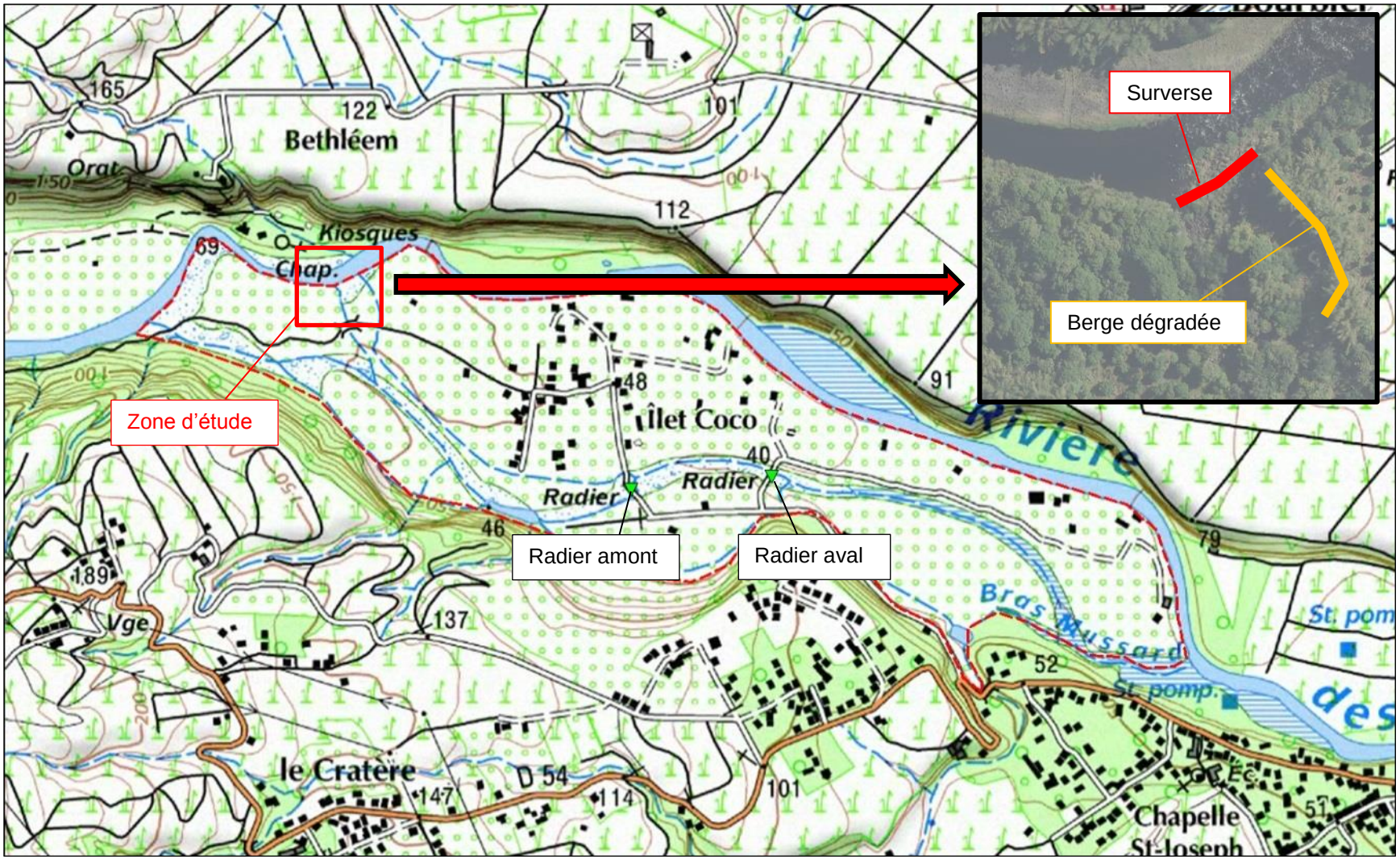


FIG. 1. Localisation de la zone d'étude

2. DONNEES DISPONIBLES

Les principales données exploitées sont listées dans le tableau suivant :

Tabl. 1 - Données disponibles

REF	INTITULE	AUTEUR	MAITRE D'OUVRAGE	DATE
ETUDES ANTERIEURES				
/1/	Etude de définition d'un réseau de repères de crues sur les TRI de la CIREST – Phases 1 et 2	ARTELIA	CIREST	Novembre 2018
/2/	Etude de vulnérabilité complémentaire de l'ilet Danclas – Phase 1 à 4	ARTELIA	Commune de Saint-Benoit	Avril 2017 – Février 2018
/3/	Projet de dispositif d'alerte submersion de radier à l'îlet Coco	DEAL Réunion	Commune de Saint-Benoit	Mai 2016
/4/	Travaux d'urgence pour la remise en état de la berge et protection du passage en radier au niveau de l'îlet Danclas – Mission d'assistance technique	EGIS	Commune de Saint-Benoit	Janvier 2016
/5/	PPRI de la commune de Saint-Benoit – Rapport de Phase 3	ARTELIA	Commune de Saint-Benoit	mai 2015
/6/	Analyse des enjeux et des risques inondations sur l'îlet Danclas	EGIS / SAFEGE / CNR	Commune de Saint-Benoit	Janvier 2013
/7/	Elaboration de courbes de tarage sur des cours d'eau réunionnais	ARTELIA	DEAL	Juillet 2012
/8/	Prestation de maitrise d'œuvre relative à la protection contre les crues de la rivière des Marsouins	EGIS	Commune de Saint-Benoit	Septembre 2009
/9/	Rapports et cartes du TRI de Saint- Benoit	DEAL		
DONNEES PHOTOGRAPHIQUES ET TOPOGRAPHIQUES				
/10/	Levés topographiques du merlon existant et du bras de décharge *	GEO AUTRAL	CIREST	2019
/11/	Levés topographiques du radier existant	GEO AUTRAL	Saint-Benoit	2019
/12/	Levés topographiques des bras d'écoulement et des zones refuges	GUID OI	Saint-Benoit	2018
/13/	Levés terrestres du secteur central de l'ilet		Saint-Benoit	
/14/	Levé LIDAR du secteur d'étude (Litto-3D)	IGN	Saint-Benoit	
/15/	Orthophoto 2018	IGN	Saint-Benoit	2018
/16/	Orthophoto 2012	IGN	Saint-Benoit	2012

(*) Ces levés ont été réalisés spécifiquement dans le cadre de la prestation.

3. CONTEXTE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE

3.1. CONTEXTE HYDROLOGIQUE

3.1.1. Bassin versant

La rivière des Marsouins draine un bassin versant qui s'étend sur le flanc *est* du massif du piton des neiges sur 114 km² à l'embouchure et 82 km² au niveau de l'ilet Danclas (cf localisation sur la figure suivante).

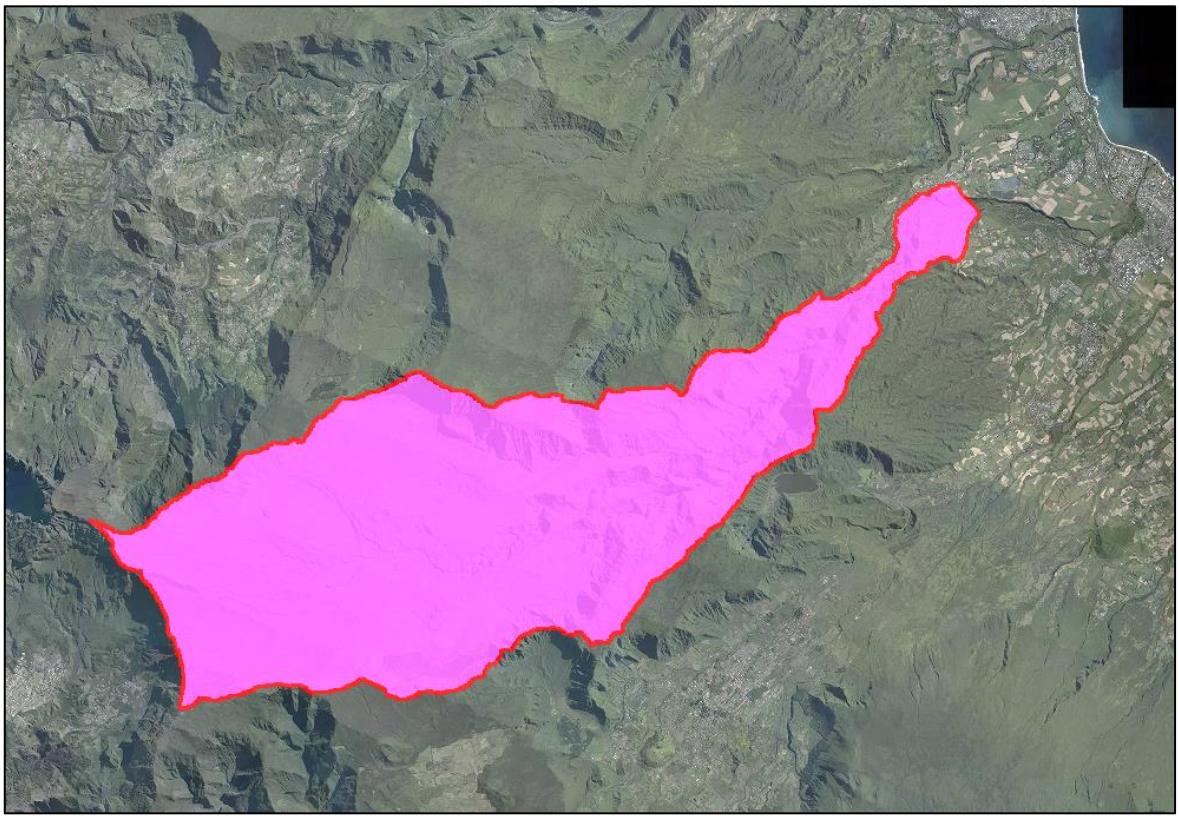


Fig. 2. Bassin versant de la Rivière des Marsouins au droit de l'Ilet Danclas

Les axes d'écoulement principaux qui entaillent le massif sont très encaissés et leurs pentes sont élevées. Au droit du projet, le lit de la Rivière s'élargit, les remparts en rive droite et gauche restent élevés et raides.

Des aménagements hydroélectriques (EDF) sont présents sur ce cours d'eau bien en amont de l'Ilet. Les barrages étant au fil de l'eau" avec une faible capacité de stockage, ils n'ont pas d'impact sur le régime hydrologique de crue en aval.

3.1.2. Débits de pointe

Les valeurs de débit de pointe à l'exutoire et/ou au droit de l'ilet Danclas sont fournies dans les études disponibles.

Le TRI (réf. /9/) indique les débits de pointe suivants à l'exutoire :

- Q_{10} = 1 355 m³/s
- Q_{100} = 2 610 m³/s
- Q_{1000} = 4 700 m³/s

La méthode de calcul n'est pas donnée. Il est précisé que des incertitudes relatives à la période de retour difficiles à caractériser existent, notamment liées à la très forte disparité spatiale de la pluie sur le bassin versant.

Dans son rapport pour l'*Elaboration de courbes de tarage sur des cours d'eau réunionnais (réf. /7/)* pour la DEAL, Artelia propose les débits à la station OLE de Bethléem sur la base de la formule de Myers par rapport aux débits du centre-ville. Cette méthode reste assez approximative, mais elle permet de se baser sur des débits du centre ville qui sont mieux connus. Les débits à Bethléem sont les suivants :

- Q_{10} = 1 060 m³/s
- Q_{100} = 2 040 m³/s

L'étude de vulnérabilité de 2013 (réf. /6/) donne les valeurs de débits et les hydrogrammes de crues au droit de l'ilet danclas issus de l'étude de dangers :

- Q_{10} = 1 200 m³/s
- Q_{50} = 1 800 m³/s
- Q_{100} = 2 350 m³/s
- Q_{1000} = 3 600 m³/s

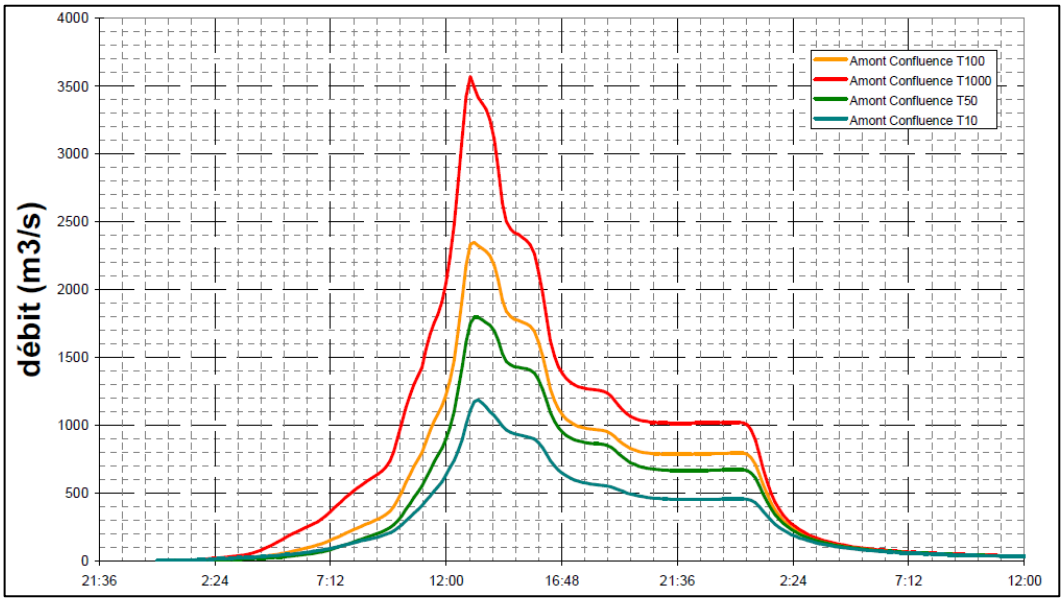


Fig. 3. Hydrogrammes de crues (réf. /6/)

3.1.3. Hypothèse retenue

Il est proposé de se baser sur les hypothèses du précédent modèle (étude de 2013) : Q_{10}, Q_{50} et Q_{100} à Bethléem. Ces hypothèses sont en effet les plus récentes et ont été validées par la DEAL dans le cadre de l'instruction de l'étude de dangers. Elles sont donc considérées comme les données de référence sur ce cours d'eau.

De plus, le fait de disposer des mêmes données hydrologiques permettra également de comparer plus aisément les résultats des 2 modélisations (modélisation de la présente étude et celle de 2013).

Les débits intermédiaires sont calculés sur la base de méthode proposée par le *Guide de gestion des eaux pluviales à la Réunion* édité par la DEAL : ratios permettant de passer du décennal aux autres périodes de retour. Les ratios retenus dans la présente étude sont indiqué dans le tableau suivant.

Les débits de pointe retenus sont donnés dans le tableau suivant.

Tabl. 2 - Débits de pointe retenus pour différentes période de retour

Période de retour	Débit de pointe [m^3/s]	Source
1 an	540	Calcul à partir de Q_{10} : Q_1= 0.45 Q_{10}
2 ans	720	Calcul à partir de Q_{10}: Q_2= 0.6 Q_{10}
3 ans	840	Calcul à partir de Q_{10}: Q_3= 0.7 Q_{10}
5 ans	960	Calcul à partir de Q_{10}: Q_5= 0.8 Q_{10}
10 ans	1 200	Etude de 2013
20 ans	1 440	Calcul à partir de Q_{10}: Q_{20}= 1.2 Q_{10}
50 ans	1 800	Etude de 2013
100 ans	2 350	Etude de 2013

3.1.4. Crues historiques

L'étude sur la *Définition d'un réseau de repères de crues* menée par ARTELIA pour le compte de la CIREST fournit les débits suivants pour les principaux épisodes pluvieux conséquents sur le secteur :

Tabl. 3 - Crues les plus significatives enregistrées entre 1998 et 2018 sur la Rivière des Marsouins avec débits estimés

EVENEMENTS	STATION BETHLEEM	STATION CENTRE VILLE	SOURCE
25 février 1998	730 m^3/s		Etude DIREN réf. /8/
Diwa	654 m^3/s		
Gamède	540 m^3/s		
Dumile (janvier 2013)	460 m^3/s	600 m^3/s	Banque hydro
Felleng (février 2013)	430 m^3/s	560 m^3/s	
Bejisa (janvier 2014)	628 m^3/s	900 m^3/s	
Ava (janvier 2018)	400 m^3/s	560 m^3/s	Vigicrues
Berguitta (janvier 2018)	280 m^3/s	275 m^3/s	
Fakir (avril 2018)		950 m^3/s	

Les documents du TRI annoncent un débit de 1 800 m^3/s lors de Clotilda (1987) dans la Rivière des Marsouins (proche de Q50ans) tandis que la crue liée à Finella (1993) aurait atteint 1 500 m^3/s (~ Q20ans - données OLE).

