

7.4.2. Excavation du nouveau canal

La première partie des excavations concerne le canal principal ainsi que le bras secondaire en rive droite. Le bras secondaire en rive gauche sera réalisé à la fin des travaux pour permettre stockage maximal des matériaux d'excavation.

Remarque : le stockage des matériaux en rive gauche du nouveau canal permet d'une part de limiter le nombre de camions qui transiteront et d'autre part de réduire les coûts de manière non négligeable.

La butte d'observation des oiseaux sera réalisée avec les matériaux de l'excavation du futur canal.

Le nouveau canal sera excavé en laissant une séparation en terre avec le lac en aval, ainsi qu'en isolant le nouveau canal du canal actuel moyennant un ouvrage de dérivation temporaire des eaux, permettant ainsi de finaliser l'excavation du nouveau canal coté Broye. Le système d'isolement à mettre en place sera discuté avec l'entrepreneur, selon des critères d'efficacité, de robustesse et de sécurité lors des crues et de coûts. Il pourrait, à titre d'exemple, être réalisé grâce à des palplanches ou grâce à une digue en terre partiellement renforcée par des enrochements.



Figure 40 : Excavation du nouveau canal

7.4.3. Protection et stabilisation des berges

Une fois le nouveau canal excavé, une stabilisation des berges sera effectuée par mélange d'enrochements et de génie végétal selon la procédure suivante (Figure 41) :

1. Excavation au pied du talus.
2. Mise en place d'un géotextile.
3. Sur la partie inférieure, mise en place de rangées d'enrochements, disposées jusqu'à 2 mètres sous le thalweg actuel afin de limiter tout risque d'affouillement.
4. Sur la partie supérieure, végétalisation grâce à des espèces indigènes qui seront définies ultérieurement.
5. Installation de nouvelles places d'amarrage. Une partie des embarcations situées sur la berge en rive gauche, en aval du pont d'Avenches, sera déplacée dans le nouveau canal.

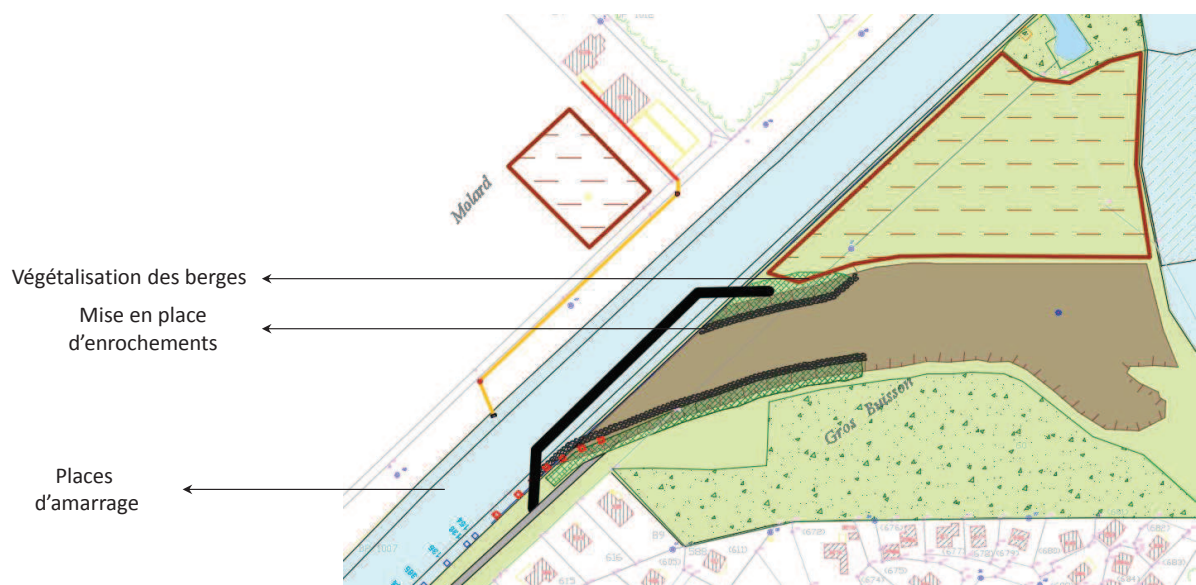


Figure 41 : Protection et stabilisation des berges du futur canal

7.4.4. Mise en eau du nouveau canal et dragage de l'embouchure

La mise en eau du nouveau canal s'effectuera de la manière suivante (Figure 42) :