3.2. ETAT DES LIEUX

3.2.1. Axes d'écoulements

L'ilet est situé entre 2 bras de la Rivière des Marsouins. Les axes d'écoulements principaux au droit de l'ilet sont :

- Le bras principal, en rive gauche, est en eau en permanence ;
- Le bras secondaire, en rive droite, n'est alimenté que lors des épisodes de crue ;
- Un bras de décharge traverse également l'ilet en amont des habitations. Ce bras peut entrainer des débordements vers la piste qui rejoint les habitations ;
- En amont du radier communal, un seuil est présent, il tend à figer le bras en altimétrie.

Photo.-1. Bras principal (au droit de l'Ilet Bethléem)

Photo.-2. Bras principal (au droit du restaurant le Paradisier)

Photo.-3. ***Bras secondaire en amont du radier communal***

Photo.-4. ***Axe d'écoulement tertiaire en parallèle du bras secondaire***

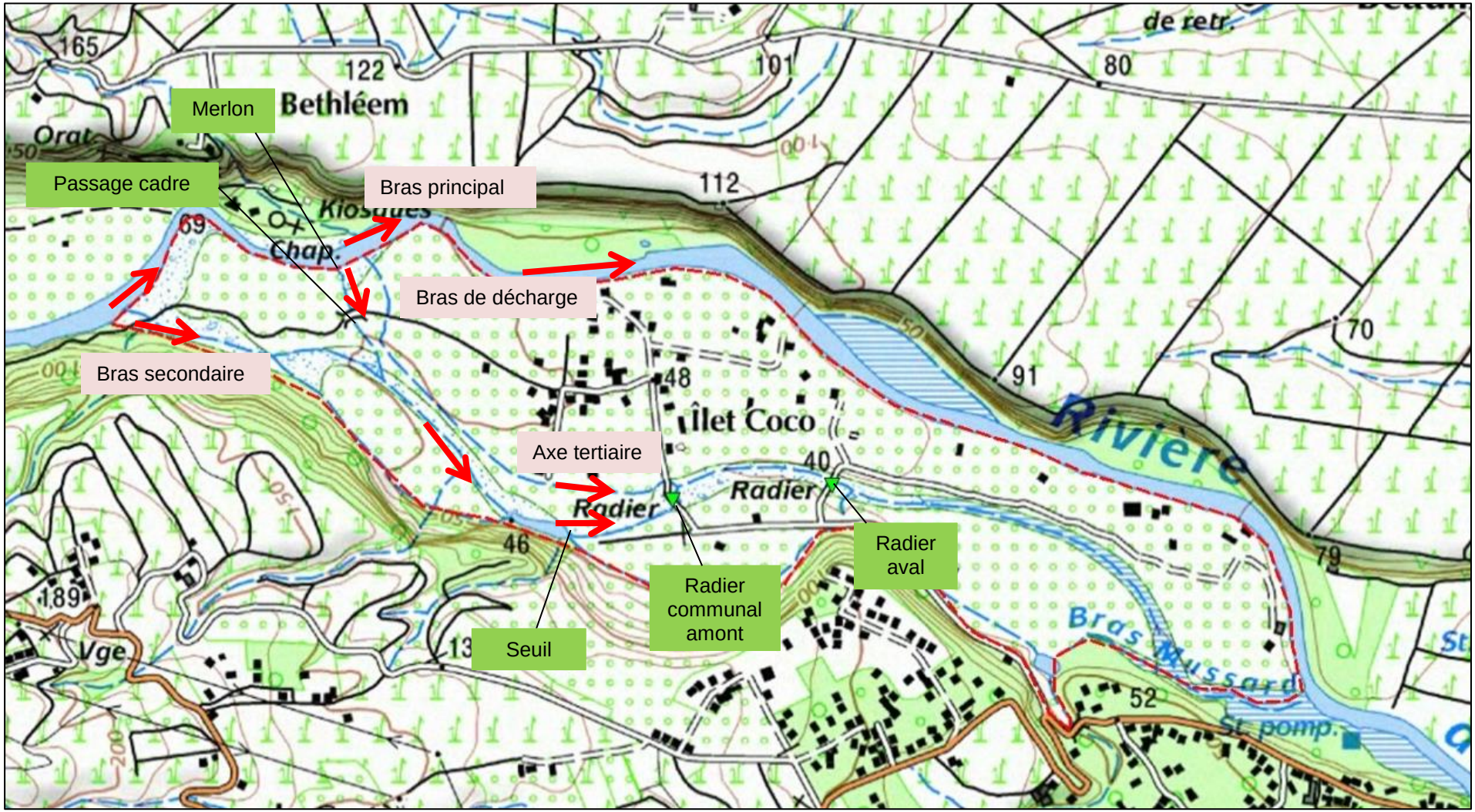


Fig. 4. Fonctionnement hydraulique

3.2.2. Ouvrages hydrauliques

Les ouvrages hydrauliques recensés sur les axes découlements sont les suivants :

- *Merlon de surverse* : ouvrage en enrochements libres dans le prolongement de la berge rive droite du bras principal permettant d'alimenter le bras de décharge. Cet ouvrage n'est pas pérenne, des travaux de réfection avaient été réalisés en 2016, mais l'ouvrage s'est à nouveau désorganisé suite au passage des crues récentes, Fakir notamment en avril 2018. La présente étude porte sur la réfection de cet ouvrage ;

- *Passage cadre* du bras de décharge sous la piste vers le centre de l'ilet : ouvrage en béton surmonté d'une grille « péi », positionné sur l'axe d'écoulement rive droite du bras de décharge ;

- *Seuil* sur le bras secondaire : un seuil en béton situé en amont du radier communal. Il pourrait s'agir d'une ancienne prise d'eau ou d'un ouvrage de stabilisation du lit. Cet ouvrage semble calé au niveau d'équilibre du bras, en particulier, il ne semble pas retenir de matériaux et est visible sur l'ensemble des photos historiques ;

- *Radier amont* : le radier communal amont permet l'accès à la partie amont de l'ilet. Il est constitué de 8 buses DN800 en partie ruinées et obstruées. L'ouvrage est fortement dégradé ;

- *Radier aval* : le radier privé aval permet l'accès à la partie aval de l'ilet. L'ouvrage est également fortement dégradé et obstrué.

Ces ouvrages sont illustrés sur les photographies qui suivent.

Fig. 5. Merlon de surverse vers le bras de décharge (photo 2017)

Photo.-5. Passage cadre sur le bras de décharge

Photo.-6. Radier communal amont

Photo.-7. Radier aval

Photo.-8. ***Seuil sur le bras secondaire***

3.3. FONCTIONNEMENT HYDROGEOMORPHOLOGIQUE

3.3.1. Mécanismes

La Rivière des Marsouins est un des cours d'eau majeurs de l'ile de la Réunion.

Au droit de l'ilet Danclas, le lit est constitué d'alluvions et est donc mobile. Les vitesses élevées de ses écoulements en crue lui confère une forte capacité de transport solide. En particulier, le passage d'une crue peut entrainer des changements considérables de la morphologie du lit, tant en termes de fonds moyen et extrême qu'en termes d'implantation des bras vifs et des profils en travers.

3.3.2. Evolution en plan

3.3.2.1. A L'ECHELLE DE L'ILET

Le lit de la Rivière des Marsouins est plutôt figé au droit de l'ilet coco.

L'analyse des vues aériennes montre une relative stabilité des différents axes d'écoulements : bras principal, bras de décharge, bras secondaire et de leurs berges.

La figure suivante compare les vues aériennes de 1950, 1984 et 2018.

On constate notamment sur la photo aérienne de 1950 la création récente du bras de décharge (chenal rectiligne).

Les symboles localisent :

- Les axes découlements
- Les radiers
- Le seuil transversal en mont du radier communal

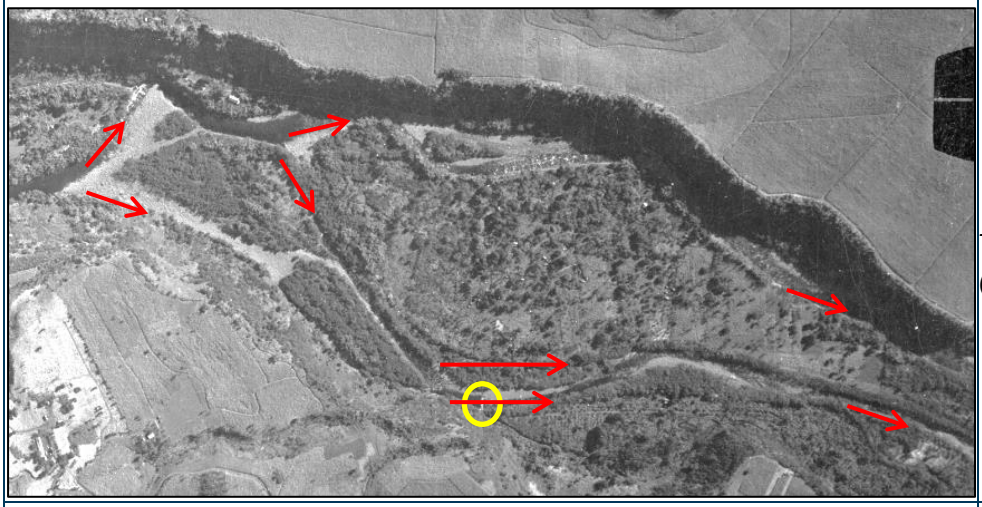
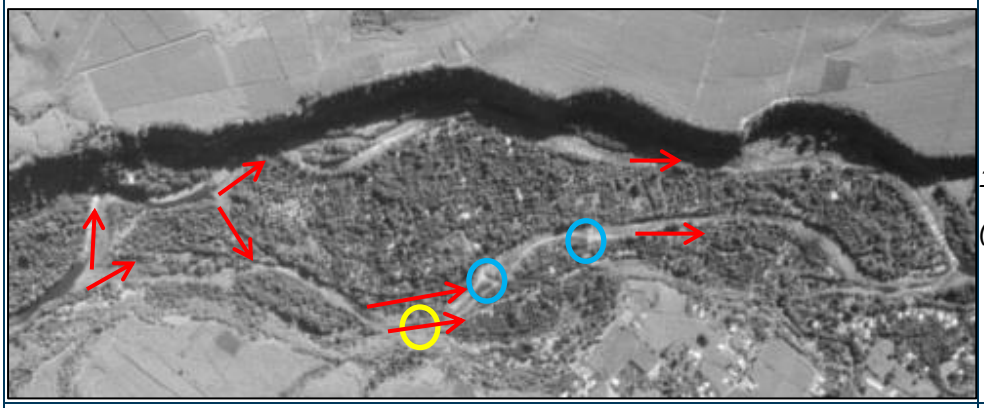
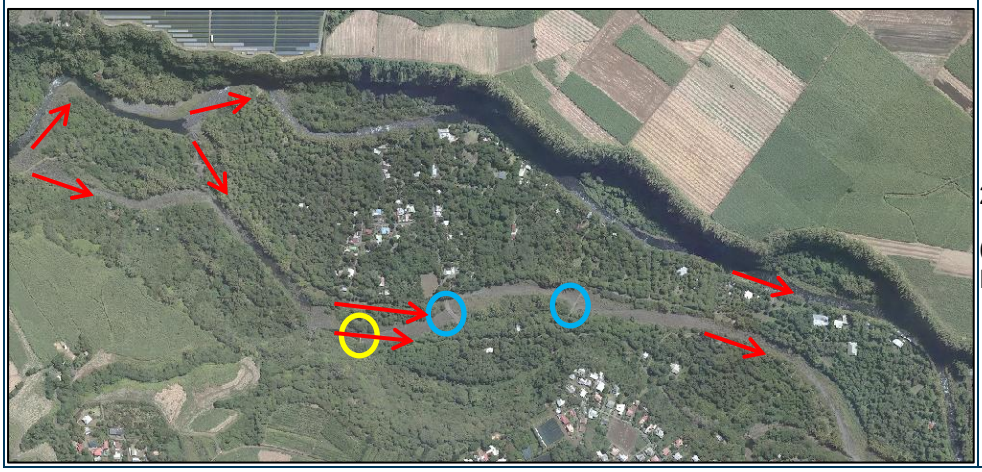
	*1950* *(Géoportail)*
	*1984* *(Géoportail)*
	2018 (Orthophoto IGN)

Fig. 6. Comparaison des vues aériennes historiques

3.3.2.2. AU DROIT DE LA ZONE D'ETUDE

Au niveau de la zone d'étude, un basculement du bras principal plus en rive droite a été évoqué par des riverains.

L'étude des photographies aériennes de 2008, 2011 et 2014 (Fig. 7 et Fig. 8) amène les observations suivantes :

- Il existe une plage de dépôt au niveau du site de l'ilet Bethléem, elle correspond à l'intrados du bras vif principal ;
- Le bras vif principal longe l'ilet Coco, la prise d'eau vers le bras de décharge est située dans l'extrados du bras vif principal, cette position entraine un rognage des berges de l'ilet Coco sur le secteur amont et une surverse vers le bras de décharge fréquente et importante.
- La configuration est identique sur les 3 années d'observation (2008, 2011 et 2014).

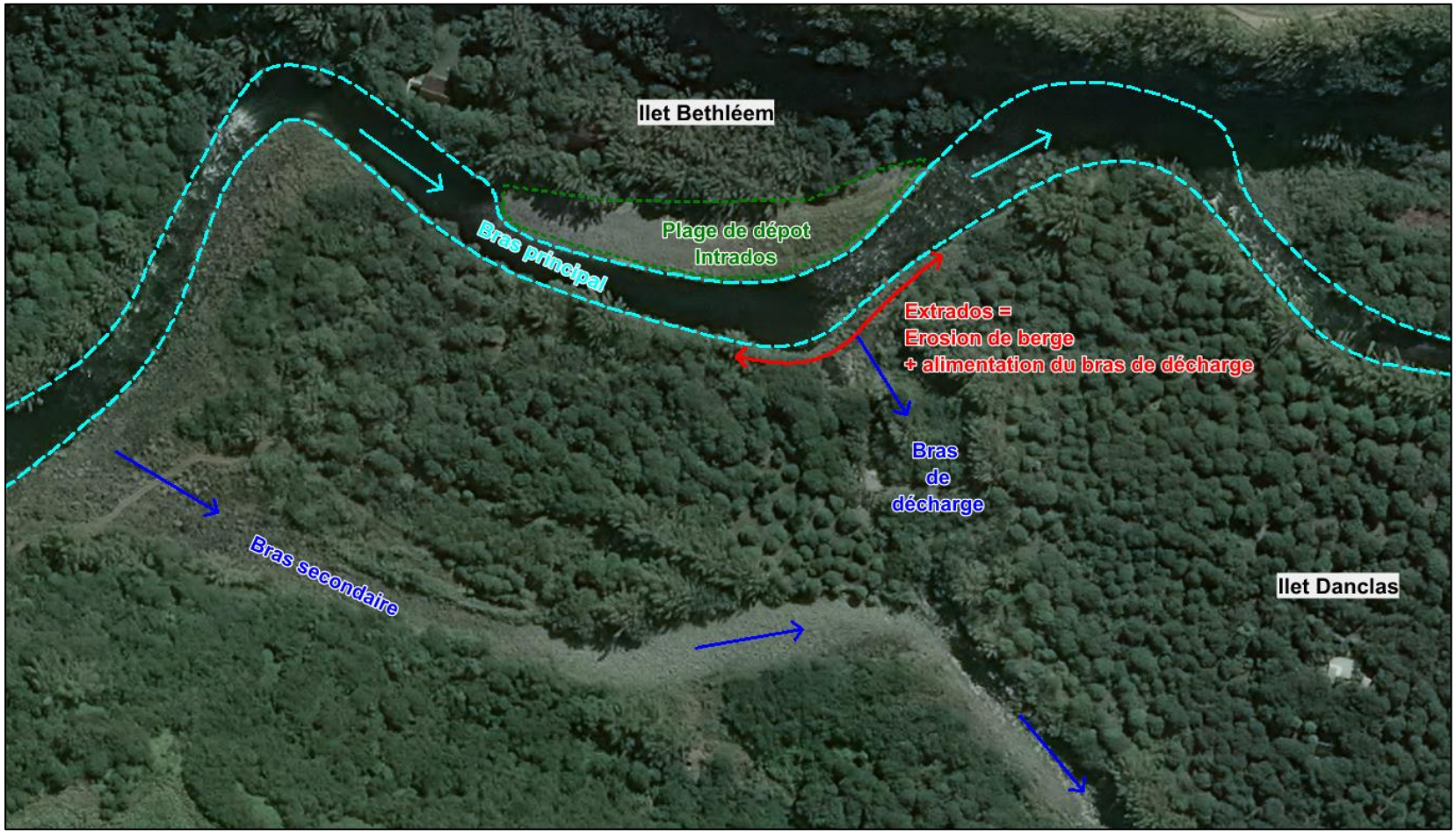


Fig. 7. Fonctionnement hydraulique de la Rivière des Marsouins au droit de la zone d'étude (Orthophoto 2008)