- Suppression du solde de la berge initiale du côté lac
- Dragage de l'embouchure pour assurer la navigation des bateaux. Les matériaux issus du dragage seront redéposés au niveau du banc de sable existant plus au nord.
- Le système d'isolement du canal pourra être enlevé et déplacé pour isoler le canal actuel de la Broye et préparer l'étape suivante des travaux.

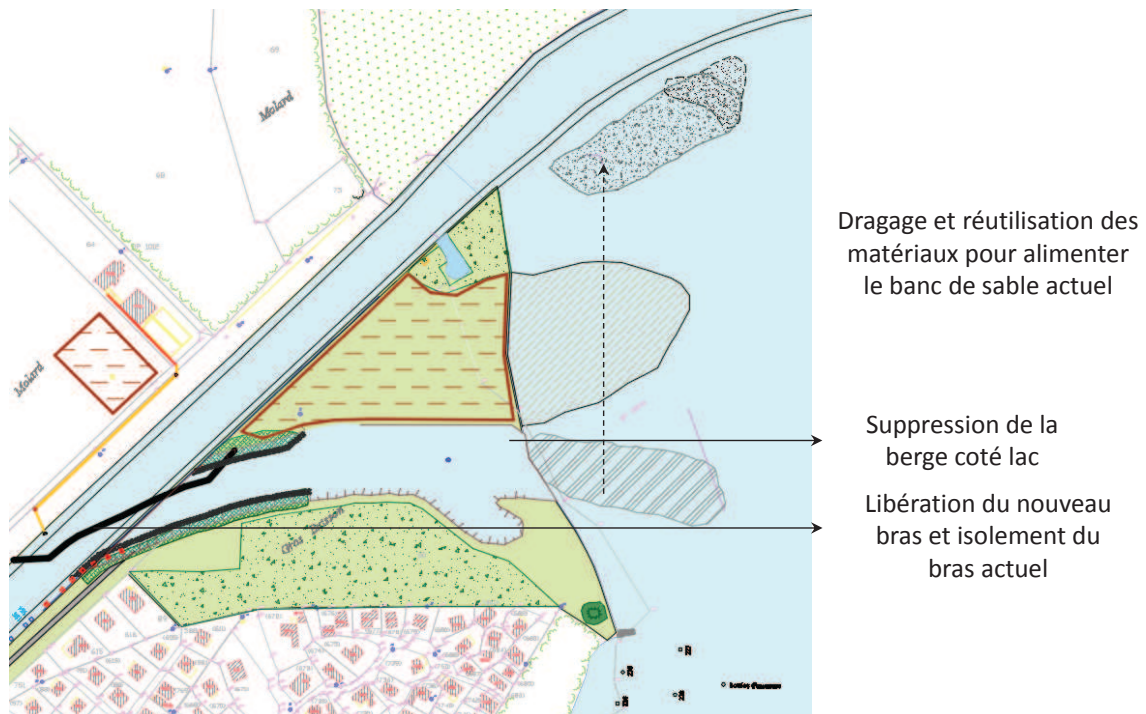


Figure 42 : Mise en eau du nouveau canal de la Broye

7.4.5. Obstruction du canal actuel – Partie amont

Lorsque le canal actuel sera isolé, sa partie amont pourra être obstruée définitivement de la manière suivante (Figure 43) :

1. Remblai du canal avec les matériaux stockés en rive gauche du nouveau canal
2. Mise en place d'un géotextile
3. Sur la partie inférieure, mise en place de rangées enrochements, disposées jusqu'à 2 mètres sous le thalweg actuel afin de limiter tout risque d'affouillement.
4. Sur la partie supérieure, végétalisation grâce à des espèces indigènes qui seront définies ultérieurement.