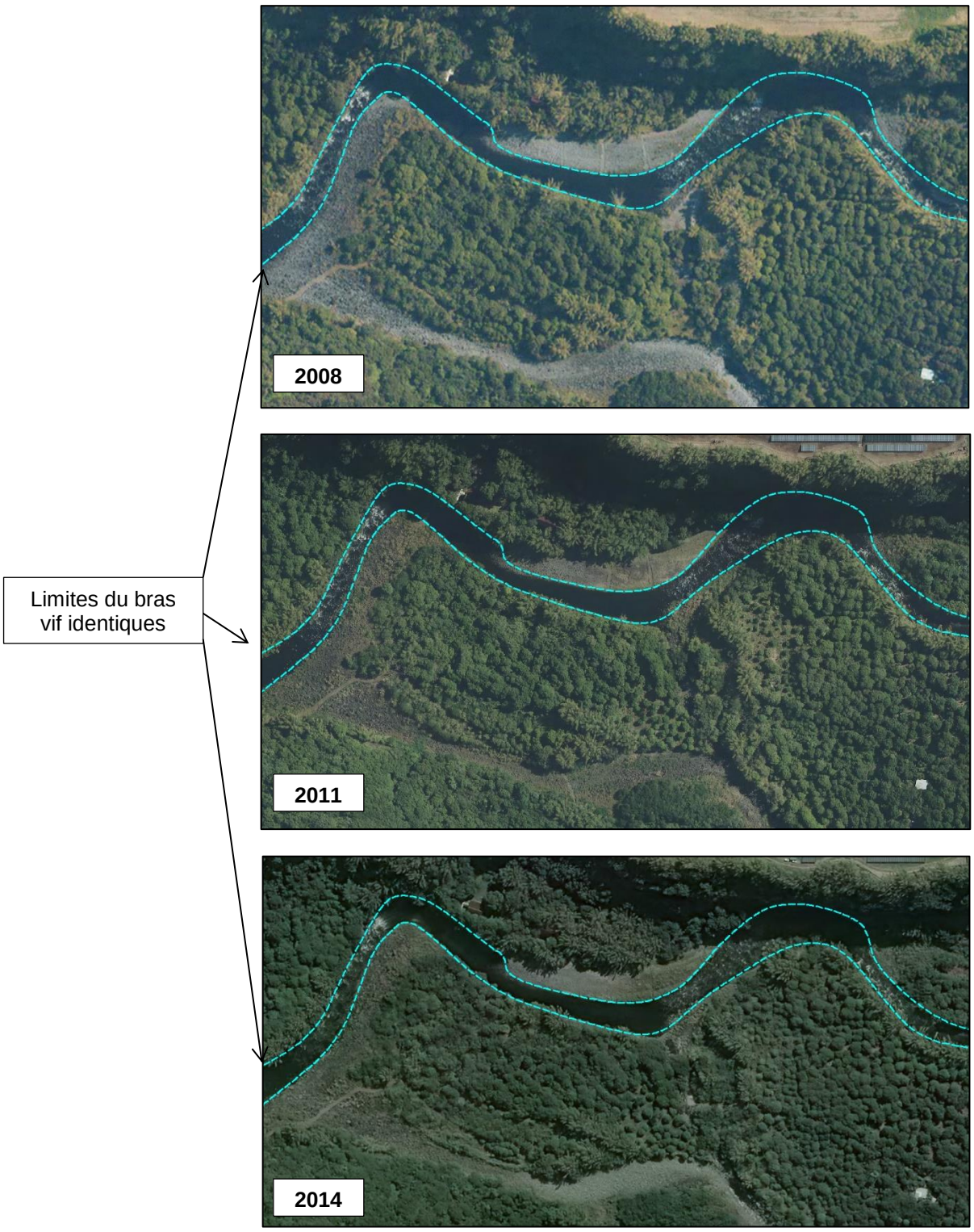


Fig. 8. Evolution de la Rivière des Marsouins au droit de la zone d'étude (2008 – 2011 – 2014)

L'observation des vues aériennes plus anciennes issues de Géoportail (1949 à 1997) indique :

- L'existence d'une plage de dépôt historique, depuis 1949, au droit de l'ilet Bethléem (en pointillés rouge) d'extension plus réduite en 1949 qu'aujourd'hui et s'étendant avec le temps
- L'existence d'une plage de dépôt historique contre l'ilet Danclas en aval du bras de décharge (en pointillés orange) qui s'est vue rognée au fil des ans.

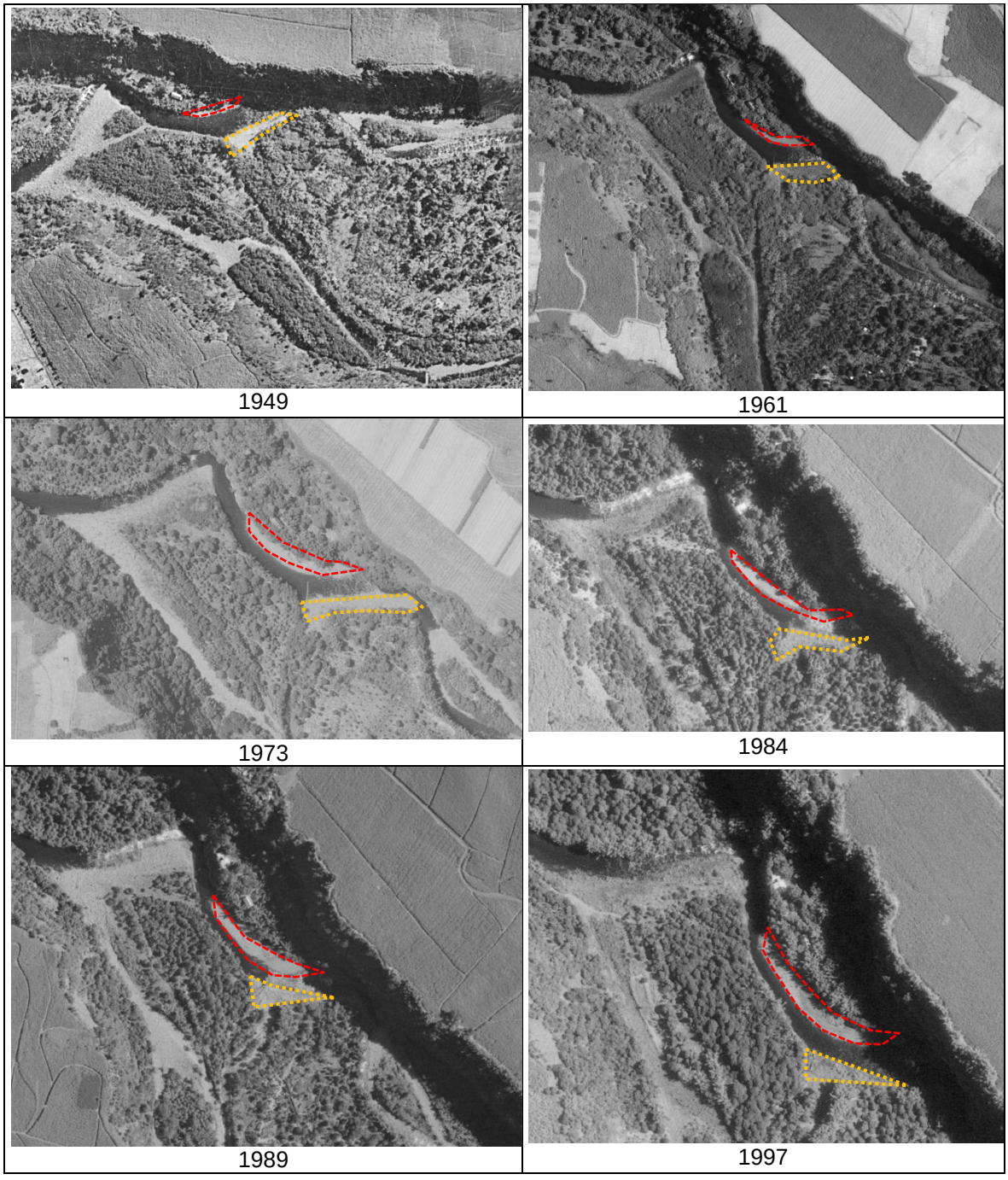


Fig. 9. Evolution de la Rivière des Marsouins au droit de la zone d'étude (1949 – 1997)

3.3.3. Evolution en altimétrie

L'analyse de l'évolution des fonds est issue de l'analyse menée pour la modélisation hydraulique 2D du cours d'eau, pour la commune de Saint-Benoit (ARTELIA 2019).

Les figures suivantes présentent la différence entre la topographie du modèle de 2013 et la topographie du modèle 2019 (ARTELIA) issue de l'exploitation des levés géomètres 2018 et de la LITTO3D. Elle illustre bien l'évolution des différents bras d'écoulement.

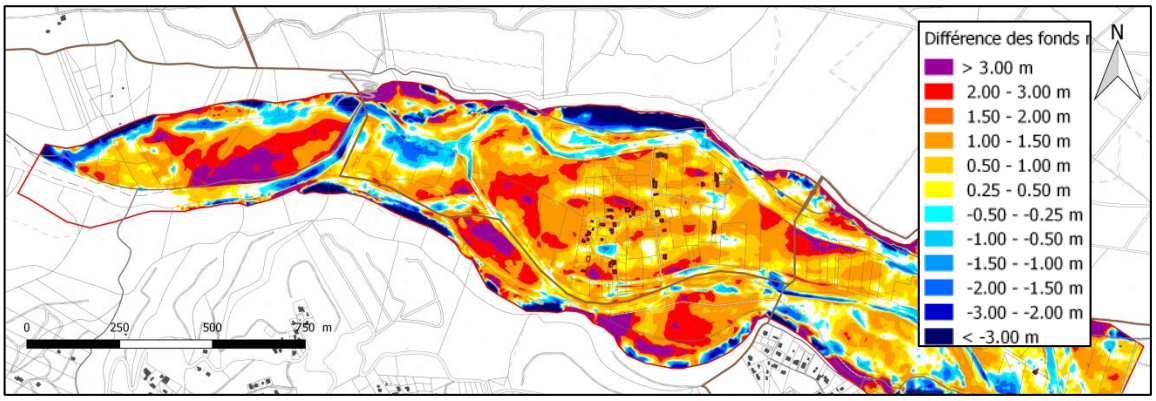


Fig. 10. Différence des fonds modélisés (2019 / 2013)

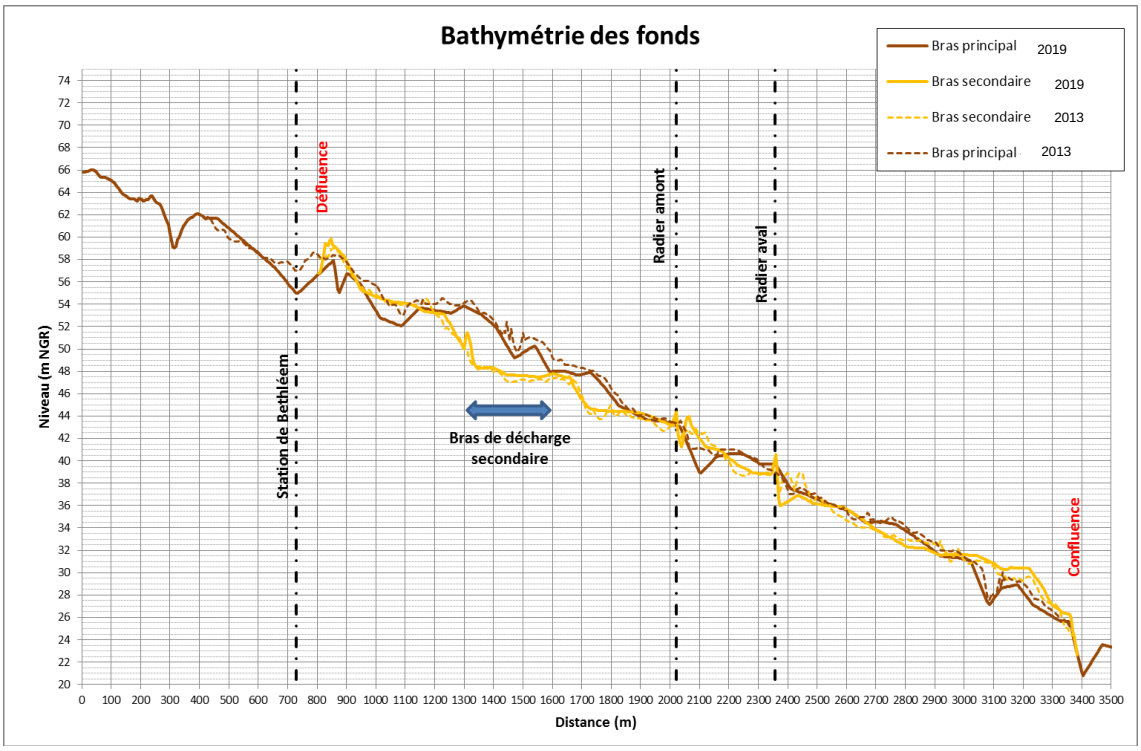


Fig. 11. Profils en long des fonds extrêmes de la rivière des Marsouins

Les observations sont les suivantes :

- Ces graphiques montrent la cohérence globale des données exploitées dans le cadre de ces deux études, mais des disparités locales sur l'ensemble de la zone d'étude.
- Sur le bras principal, la représentation de la topographie de 2019 est supérieure à celle de 2013. Des variations jusqu'à 1 m sont observées. Elles peuvent être dues :
    - à l'imprécision des mesures (voir ci-dessous),
    - ou à un approfondissement généralisé du lit pouvant traduire
        - un déficit de transport solide,
        - un phénomène d'érosion régressive : peu probable au vu du peu de facteurs générateurs de déséquilibre (pas d'anthropisation du lit sur le secteur, pas d'extraction de matériaux dans le lit…),
        - une modification des conditions d'écoulement liées à la variation du seuil, à de l'alimentation du bras de décharge ou de l'extension de la plage au droit de l'ilet Bethléem qui peut avoir comme conséquence une réduction de la section transversale et un approfondissement du lit mineur.

  Sur ce bras, la poursuite d'un approfondissement du lit ne peut être exclue, mais il restera d'ampleur modéré au vu du peu de facteurs générateurs de déséquilibre (hors phénomènes localisés).
- Sur le bras de décharge et le bras secondaire, la représentation de la topographie de 2019 est inférieure à celle de 2013. Les variations sont de l'ordre de 50 cm au maximum. Elles peuvent être dues :
    - à l'imprécision des mesures (voir ci-dessous),
    - ou à une recharge du lit pouvant traduire
        - un excès de transport solide,
        - une modification des conditions d'écoulement liées à la variation du seuil et de l'alimentation du bras de décharge.

  Sur ce bras, la poursuite d'une rehausse du lit ne peut être exclue, mais elle restera d'ampleur modérée au vu du peu de facteurs générateurs de déséquilibre (hors phénomènes localisés).
- Au droit de la zone d'étude, l'approfondissement entre 2013 et 2019 est plus franche sur cette zone et semble confirmer la sollicitation du merlon lors des dernières crues, avec un déplacement progressif du bras d'écoulement contre l'ouvrage et un affouillement qui s'effectue en crue en pied d'ouvrage.

  Sur ce secteur, l'ouvrage étant situé dans l'extrados, des affouillements se produisent à chaque crue et peuvent en partie être comblés lors des décrues.

Remarque sur la précision des levés : Les différences observées peuvent être relativisées avec l'imprécision de la topographie. En effet, la topographie du modèle de 2013 est obtenue à partir d'un LIDAR (litto3D) donc sur une grande zone avec comme contrainte une densité de points. Avec cette méthode, le fond extrême n'est pas nécessairement levé, et l'incertitude du levé est de +-20 cm en altimétrie et +/- 50 cm en planimétrie.

A l'inverse, la topographie du modèle de 2019 est issue de profils levés directement sur site. Le géomètre procède généralement au levé du point le plus bas sur chaque section.

Par ailleurs, le lit étant constitué de gros blocs, des différences de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres sur le levé topographique est possible, en fonction d'où la mesure est prise (sur ou sous un bloc).

3.4. CONDITIONS D'ECOULEMENT

3.4.1. Données exploitées

Deux modélisations 2D de la rivière sont disponibles :

- Le modèle ARTELIA 2019 réalisé pour la commune de Saint-Benoit ;
- Le modèle EGIS 2013 réalisé pour la commune de Saint-Benoit.

L'analyse de ces modèles permet d'appréhender le fonctionnement hydraulique et la répartition des écoulements entre les différents bras.

3.4.2. Présentation du modèle 2019

La présentation du modèle de 2019 est issue du rapport d'Etude hydraulique pour la réfection du radier d'accès à l'ilet Danclas (ARTELIA pour la commune de Saint-Benoit, juin 2019)

3.4.2.1. LOGICIEL

L'étude hydraulique a été réalisée au moyen d'une modélisation mathématique des écoulements. Un modèle numérique bidimensionnel des écoulements a été construit à l'aide du système logiciel TELEMAC, système de modélisation développé conjointement par EDF/DER et ARTELIA.

La force de l'approche bidimensionnelle réside dans une représentation fine et réaliste du terrain naturel par le modèle numérique de terrain associé au maillage de la zone d'étude. Cette approche permet un découpage de la topographie et donc la prise en compte des géométries complexes.

Sur ce maillage, le logiciel TELEMAC résout les équations bidimensionnelles régissant la dynamique des écoulements. Il calcule donc, en tout point de la zone d'étude, le niveau d'eau et la vitesse d'écoulement. Pour cette variable, le calcul restitue à la fois l'intensité et la direction du courant.

3.4.2.2. EMPRISE MODELISEE

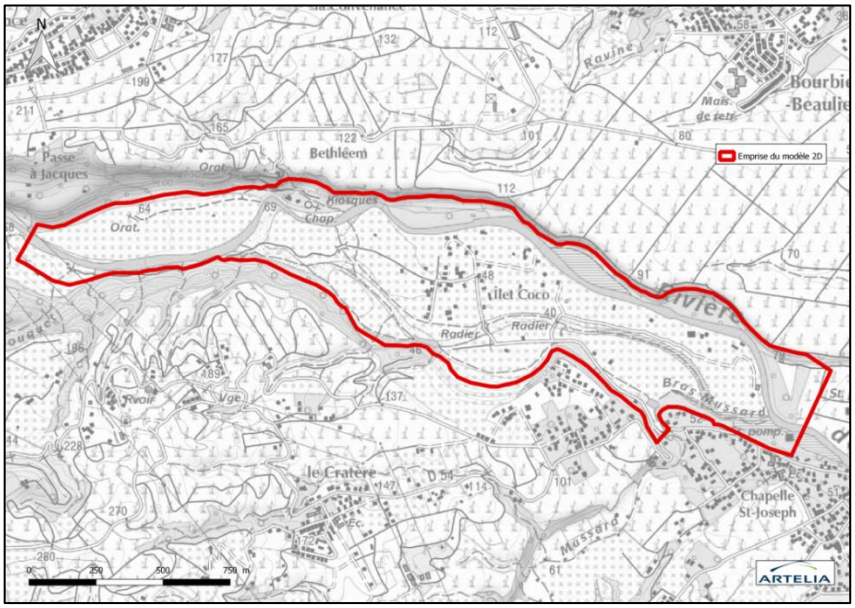
La figure ci-après présente l'emprise retenue pour le modèle hydrodynamique mis en œuvre dans le cadre de l'étude. Cette emprise intègre l'ensemble de la zone d'étude.

La limite amont est placée en amont de la station de mesure de la DEAL (Bethléem), sur une portion de rivière rectiligne et sans bras actif,

La limite aval se situe au niveau de la station de pompage, à l'aval de la confluence des bras principal et secondaire de la rivière des Marsouins.

Les limites latérales de l'outil ont été placées sur des hauteurs, à des altimétries bien supérieures aux cotes d'inondations maximales pouvant être observées : l'intégralité de l'emprise inondable pour l'ensemble des conditions hydrologiques étudiées ici est incluse dans l'emprise du modèle mis en œuvre.

Au final, l'emprise modélisée s'étend sur près de 3 500 m de linéaire, et présente une largeur variant de 250 m à l'amont à près de 600 m au niveau de l'îlet Danclas.



3.4.2.3. HYPOTHESES

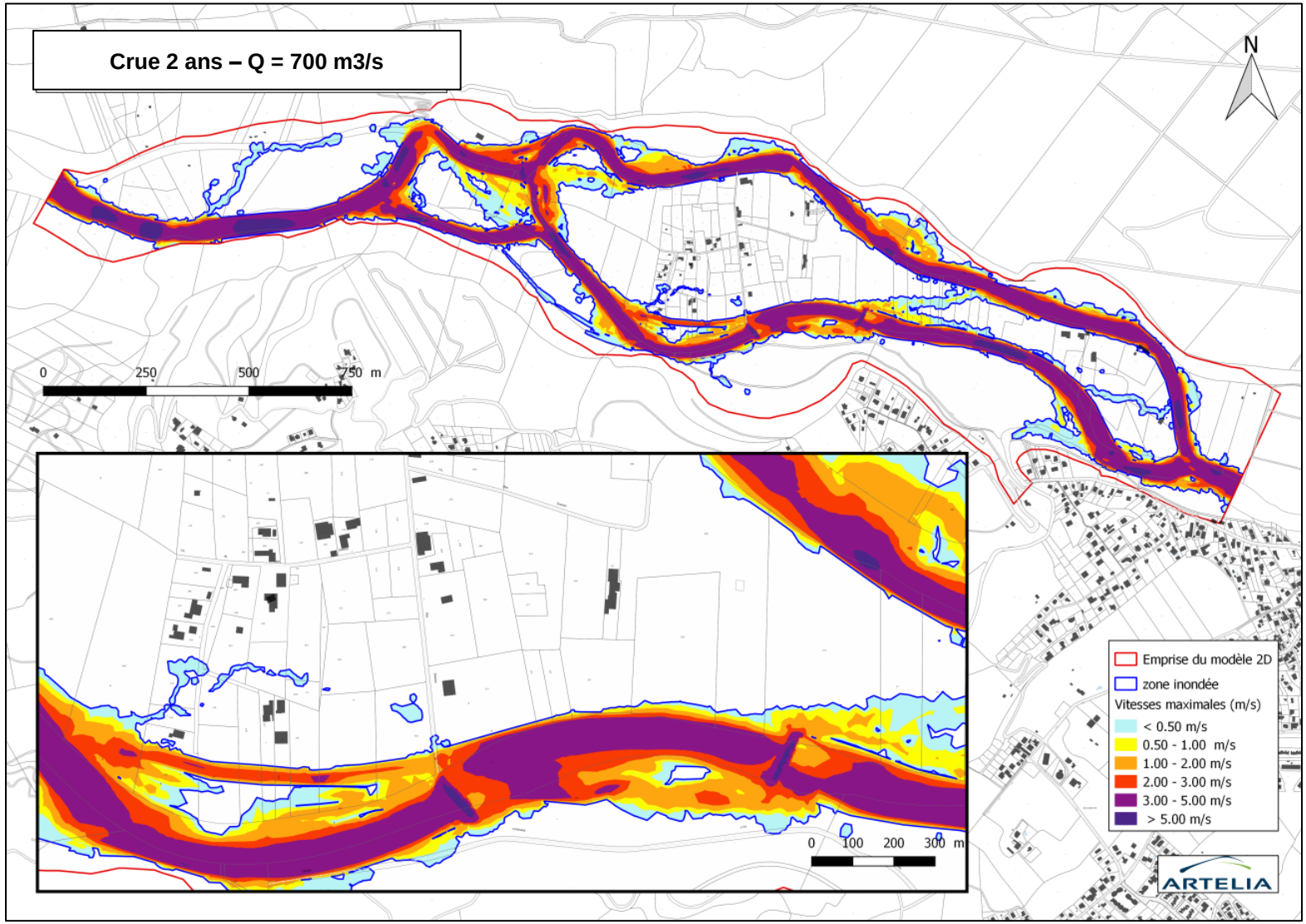
La modélisation mise en œuvre considère les hypothèses suivantes :

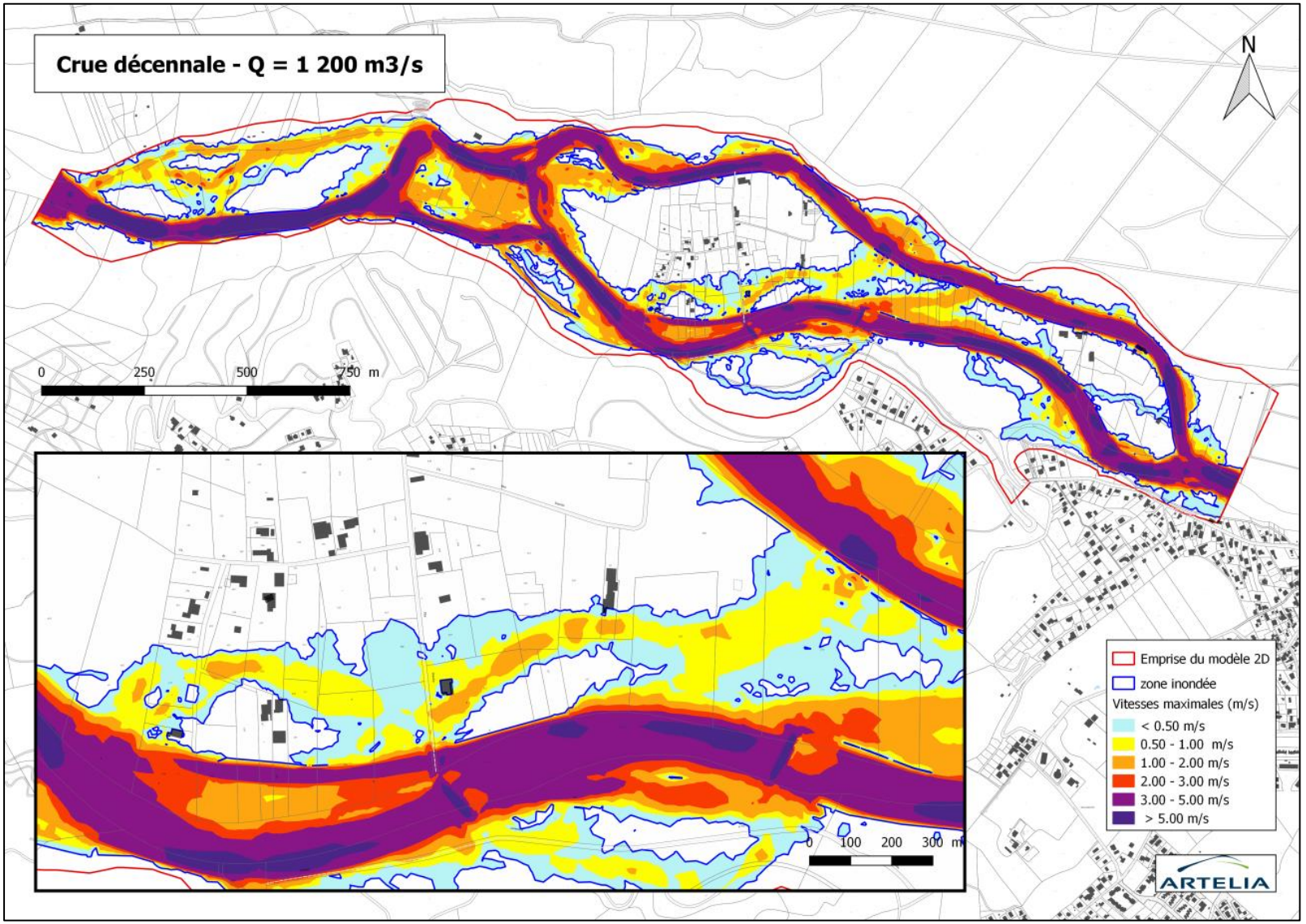
- les principaux bâtiments présents sur l'îlet ont été représentés dans l'outil de modélisation comme des obstacles aux écoulements.
- les calculs sont effectués en régime transitoire : les débits injectés en amont du modèle évoluent au cours du temps ;
- les limites latérales du modèle sont représentées par des parois imperméables, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de débordement possible au-delà de ces frontières quel que soit l'événement considéré ;
- il n'est pas considéré d'apport de débit en dehors de celui injecté en amont du modèle. Les apports latéraux du bassin versant au niveau de la zone modélisée sont donc considérés comme nuls, ainsi que les apports pluviométriques dans l'emprise de la zone modélisée, pouvant conduire localement à des inondations par ruissellement ;
- à la limite aval du modèle, le niveau d'eau est imposé via une loi de tarage. La limite aval est définie de telle sorte qu'elle n'influence pas les calculs sur les zones d'intérêt. ;
- le lit majeur est représenté en utilisant un maillage adapté à la structure du terrain et en projetant dessus les données altimétriques disponibles ;
- les apports du Bras Mussard ne sont pas intégrés dans le modèle car ils se situent au niveau du bras secondaire, en aval du second radier, à plus de 1.5 km de la zone de projet, avec un débit Q100 relativement faible (15%) par rapport au débit de la Rivière des Marsouins au droit de la zone de projet. Son influence est donc nulle.

3.4.3. Niveaux d'eau et vitesses

L'analyse de la modélisation hydraulique 2D menée dans l'étude pour la réfection du radier pour la Commune de Saint-Benoit (ARTELIA 2019) indique les niveaux d'eau et vitesses dans l'extrados du coude au droit du merlon.

Les figures ci-dessous présentent les vitesses maximum sur différentes simulations.


Crue 2 ans – Q = 700 m3/s
N
0
250
500
750 m
0
100
200
300 m
Emprise du modèle 2D
zone inondée
Vitesses maximales (m/s)
< 0.50 m/s
0.50 - 1.00 m/s
1.00 - 2.00 m/s
2.00 - 3.00 m/s
3.00 - 5.00 m/s
> 5.00 m/s
ARTELIA


Crue décennale - Q = 1 200 m3/s
N
0
250
500
750 m
0
100
200
300 m
Emprise du modèle 2D
zone inondée
Vitesses maximales (m/s)
< 0.50 m/s
0.50 - 1.00 m/s
1.00 - 2.00 m/s
2.00 - 3.00 m/s
3.00 - 5.00 m/s
> 5.00 m/s
ARTELIA

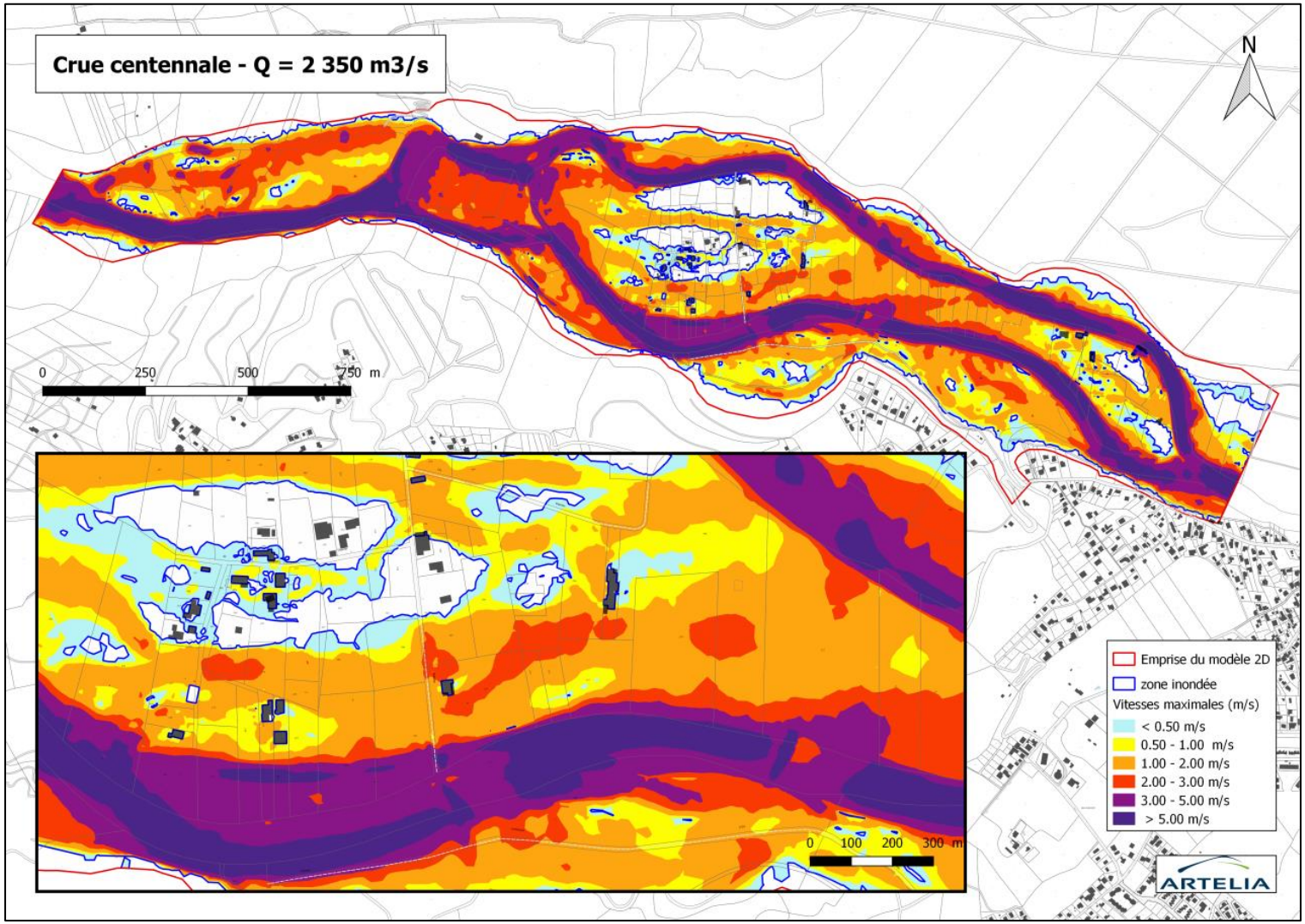


Fig. 12. Vitesses maximales issues des modélisations

Les tailles de blocs charriés correspondant calculés selon la formule d'Isbach sont également précisées.