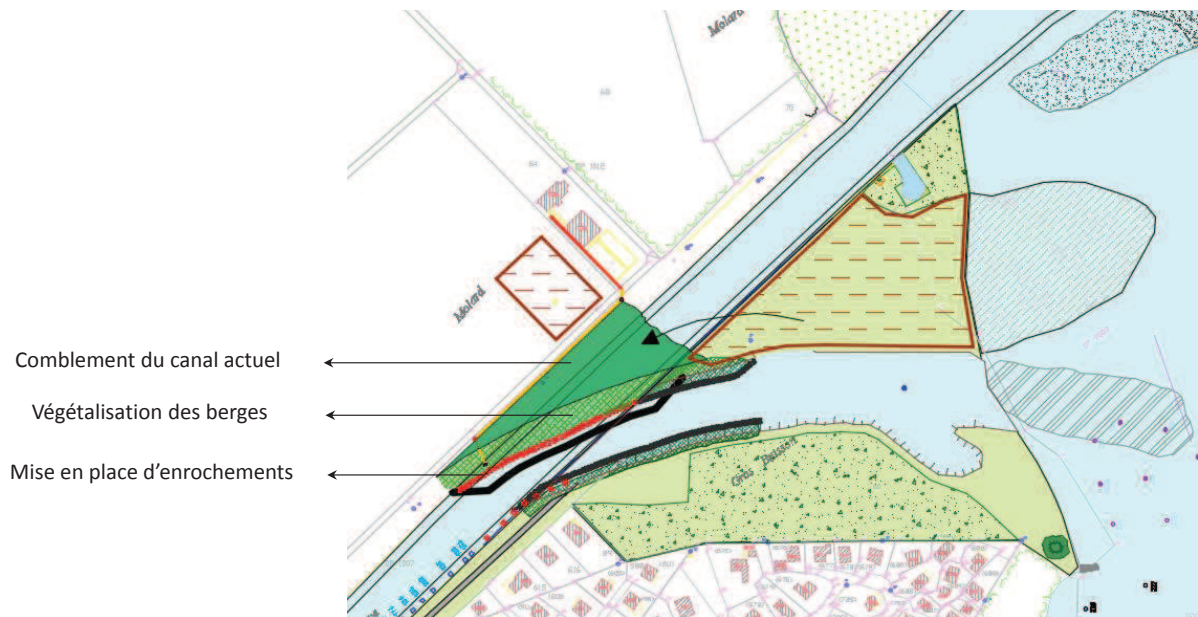


Figure 43 : Obstruction du canal actuel

7.4.6. Obstruction du canal actuel – Partie aval

Lorsque la partie amont de l'obstruction sera réalisée, le système d'isolement du canal pourra être enlevé. Le reste des matériaux excavés et stockés temporairement sera utilisé pour combler la partie aval de l'ouvrage comme suit (Figure 44) :

1. Enlèvement du système d'isolement du canal
2. Comblement de la partie aval du canal actuel de la Broye
3. Création de dépressions locales dans le comblement