Tabl. 4 - Caractéristiques de l'écoulement au droit du merlon dans le bras principal

Débit amont [m³/s]	Hauteurs d'eau [m NGR]	Vitesses (RD à RG) [m/s]	Taille des blocs charriés selon Isbach [mm]	
fruit du parement :			*2H/1V*	*3H/1V*
2350 m³/s T = 100 ans	62.7 m NGR	4 à 6 m/s localement > 6 m/s	1.2 m*	1.0 m*
1200 m³/s T = 10 ans	62.1 m NGR	3 à 5 m/s localement > 5m		
1000 m³/s T = 5 ans	62.0 m NGR	3 à 5 m/s		
850 m³/s T = 3 ans	61.8 m NGR	2 à 4 m/s		
700 m³/s T = 2 ans	61.4 m NGR	2 à 4 m/s		

(*) calculs menés pour 5 m/s

Les vitesses sont plus élevées sur la partie amont du merlon qui constitue la zone d'extrados où les eaux s'écoulent contre la berge.

Remarque : cette différence de vitesse entre les 2 rives n'est pas génératrice d'un gradient de transport solide et n'influence pas le profil en long du cours d'eau.

3.4.4. Répartition des débits

L'analyse de la modélisation hydraulique 2D menée dans l'étude pour la réfection du radier pour la Commune de Saint-Benoit (ARTELIA 2019) indique la répartition des débits dans les différents bras de la rivière des Marsouins pour les différentes crues modélisées.

Cette répartition est illustrée sur la figure suivante et le tableau qui suit.

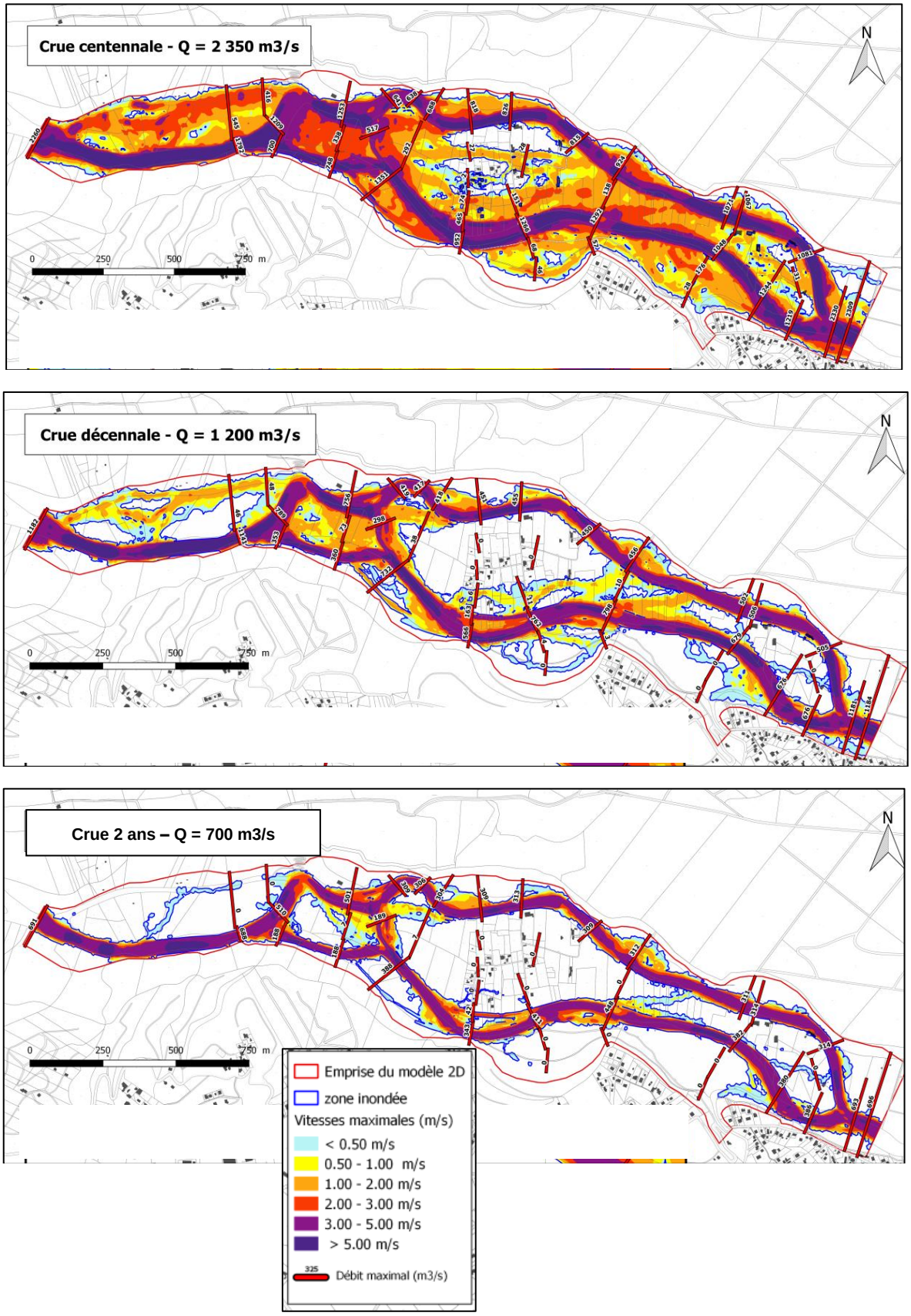


Fig. 13. Débits maximaux – Crue centennale, décennale et 700m³/s

Tabl. 5 - Répartition des débits [m³/s]

Débit amont	Temps Retour	Bras principal amont		Bras secondaire amont		Bras décharge		Bras principal aval		Bras secondaire aval	
2350	100	1209	51%	700	30%	517	22%	1081	46%	1219	52%
1200	10	789	66%	353	29%	298	25%	505	42%	676	56%
1000	5	687	69%	295	30%	252	25%	408	41%	572	57%
850	3	599	70%	245	29%	223	26%	359	42%	483	57%
700	2	510	73%	188	27%	189	27%	311	44%	382	55%

Les pourcentages indiqués dans le tableau sont calculés par rapport au débit amont. Le débit amont ayant été entré sous forme d'un hydrogramme (débit variable dans le temps), ces débits maximum n'interviennent pas au même moment sur les différentes sections.

Dans ce contexte, les écarts de quelques pourcent entre les différents bras traduisent un comportement hydraulique légèrement différent entre la montée des eaux et la décrue liés au ouvrages de surverse qui se comportent différemment et aux débordements en rive.

Il ressort de l'analyse de ces éléments la très forte participation du bras secondaire à l'évacuation des débits de crues pour les évènements les plus conséquents, notamment à l'aval de l'ilet ou plus de la moitié du débit transite par le bras secondaire.

L'analyse des débits de début d'alimentation des bras secondaire et de décharge donne les éléments suivants :

- Début d'alimentation du bras secondaire : environ 100 m³/s ;
- Début d'alimentation du bras de décharge : environ 25 m³/s ;
- Lors que le bras secondaire se met en eau, on a déjà environ 30 m³/s qui passe dans le bras de décharge.

3.4.5. Débordements – hauteurs d'eau

Les 2 figures en pages suivantes décrivent les hauteurs d'eau dans les bras d'écoulement et les hauteurs d'eau débordées sur l'ilet, issues du modèle de 2019 (ARTELIA).

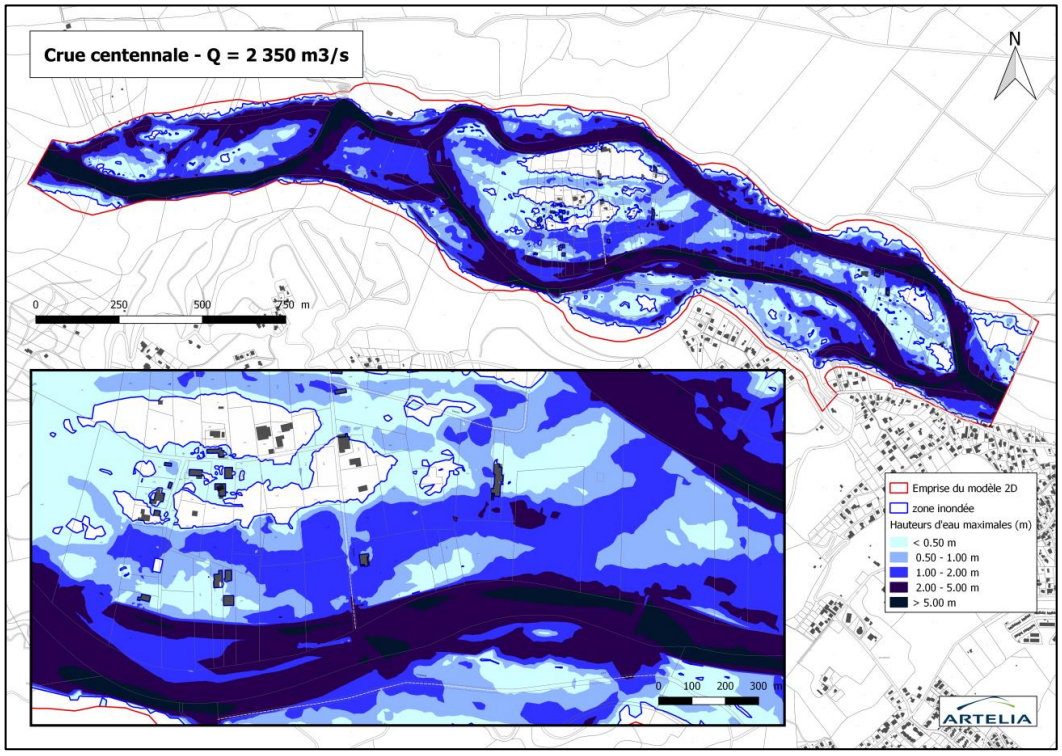


Fig. 14. Hauteurs d'eau maximales – Crue centennale (modèle 2D 2019)

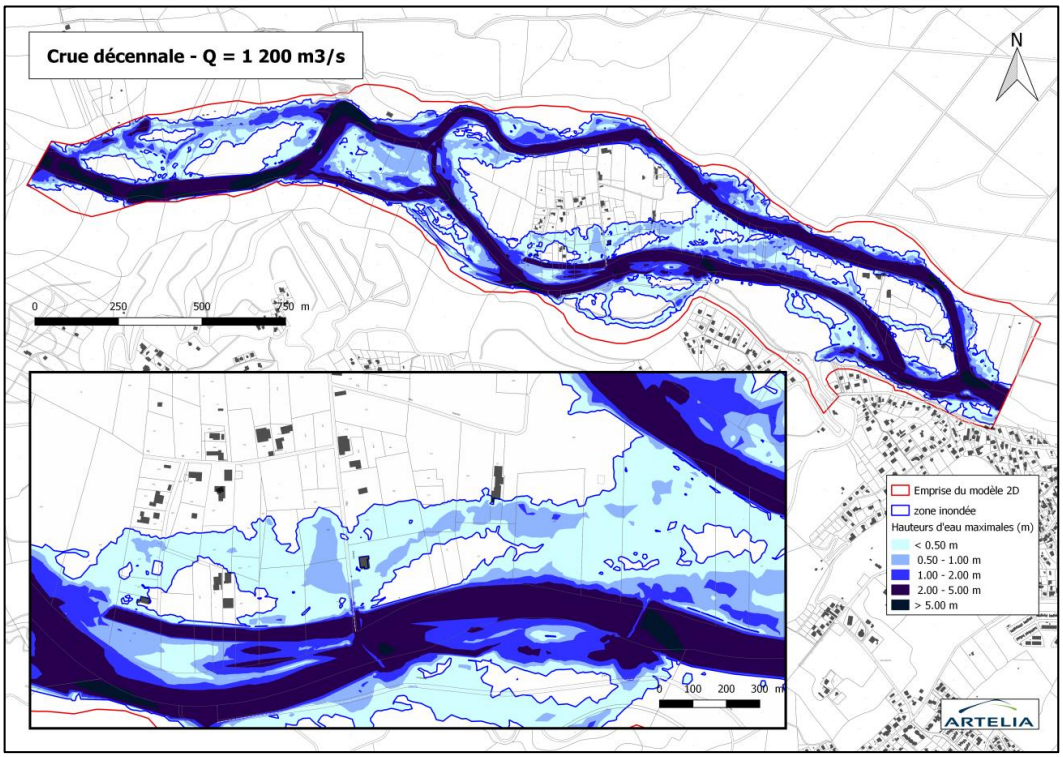


Fig. 15. Hauteurs d'eau maximales – Crue décennale (modèle 2D 2019)

4. REFECTION DU MERLON

L'objectif principal de cet aménagement est de retarder les écoulements au droit de l'ilet Coco, afin de protéger la population et de favoriser l'évacuation des habitants vers des zones sécurisées.

Ainsi, cet aménagement devra diminuer la fréquence d'alimentation du bras de décharge et réduire les débits y transitant, afin de diminuer les débordements vers l'ilet via la piste sur le bras de décharge.

En concertation avec la maitrise d'ouvrage, il est proposé 2 scénarios d'aménagements :

- *Scénario 1* : Reprise de la surverse avec un fonctionnement identique à celui de 2016 + protection de la berge rive gauche ;
- *Scénario 2* : Abandon de la zone de surverse préférentielle et calage de la crête de l'ouvrage en alignement avec le TN situé en amont et en aval de la protection + protection de la berge rive gauche.

4.1. DESCRIPTION DE LA SOLUTION 1

Il s'agit de reprendre la surverse pour lui rendre un fonctionnement identique à celui de 2016 et de mettre en œuvre une protection de la berge rive gauche du bras de décharge.

4.1.1. Merlon longitudinal

Le merlon sera mis en œuvre dans le prolongement de la berge existante en rive droite du bras principal. Il présentera 3 sections :

- Une section de 5 ml dont la crête sera calée à 56 m NGR sur sa partie amont,
- Une section de 10 m de long dont la crête sera calée à 55,5 m NGR, il s'agira de la partie déversante pour les plus petites crues,
- Une section de 15 ml de long dont la crête s'élèvera progressivement de 56 à 57 m NGR au niveau de la berge RG du bras de décharge.

Ces ouvrages seront constitués en surface d'enrochements libres. Il est proposé 2 niveaux de protections :

- *Dimensionnement pour 4 m/s* : enrochements libres 800/1000 mm permettant à l'ouvrage de résister à des vitesses de l'ordre de 4 m/s qui sont atteintes localement dès les petites crues (cf chapitre 4.3) ;
- *Dimensionnement pour 5 m/s* : 1100/1900 mm, permettant à l'ouvrage de résister à des vitesses de l'ordre de 5 m/s, et donc à des crues plus élevées (cf chapitre 4.3).

Avec la blocométrie proposée (800/1000 ou 1100/1900 mm), l'agencement des blocs devra être particulièrement soigné pour respecter le calage de la crête de l'ouvrage. Une irrégularité de la ligne de crête sera acceptée mais le delta altimétrique de 50 cm pourra et devra être respecté.

Les talus coté bras principal présenteront des fruits de 2h/1V. Les talus coté bras de décharge présenteront des fruits de 4h/1V.

Coté amont, ils seront prolongés en pied par une semelle en enrochements libres d'épaisseur 1.5m et de longueur 2 m, reposant, si nécessaire, sur une couche filtre pour éviter le départ des fines au

travers des gros blocs et la déstabilisation du massif. La couche filtre constitue une alternative au géotextile anticontaminant et qui présente l'avantage de ne pas polluer en cas de déstabilisation de l'ouvrage.

Les couches filtres consistent à disposer des couches de blocs de granulométrie croissante. Le dimensionnement repose sur les règles de Terzaghi :

$$\begin{array}{|l} D_{15}/d_{85} < 5 \\ 5 < D_{15}/d_{15} < 25.ou.40 \\ D_{50}/d_{50} < 25.ou.40 \end{array}$$ Où :

- D : diamètre des grains de la couche supérieure (carapace, transition)
- d : diamètre des grains de la couche inférieure (base, transition).

Coté aval, le merlon sera prolongé par un bassin de dissipation au pied de la section déversante. Il sera constitué d'enrochements libres reposant sur des couches filtres sur une longueur égale à la longueur du ressaut.

L'estimation de la longueur du ressaut repose sur la différence des niveaux d'eau en amont et en aval de l'ouvrage Δh :

Longueur du ressaut =5 à 6 Δh

Les différences de niveaux sont estimées sur la base des modélisations hydrauliques. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tabl. 6 - Longueur du ressaut sur le merlon longitudinal

cas	débit	Hamont	Haval	Δh	longueur du ressaut	
		m NGR	*m NGR*	*m*	5 *Δh *m*	6 *Δh *m*
scénario 1	Q10	57.4	55.6	1.8	9	10.8
scénario 1	Q100	58	56.2	1.8	9	10.8

Une longueur de bassin de 10 m est retenue au stade actuel des études. Ce point pourra être affiné avec l'analyse de la localisation du ressaut.

La mise en œuvre du merlon longitudinal nécessitera la réalisation d'une zone de travaux dans le bras principal de la Rivière des Marsouins permettant de :

- limiter les vitesses d'écoulement afin de faciliter la mise en œuvre des blocs de la semelle
- décanter les eaux afin de limiter le taux de MES

Il s'agira d'un cordon d'enrochements libres disposé 2 m devant le pied de l'ouvrage. Des pêches électriques de sauvegarde seront nécessaires à sa mise en place et à sa dépose. Elles seront réalisées par la fédération de pêche.

Photo.-9. Exemple de cordon d'enrochement pour travaux sur la Grande Rivière Saint-Jean (travaux 2018)

4.1.2. Merlon transversal

Un merlon central, positionné dans le prolongement de la terrasse du bras de décharge, permettra aux écoulements déversés d'évoluer dans la partie *est* de ce bras. La crête de ce merlon sera calée à 56 m NGR.

Il présentera une longueur de 20 ml, des fruits amont et aval de 3H/2V, une largeur en crête de 2 m et reposera coté est sur le bassin de dissipation et côté *ouest*, sur une semelle de 2 m de long reposant, si besoin, sur une couche filtre.

4.1.3. Protection des berges du bras principal en amont et en aval de l'ouvrage

Le merlon longitudinal sera prolongé en amont et en aval par une protection de berge en enrochements libres de fruit 3H/2V en amont et 2 à 3H/1V en aval (le fruit naturel de la berge sera respecté).

Cette protection reposera sur une semelle de longueur 2m, reposant, si nécessaire, sur une couche filtre.

4.1.4. Protection de la berge RG du bras de décharge

Ce merlon sera complété par une protection de la berge RG du bras de décharge sur 40 ml depuis le merlon longitudinal. Cette protection est située au droit des zones d'écoulement les plus turbulentes. En aval, ces écoulements seront tranquillisés avec un faible risque d'emportement des matériaux.

Les talus présenteront des fruits de 3h/2V.

Ces ouvrages seront constitués d'enrochements libres. Il est proposé les mêmes 2 niveaux de protections :

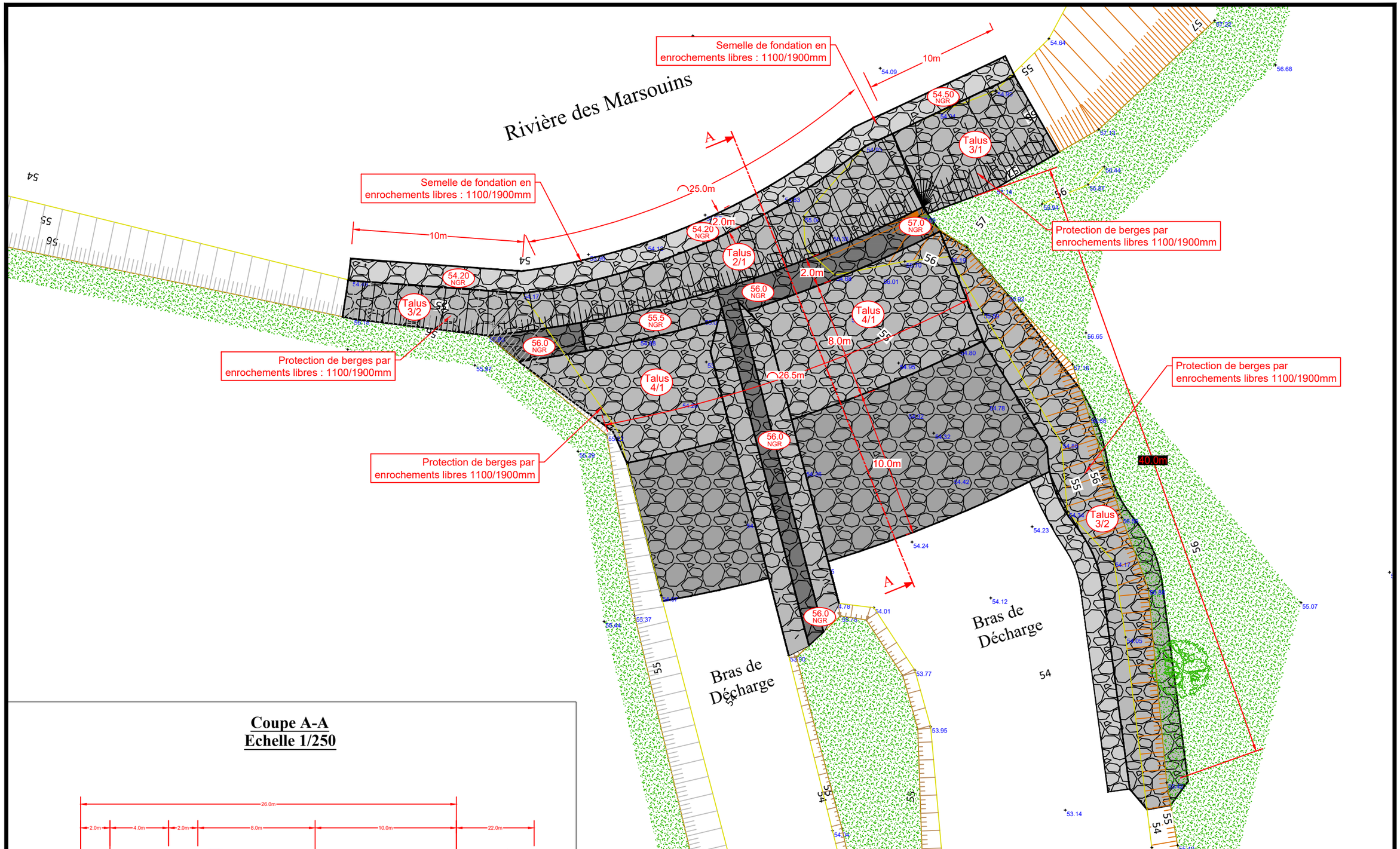
- *Dimensionnement pour 4 m/s* : enrochements libres 800/1000 mm permettant à l'ouvrage de résister à des vitesses de l'ordre de 4 m/s qui sont atteintes localement dès les petites crues (cf chapitre 4.3) ;
- *Dimensionnement pour 5 m/s* : 1100/1900 mm, permettant à l'ouvrage de résister à des vitesses de l'ordre de 5 m/s, et donc à des crues plus élevées (cf chapitre 4.3).

Les ouvrages reposeront sur des couches filtres dont le dimensionnement (nombre, granulométrie, épaisseur) sera défini sur la base des règles de Terzaghi.

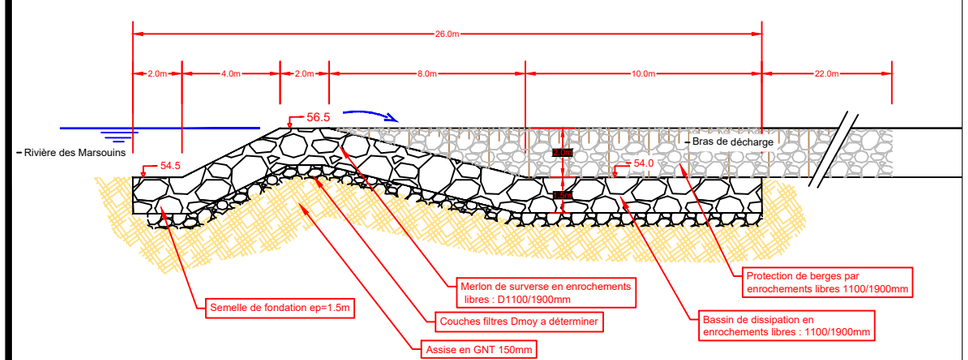
Ils seront prolongés en pied par une semelle en enrochements d'épaisseur 1,5 m et de longueur 2 m reposant sur les mêmes couches filtres.

4.1.5. Schéma de principe

La figure en page suivante présente la coupe type de l'ouvrage et son implantation.



Coupe A-A
Echelle 1/250



GA_Artelia - merlon ilet Coco- SCN 1.dwg

Date de l'impression: le 23 Juillet 2019

Définition des travaux de remise en état d'un merlon et protection de berge - Rivière des Marsouins - Ilet Coco

Figure 16 : Scénario 1 Implantation et Coupe

Ech 1/250

4702454

ARTELIA
AGENCE DE LA REUNION
121, Boulevard Jean Jaurès - CS 31005
97404 SAINT-DENIS CEDEX - FRANCE
Tél. : 33 (0)2 62 90 96 00
Fax : 33 (0)2 62 90 96 01

4.2. DESCRIPTION DE LA SOLUTION 2

4.2.1. Merlon

Le merlon sera mis en œuvre dans le prolongement de la berge existante en rive gauche du bras principal. Il présentera une longueur de 30 ml. La crête de l'ouvrage s'élèvera progressivement de 56 au niveau de la berge RD du Bras de décharge à 57 m NGR au niveau de la berge RG du bras de décharge.

Cet ouvrage sera constitué en surface d'enrochements libres. Il est proposé 2 niveaux de protections :

- *Dimensionnement pour 4 m/s* : enrochements libres 800/1000 mm permettant à l'ouvrage de résister à des vitesses de l'ordre de 4 m/s qui sont atteintes localement dès les petites crues (cf chapitre 4.3) ;
- *Dimensionnement pour 5 m/s* : 1100/1900 mm, permettant à l'ouvrage de résister à des vitesses de l'ordre de 5 m/s, et donc à des crues plus élevées (cf chapitre 4.3).

Les talus coté bras principal présenteront des fruits de 2h/1V. Les talus coté bras de décharge présenteront des fruits de 4h/1V.

Coté amont, ils seront prolongés en pied par une semelle en enrochements d'épaisseur 1,50 m et de longueur 2 m, reposant, si nécessaire, sur une couche filtre.

Coté aval, le merlon sera prolongé par un bassin de dissipation au pied de la section déversante. Il sera constitué d'enrochements libres reposant sur des couches filtres sur une longueur égale à la longueur du ressaut.

L'estimation de la longueur du ressaut repose sur la différence des niveaux d'eau en amont et en aval de l'ouvrage Δh :

Longueur du ressaut =5 à 6 Δh

Les différences de niveaux sont estimées sur la base des modélisations hydrauliques. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

Tabl. 7 - Longueur du ressaut sur le merlon longitudinal

cas	débit	Hamont	Haval	Δh	longueur du ressaut	
		m NGR	*m NGR*	*m*	5 *Δh *m*	6 *Δh *m*
scénario 2	Q10	57.8	55.5	2.3	11.5	13.8
scénario 2	Q100	58.2	55.7	2.5	12.5	15

Une longueur de bassin de 10 m est retenue au stade actuel des études. La localisation du ressaut ayant lieu au niveau du parement, on peut supposer le dimensionnement correct pour 10 voire 100 ans. Ce point pourra être affiné avec l'analyse de la localisation du ressaut (phase PRO).

Il sera prolongé en pied par une semelle en enrochements d'épaisseur 1,5 m et de longueur 2 m.

La mise en œuvre du merlon nécessitera la réalisation d'une zone de travaux dans le bras principal de la Rivière des Marsouins permettant de :

- limiter les vitesses d'écoulement afin de faciliter la mise en œuvre des blocs de la semelle
- décanter les eaux afin de limiter le taux de MES

Il s'agira d'un cordon d'enrochements libres disposé 2 m devant le pied de l'ouvrage. Des pêches électriques de sauvegarde seront nécessaires à sa mise en place et à sa dépose. Elles seront réalisées par la fédération de pêche.

4.2.2. Protection des berges du bras principal en amont et en aval de l'ouvrage

Le merlon longitudinal sera prolongé en amont et en aval par une protection de berge en enrochements libres de fruit 3H/2V en amont et 2 à 3H/1V en aval (le fruit naturel de la berge sera respecté).

Il sera constitué d'enrochements libres 800/1000 mm ou 1100/1900mm (cf chap 4.3).

Cette protection reposera sur une semelle de longueur 2m, reposant, si nécessaire, sur une couche filtre.

4.2.3. Protection de la berge RG du bras de décharge

Ce merlon sera complété par une protection de la berge RG du bras de décharge sur 40 ml depuis le merlon longitudinal. Cette protection est située au droit des zones d'écoulement les plus turbulentes. En aval, ces écoulements seront tranquillisés avec un faible risque d'emportement des matériaux.

Les talus présenteront des fruits de 3h/2V.

Cet ouvrage sera constitué en surface d'enrochements libres. Il est proposé 2 niveaux de protections :

- *Dimensionnement pour 4 m/s* : enrochements libres 800/1000 mm permettant à l'ouvrage de résister à des vitesses de l'ordre de 4 m/s qui sont atteintes localement dès les petites crues (cf chapitre 4.3) ;
- *Dimensionnement pour 5 m/s* : 1100/1900 mm, permettant à l'ouvrage de résister à des vitesses de l'ordre de 5 m/s, et donc à des crues plus élevées (cf chapitre 4.3).

L'ouvrage reposera sur des couches filtres dont le dimensionnement (nombre, granulométrie, épaisseur) sera défini sur la base des règles de Terzaghi.

Ils seront prolongés en pied par une semelle en enrochements d'épaisseur 1,5 m et de longueur 2 m reposant sur les mêmes couches filtres.

4.2.4. Schéma de principe

La figure en page suivante présente la coupe type de l'ouvrage et son implantation.

Rivière des Marsouins

Semelle de fondation en enrochements libres : 1100/1900mm

Protection de berges par enrochements libres : 1100/1900mm

Merlon de Surverse

Talus 3/1

Talus 2/1

Talus 3/2

Talus 4/1

Bassin de dissipation

Bras de Décharge

Bras de Décharge

10m

25.0m

2.0m

8.0m

10.0m

40.0m

54.50 NGR

54.20 NGR

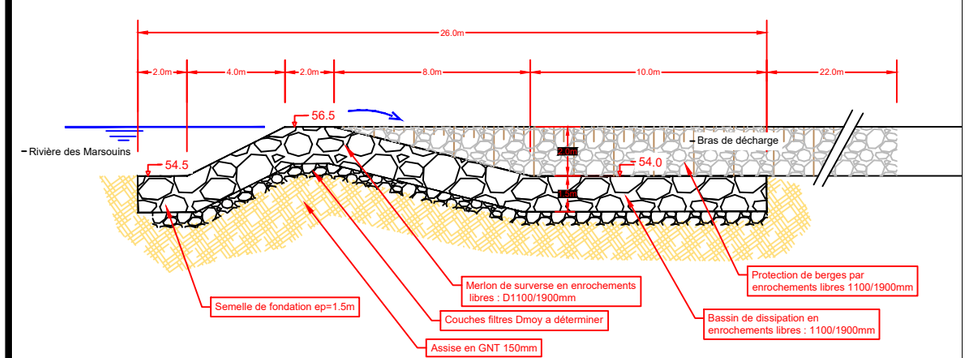
56.5 NGR

56.0 NGR

54.0 NGR

57.0 NGR

Coupe A-A
Echelle 1/250



GA_Artelia - merlon ilet Coco- SCN 2.dwg

Date de l'impression: le 23 Juillet 2019

Définition des travaux de remise en état d'un merlon et protection de berge - Rivière des Marsouins - Ilet Coco

Figure 17 : Scénario 2
Implantation et coupe

Ech : 1/250

4702454

ARTELIA
AGENCE DE LA REUNION
121, Boulevard Jean Jaurès - CS 31005
97404 SAINT-DENIS CEDEX - FRANCE
Tél. : 33 (0)2 62 90 96 00
Fax : 33 (0)2 62 90 96 01

4.3. PERIODE DE RETOUR DE DIMENSIONNEMENT

Les calculs hydrauliques indiquent des vitesses sur l'ouvrage :

- pour la solution 1
  - de 5 à 5.5 m/s en Q_{10}
  - de 6 à 7 m/s en Q_{100}
- pour la solution 2
  - de 3 à 5 m/s en Q_{10}
  - de 5 à 6 m/s en Q_{100}.

Il est à noter que pour une crue donnée, la solution 2 présente des vitesses moins élevées que la solution 1. Ainsi la fréquence de dégradation du merlon est plus faible pour la solution 2.

Il est proposé 2 niveaux de dimensionnement pour chacune des 2 solutions :

- *Dimensionnement pour 4 m/s* : enrochements libres 800/1000 mm permettant à l'ouvrage de résister à des vitesses de l'ordre de 4 m/s qui sont atteintes localement dès les petites crues ;
- *Dimensionnement pour 5 m/s* : 1100/1900 mm, permettant à l'ouvrage de résister à des vitesses de l'ordre de 5 m/s, et donc à des crues plus élevées.

A partir de ces valeurs, on peut estimer la période de retour de dimensionnement associée. Il s'agit de la période de retour dite « structurelle » de l'ouvrage à partir de laquelle l'état de l'ouvrage est susceptible de se dégrader significativement : désorganisation des blocs, effondrement du merlon, départ de blocs, affaissement de la protection... Il ne s'agit pas de la période de retour dite « hydraulique » à partir de laquelle la surverse sera en fonctionnement.

Ces périodes de retour dite « structurelles » sont indiquées dans le tableau suivant selon la solution retenue et la blocométrie des enrochements.

Tabl. 8 - Période de retour de dimensionnement

	Solution 1	Solution 2
Dimensionnement 4m/s (blocométrie 800/1000)	5 ans	10 ans
Dimensionnement 5m/s (blocométrie 1100/1900)	10 ans	20 ans

4.4. ENTRETIEN ET INSPECTION

Il est vivement conseillé de réaliser une inspection régulière des ouvrages : à minima annuellement (après chaque saison cyclonique) et après chaque crue significative (Temps de retour supérieur à 1 ans => Q = 540 m^3/s).

En cas de désordres constatés, des opérations d'entretien devront être menées. Il s'agira essentiellement d'opérations de terrassement et d'apport de blocs, permettant de reconstituer les ouvrages tel que décrit dans le présent document.

5. INCIDENCE DU PROJET SUR L'HYDRAULIQUE

5.1. ZONE INONDABLE

Il convient dans un premier temps de s'assurer que les ouvrages ainsi créées n'aggravent pas les débordements sur l'ilet par rapport à l'état actuel et qu'ils permettent de retarder son isolement.

Cette analyse repose sur les modélisations 2D état projet comparées à l'état initial (cf. figures en pages suivantes).

Nota : Cette modélisation état projet intègre également le nouveau radier d'accès à l'ilet, certaines incidences les plus en aval pourraient donc résulter de cette modification.

Les principales conclusions de cette analyse sont les suivantes :

- Les aménagements projetés modifient la répartition des débits entre bras principal et bras de surverse, ce dernier étant moins sollicité après la mise en place de l'aménagement. Le tableau ci-dessous présente la répartition des débits entre le bras de décharge et le bars principal pour les crues décennales et centennales :

	Débit (m3/s)	Etat initial	Etat projet – sc1	Etat projet – sc2
Bras de décharge	$Q_{10\ ans}$	300	210 (-30%)	175 (-42%)
	$Q_{100\ ans}$	570	450 (-21%)	415 (-27%)
Bras principal	$Q_{10\ ans}$	450	540 (+ 20%)	575 (+28%)
	$Q_{100\ ans}$	815	935 (+15%)	970 (+19%)

- Les niveaux d'eau augmentent dans le bras principal d'environ :
  - Pour le scénario 1 : 15 cm en Q_{10} et 25 cm en Q_{100}
  - Pour le scénario 2 : 25 cm en Q_{10} et 50 cm en Q_{100}
- L'impact sur les niveaux d'eau des zones inondées au sein de l'ilet est plutôt positif (les hauteurs d'eau diminuent). Il subsiste quelques zones mineures où les hauteurs d'eau augmentent. Ces augmentations se limitent à la partie nord de l'ilet (cf figure ci-après). Les ordres de grandeur sont les suivants :
  - Pour le scénario 1 : + 25 cm en Q_{10} très localement en aval de la surverse et + 2 cm en Q_{100} sur l'ilet
  - Pour le scénario 2 : + 50 cm en Q_{10} très localement en aval de la surverse et + 10 cm en Q_{100} sur l'ilet

  Sur la partie *sud*, les écoulements sont améliorés avec une diminution des hauteurs d'eau à l'intérieur de l'ilet :
  - Pour le scénario 1 : une diminution des hauteurs d'eau de 5 cm en Q_{100} est constatée au niveau de l'ilet ;
  - Pour le scénario 2 : une diminution des hauteurs d'eau de 10 cm en Q_{100} est constatée au niveau de l'ilet.

Nota : Cette analyse se base sur un merlon toujours en place malgré l'intensité de la crue. Ainsi, pour une crue centennale, le merlon sera destructuré, les zones inondables seront donc plus proches de l'état initial que l'état aménagé.

5.2. RISQUE DE RUPTURE

Concernant la stabilité de l'ouvrage et le risque de rupture, étant donné les conditions de crues (montée progressive des eaux, rupture par surverse), l'effacement de l'ouvrage se fera progressivement.

De plus, les ouvrages ont été dimensionnés afin que cette rupture se fasse lorsque la surverse sera en fonctionnement, avec un apport d'eau dans le bras de décharge (période de dimensionnement de stabilité de l'ouvrage supérieure à la période de retour de la crue de surverse).

On estime, pour la période de retour 10 ans, les niveaux d'eau suivants :

	Niveau amont surverse	Niveau aval surverse	Différence
Scénario 1	57.5 m NGR	56.3 mNGR	1.2 m
Scénario 2	57.8 mNGR	56.3 mNGR	1.5 m

Ces hauteurs d'eau restent sensiblement identiques entre les 2 scénarios pour cette crue de référence, sachant que la plupart des scénarios sont dimensionnés pour résister à cette crue (cf 4.3).

Pour les crues supérieures (crues susceptibles de détruire la surverse), l'ouvrage fonctionnant en mode noyé, cette différence de hauteur amont/aval va donc diminuer. A titre d'exemple, en considérant un ouvrage intact pour une crue centennale, la différence de hauteur est de 80 cm pour le scénario 2 et nulle pour le scénario 1.

Globalement, l'incidence des aménagements, tels que décrits au § 4, sur les hauteurs d'eau sur les zones inondées est limitée, bien que légèrement défavorable sur la partie *nord* et favorable sur la partie *sud*.

Concernant le risque de rupture, elle sera progressive, avec une faible hauteur d'eau, vers une zone non habitée de l'ilet (canal de surverse)

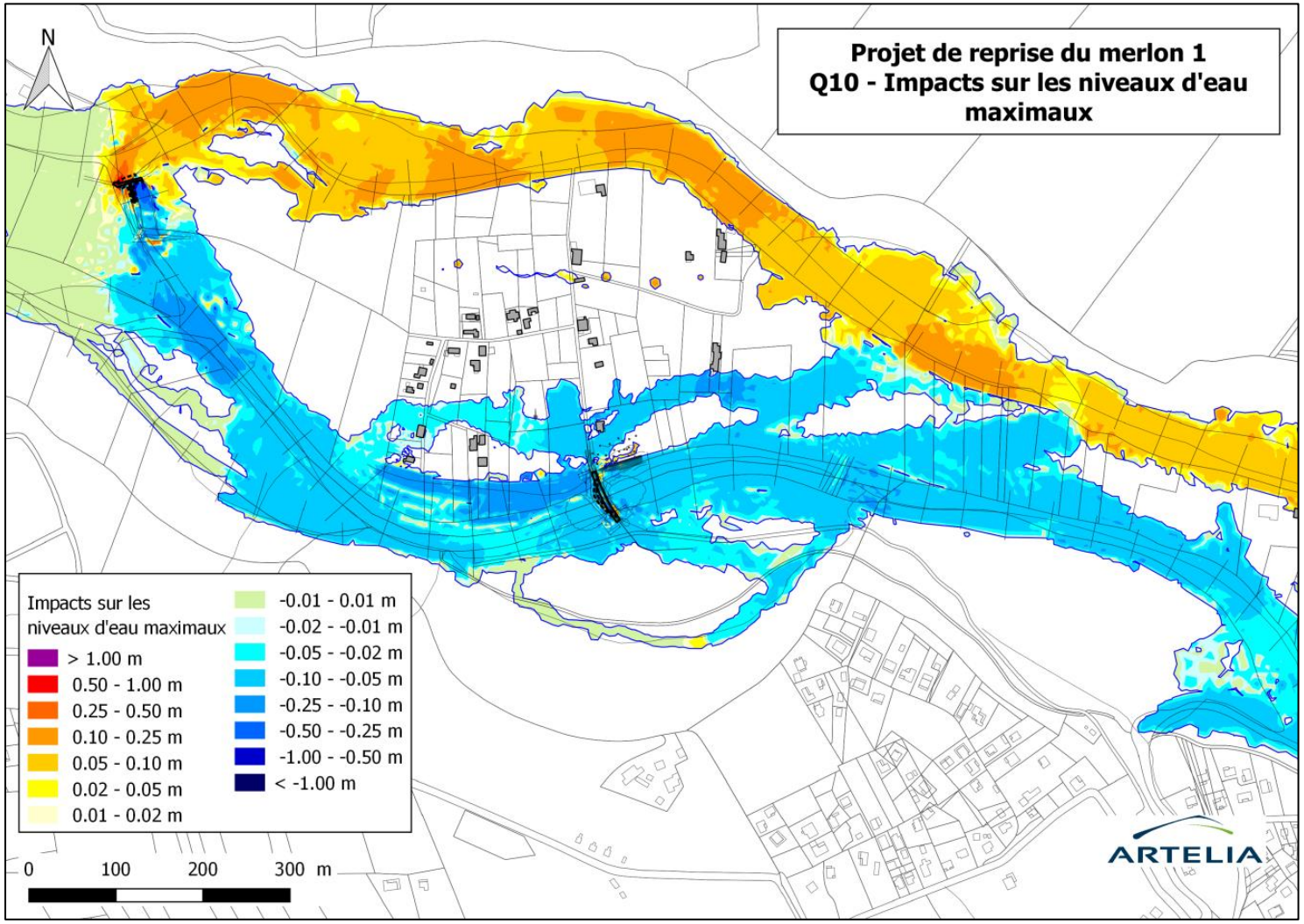


Fig. 18. Impact sur les niveaux d'eau pour la solution 1 en Q_{10} (H_{projet} – $H_{initial}$)

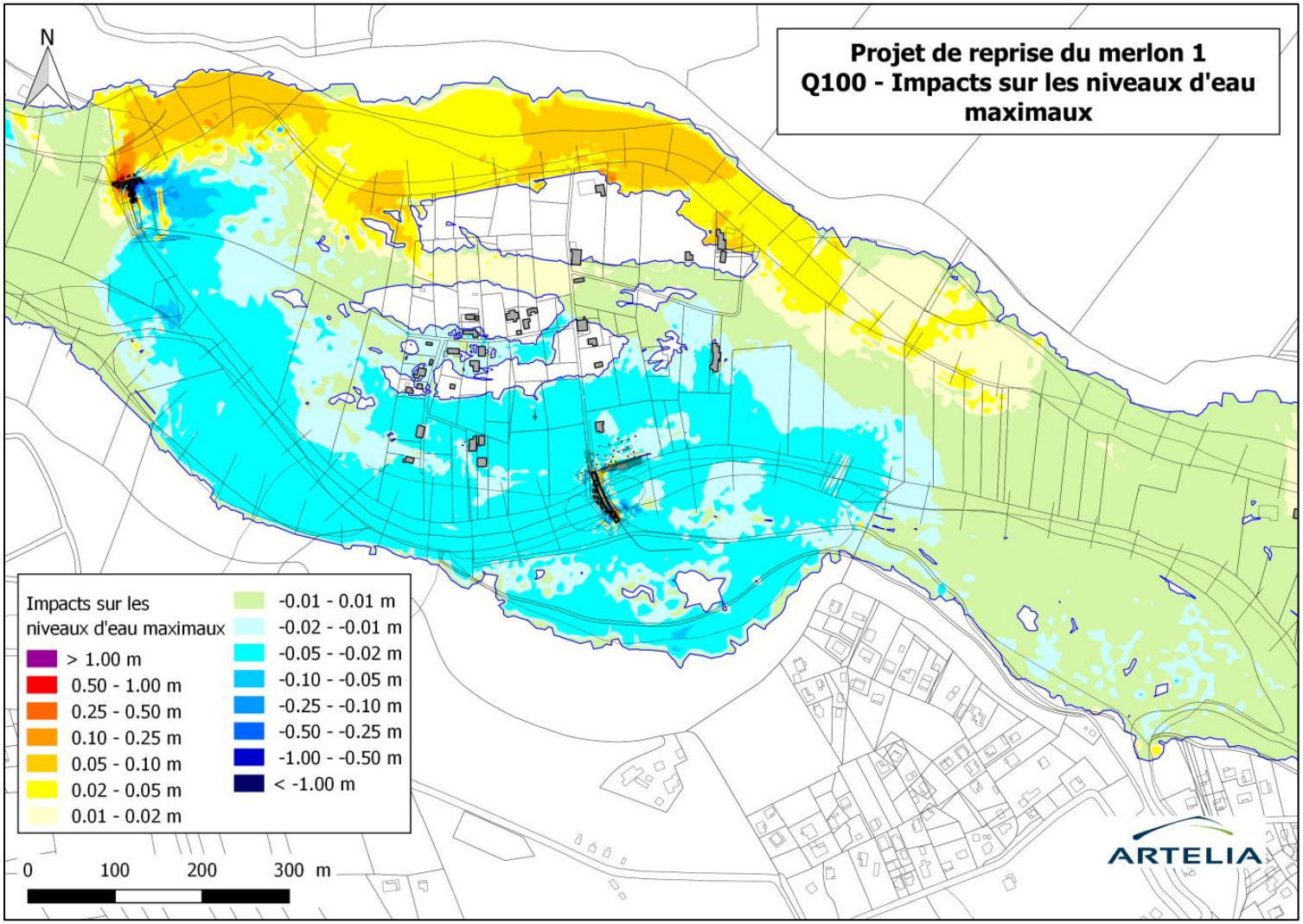


Fig. 19. Impact sur les niveaux d'eau pour la solution 1 en Q_{100} (H_{projet} – $H_{initial}$)

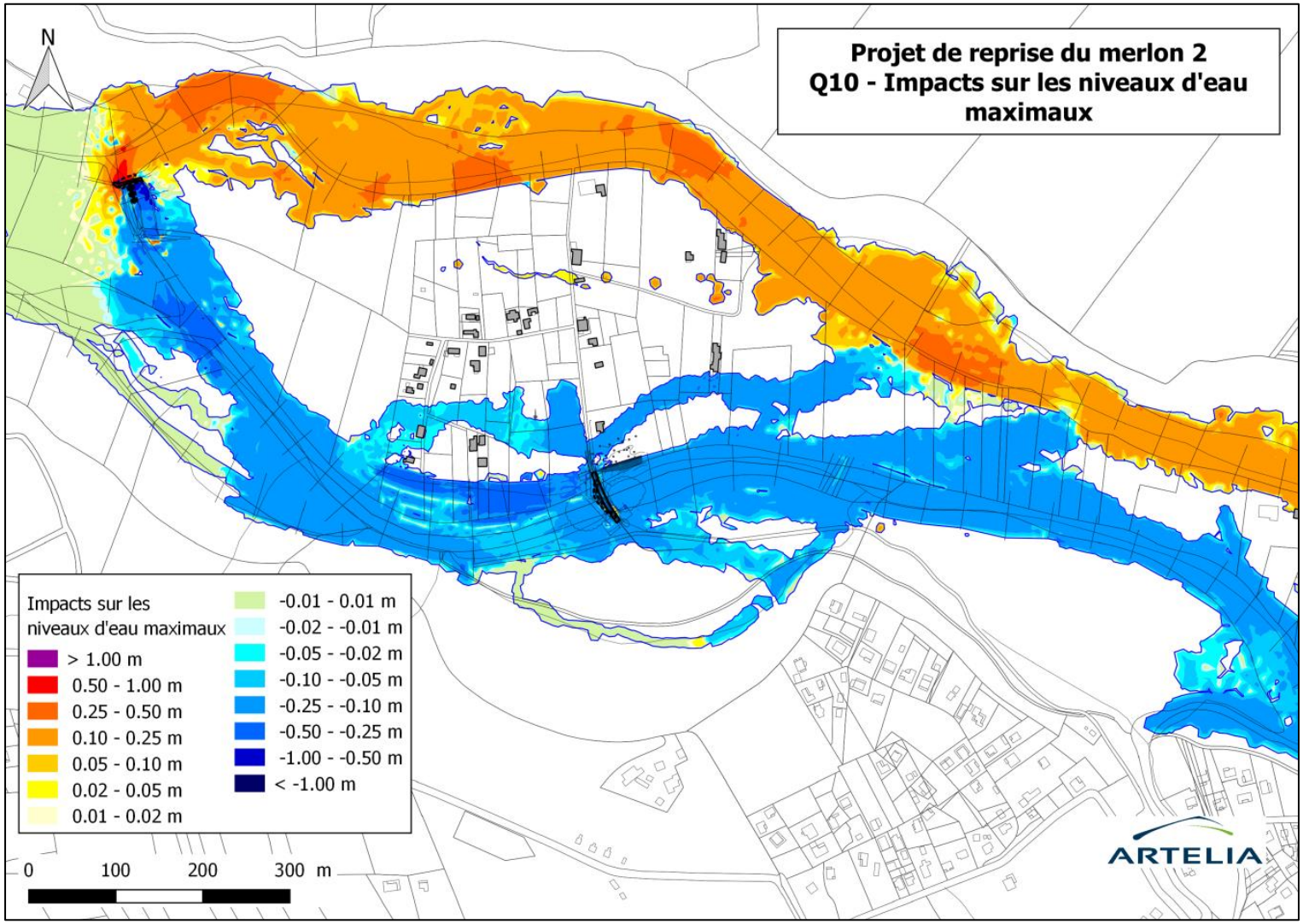


Fig. 20. Impact sur les niveaux d'eau pour la solution 2 en Q_{10} ($H_{projet} - H_{initial}$)

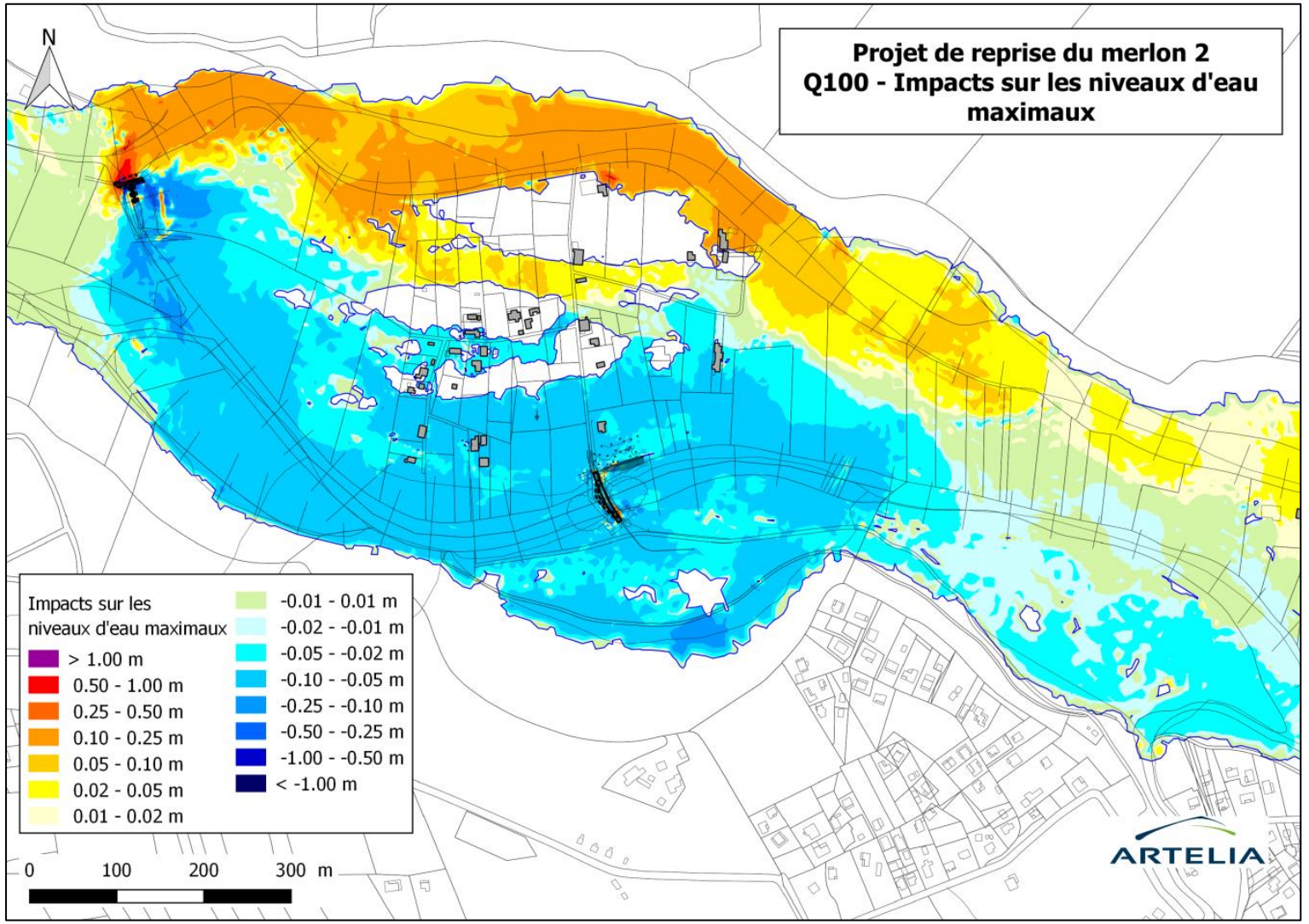


Fig. 21. Impact sur les niveaux d'eau pour la solution 2 en Q_{100} (H_{projet} – $H_{initial}$)

6. CADRAGE REGLEMENTAIRE

Le projet pourrait nécessiter les procédures règlementaires suivantes :

- *Dossier Police de l'eau :*

Le projet tel que présenté dans ce dossier serait soumis à un dossier de déclaration Code de l'environnement Livre II titre 1er (ex loi sur l'eau) au titre des rubriques suivantes :

Tabl. 9 - Rubrique loi sur l'eau potentiellement concernée

Rubriques	Libellés	Seuils (A : autorisation / D : déclaration)	Position du projet
3.1.1.0	Installations, ouvrages, remblais et épis, dans le lit mineur d'un cours d'eau, constituant :	1° Un obstacle à l'écoulement des crues : (A) : projet soumis à Autorisation 2° Un obstacle à la continuité écologique : a) Entraînant une différence de niveau supérieure ou égale à 50 cm, pour le débit moyen annuel de la ligne d'eau entre l'amont et l'aval de l'ouvrage ou de l'installation : (A) : projet soumis à Autorisation b) Entraînant une différence de niveau supérieure à 20 cm mais inférieure à 50 cm pour le débit moyen annuel de la ligne d'eau entre l'amont et l'aval de l'ouvrage ou de l'installation : (D) : projet soumis à Déclaration	Il ne s'agit pas d'un obstacle aux écoulements dans le lit principal **Non concerné**
3.1.2.0	Installations, ouvrages, travaux ou activités conduisant à modifier le profil en long ou le profil en travers du lit mineur d'un cours d'eau, à l'exclusion de ceux visés à la rubrique 3.1.4.0 ou conduisant à la dérivation d'un cours d'eau	- Sur une longueur de cours d'eau supérieure ou égale à 100 m (A) ; - Sur une longueur de cours d'eau inférieure à 100 m (D).	Profil en travers modifié sur 45 m dans le bras principal et 40 m dans le bras de décharge. **Déclaration**
3.1.4.0	Consolidation ou protection des berges, à l'exclusion des canaux artificiels, par des techniques autres que végétales vivantes :	sur une longueur supérieure ou égale à 200 m (A) sur une longueur supérieure ou égale à 20 m mais inférieure à 200 m (D)	Protection de berges sur 20 m dans le bras principal et 40 m dans le bras de décharge. **Déclaration**
3.2.6.0	Digues	De protection contre les inondations et submersions (A) De canaux et de rivières canalisées (D)	**Non concerné**, l'ouvrage n'étant pas assimilé à une digue.

Délais estimatifs d'instruction : 2 mois

- *Etude d'impact* :

Le projet n'était pas une dérivation des eaux du bras principal, le projet tel que présenté n'est pas soumis au cas par cas ni à une procédure d'étude d'impact systématique.

- *AOT* : les travaux auront lieu dans le DPF. Une demande d'AOT sera nécessaire.

Une convention d'affectation de superposition pourrait également être demandée par la DEAL. Ce document couvre la phase travaux ainsi que la phase exploitation.

Délais estimatifs d'instruction : 2 mois

- *Règlementation digue* :

Les ouvrages proposés présentent les hauteurs suivantes :

  - 1.5 m sur la section déversant à 2 m pour la solution 1
  - 2 m pour la solution 2

Ici, l'ouvrage permet de réduire la fréquence de submersion des habitants de la partie haute de l'ilet.

Pour les crues modérées (2 à 20 ans selon la solution et le dimensionnement – cf Tabl. 8 -), l'ouvrage sera stable. Pour les crues supérieures de dimensionnement; l'ouvrage se dégrade pour ensuite être effacé.

De tels ouvrages ne sont pas assimilés à des digues au sens du décret du 15 mai 2015. Néanmoins, ce point devra être validé avec la DEAL.

7. ESTIMATIF

7.1. REALISATION DES TRAVAUX

Au stade actuel des études, l'aménagement du merlon est chiffré à (MOE, AMO, études complémentaires, inspections et entretien exclus) :

Tabl. 10 - Estimatif des travaux de réalisation des ouvrages

	Solution 1	Solution 2
Dimensionnement 4 m/s (blocométrie 800/1000)	178 653 € HT	167 613 € HT
Dimensionnement 5 m/s (blocométrie 1100/1900)	275 713 € HT	257 313 € HT

La décomposition des prix pour chaque solution est précisée dans les tableaux qui suivent

Tabl. 11 - Estimatif – solution 1 dimensionnement 5 m/s

Désignation		Unité	Quantité	Prix unitaire (€ HT)	Montant (€ HT)
Prix généraux					
	Installations de chantier	forfait	1	10 000	10 000
	Protection de la zone de travaux	forfait	1	12 000	12 000
	Aménagement des pistes de chantier	ml	70	5	350
	Levé topographique, implantation	forfait	2	1 000	2 000
	Etudes et documents d'éxécution	forfait	1	2 000	2 000
Merlons					
	Enrochements libre 1100/1900	m^3	1 375	100	137 500
	GNT	m^3	30	20	600
	Couche filtre	m^3	405	20	8 100
Protections de berges					
	Enrochements libre 110/1900	m^3	630	100	63 000
	Couche filtre	m^3	210	20	4 200
					239 750
	Aléas (+15%)				35 963
	Total HT				**275 713**

Tabl. 12 - Estimatif – solution 1 dimensionnement 4 m/s

Désignation		Unité	Quantité	Prix unitaire (€ HT)	Montant (€ HT)
Prix généraux					
	Installations de chantier	forfait	1	10 000	10 000
	Protection de la zone de travaux	forfait	1	12 000	12 000
	Aménagement des pistes de chantier	ml	70	5	350
	Levé topographique, implantation	forfait	2	1 000	2 000
	Etudes et documents d'éxécution	forfait	1	2 000	2 000
Merlons					
	Enrochements libre 800/1000	m^3	1 375	60	82 500
	GNT	m^3	30	20	600
	Couche filtre	m^3	405	20	8 100
Protections de berges					
	Enrochements libre 800/1000	m^3	630	60	37 800
	Couche filtre	m^3	210	20	4 200
					159 550
	Aléas (+15%)				23 933
	Total HT				**183 483**

Tabl. 13 - Estimatif – solution 2 dimensionnement 5 m/s

Désignation		Unité	Quantité	Prix unitaire (€ HT)	Montant (€ HT)
Prix généraux					
	Installations de chantier	forfait	1	10 000	10 000
	Protection de la zone de travaux	forfait	1	12 000	12 000
	Aménagement des pistes de chantier	ml	70	5	350
	Levé topographique, implantation	forfait	2	1 000	2 000
	Etudes et documents d'éxécution	forfait	1	2 000	2 000
Merlon					
	Enrochements libre 1100/1900	m^3	1 215	100	121 500
	GNT	m^3	30	20	600
	Couche filtre	m^3	405	20	8 100
Protections de berges					
	Enrochements libre 1100/1900	m^3	630	100	63 000
	Couche filtre	m^3	210	20	4 200
					223 750
	Aléas (+15%)				33 563
	Total HT				**257 313**

Tabl. 14 - Estimatif – solution 2 dimensionnement 4 m/s

Désignation		Unité	Quantité	Prix unitaire (€ HT)	Montant (€ HT)
Prix généraux					
	Installations de chantier	forfait	1	10 000	10 000
	Protection de la zone de travaux	forfait	1	12 000	12 000
	Aménagement des pistes de chantier	ml	70	5	350
	Levé topographique, implantation	forfait	2	1 000	2 000
	Etudes et documents d'éxécution	forfait	1	2 000	2 000
Merlon					
	Enrochements libre 800/1000	m^3	1 215	60	72 900
	GNT	m^3	30	20	600
	Couche filtre	m^3	405	20	8 100
Protections de berges					
	Enrochements libre 800/1000	m^3	630	60	37 800
	Couche filtre	m^3	210	20	4 200
					149 950
	Aléas (+15%)				22 493
	Total HT				**172 443**

7.2. ENTRETIEN

Les opérations d'entretien des ouvrages (hors visites d'inspection, études et définition des travaux) sont estimées, au stade actuel des études sur la base de la période de retour de dimensionnement associée à chaque solution. Pour chaque solution, on suppose une proportion d'ouvrage à reprendre et une fréquence, sur 50 ans. On considère que ¼ des protections de berges et que ½ du merlon seront à reprendre lors de la dégradation de l'ouvrage

Les hypothèses et résultats sont définis dans le tableau suivant :

Tabl. 15 - Estimatif des travaux d'entretien des ouvrages sur 50 ans

	Solution 1	Solution 2
Dimensionnement 4 m/s (blocométrie 800/1000)	Ouvrage à reprendre 10 fois : **796 663 € HT**	Ouvrage à reprendre 5 fois : **370 731 € HT**
Dimensionnement 5 m/s (blocométrie 1100/1900)	Ouvrage à reprendre 5 fois : **592 681 € HT**	Ouvrage à reprendre 3 fois : **328 009 € HT**

7.3. COUT TOTAL SUR 50 ANS

Le cout total (travaux + entretien sur 50 ans) est ainsi estimé à :

Tabl. 16 - Estimatif des travaux + entretien des ouvrages sur 50 ans

	Solution 1	Solution 2
Dimensionnement 4 m/s (blocométrie 800/1000)	980 145 € HT	543 174 € HT
Dimensionnement 5 m/s (blocométrie 1100/1900)	868 394 € HT	585 321 € HT

Soit un montant annuel moyen (cout lissé sur 50 ans) de :

Tabl. 17 - Cout annuel moyen sur 50 ans

	Solution 1	Solution 2
Dimensionnement 4 m/s (blocométrie 800/1000)	19 603 € HT	10 863 € HT
Dimensionnement 5 m/s (blocométrie 1100/1900)	17 368 € HT	11 706 € HT

8. ETUDES COMPLEMENTAIRES

Il conviendra de réaliser, avant la définition au stade PRO/DCE des ouvrages, l'étude suivante :

- *Reconnaissances géotechniques* : il s'agira de définir la granulométrie de :
  - la berge RG du bras de décharge
  - de l'assise des différents merlons, de leurs semelles et du bassin de dissipation.

  Ces données permettront notamment de définir le nombre, la granulométrie et l'épaisseur des couches filtres qui sont basés sur la différence de granulométrie entre l'ouvrage et le sol en place, et d'estimer les profondeurs d'affouillement attendues en pied d'ouvrage afin de caler les semelles des ouvrages.

  Ces reconnaissances seront à réaliser sur 4 zones réparties sur la zone de projet. Il s'agira de réaliser un sondage à la pelle mécanique avec réalisation de granulométrie par tamisage sur site.

9. DUREE DE REALISATION DES TRAVAUX

La durée des travaux est estimée à (période de préparation incluse) :

- 3,5 mois pour la solution 1
- 3 mois pour la solution 2

Les travaux devront être menés hors saison cyclonique du 15 novembre au 15 avril.

10. ANALYSE MULTI CRITERES

Le tableau suivant compare les 2 solutions proposées suivant plusieurs critères.

Tabl. 18 - Analyse multi critères

	Scénario 1		Scénario 2	
Dimensionnement	*4m/s*	*5 m/s*	*4m/s*	*5 m/s*
Descriptif	Merlon longitudinal avec section déversante Merlon transversal Protection de berge RG bras de décharge		Merlon longitudinal. Protection de berge RG bras de décharge.	
Hydraulique	Vitesses plus importantes sur l'ouvrage => la fréquence de désorganisation/ruine de l'ouvrage est plus forte. **0**		Vitesses moins importantes sur l'ouvrage => la fréquence de désorganisation/ruine de l'ouvrage est plus faible. **+**	
Période de retour de dimensionnement	5 ans **0**	10 ans **++**	10 ans **++**	20 ans **+++**
Incidence hydraulique	+ 25 cm en Q10 très localement en aval de la surverse **Impact limité : +**		+ 50 cm en Q10 très localement en aval de la surverse **Impact limité : 0**	
Incidence sur les enjeux (intérieur ilet)	+ 2 cm d'eau à l'intérieur de l'ilet sur la partie *nord* et – 5 cm d'eau sur la partie *sud* +		+ 10 cm d'eau à l'intérieur de l'ilet sur la partie *nord* et – 10 cm d'eau sur la partie *sud* **0**	
Délais	Estimation travaux : 3,5 mois **0**		Estimation travaux : 3 mois **+**	
Règlementaire	Règlementation digue : non concerné. AOT nécessaire (2 mois). DLE déclaration **+**		Règlementation digue : non concerné. AOT nécessaire (2 mois) DLE déclaration **+**	
Estimatif travaux + entretien sur 50 ans	980 145 € HT **0**	868 394 € HT **+**	543 174 € HT **+++**	585 321 € HT **++**
Bilan	**3+**	**6+**	**7+**	**7+**