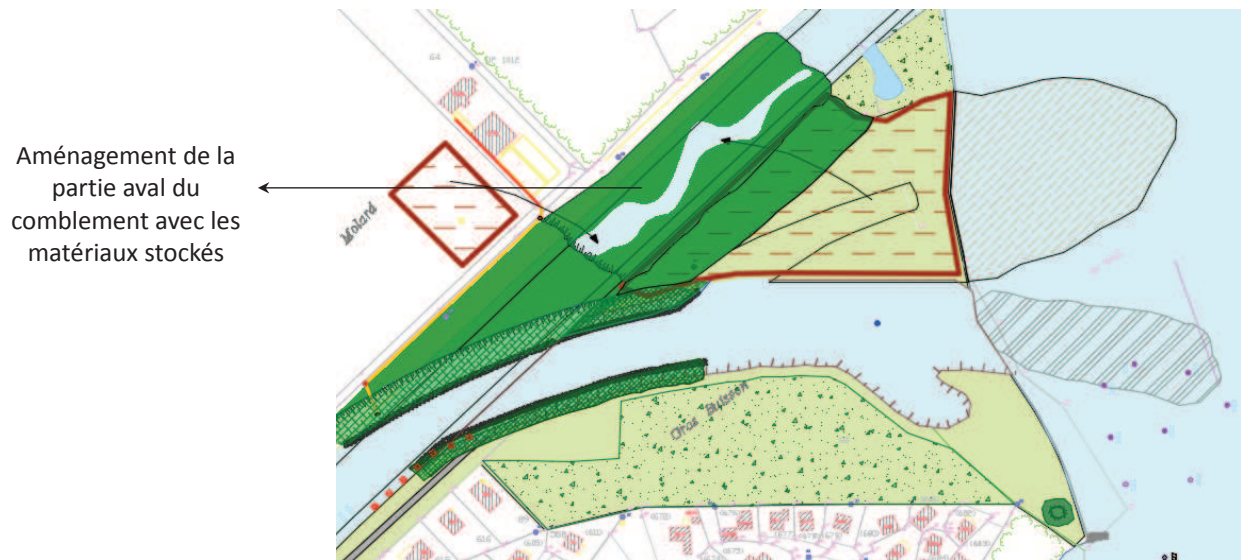


Figure 44 : Comblement partiel de la partie aval du canal actuel

7.4.7. Aménagement de la rive gauche du nouveau canal

Une fois la surface en rive gauche du nouveau canal libéré des matériaux stockés, cette partie pourra être aménagée comme suit (Figure 45) :

1. Abaissement du terrain à la cote moyenne de 429.40 msm
2. Excavation du bras secondaire
3. Création de dépressions locales

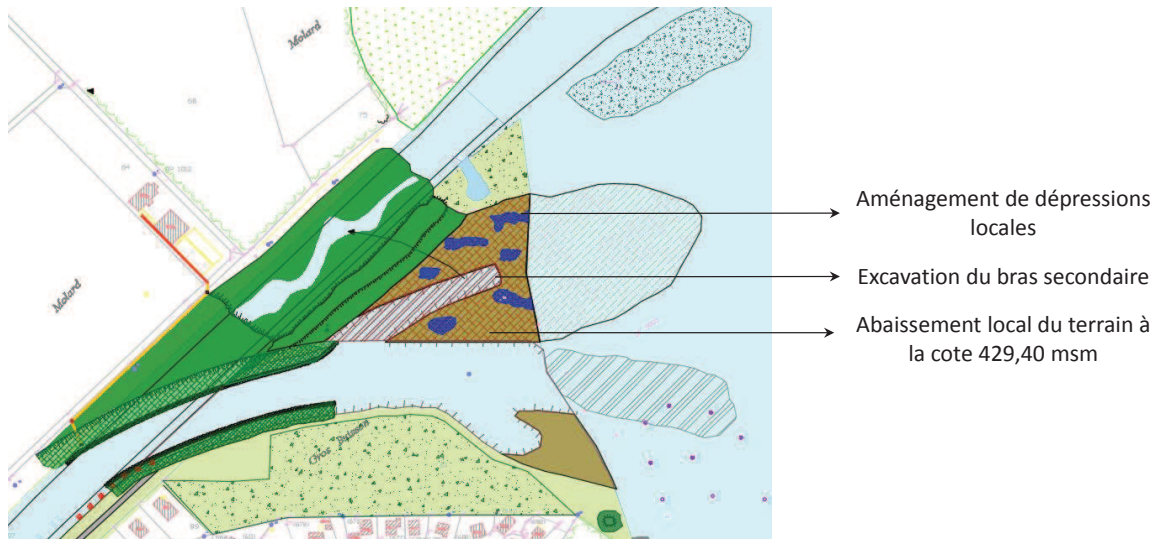


Figure 45 : Aménagement de la rive gauche du nouveau canal

7.4.8. Réalisation des mesures environnementales et socio-économiques

Une série de mesures environnementales et socio-économiques sera réalisée comme suit (Figure 46) :

1. Aménagement des roselières :
 - a. Création d'une lagune
 - b. Abaissement du terrain
2. Aménagement de la future zone alluviale lacustre
 - a. Mise en place de pieux en bois
 - b. Mise en place d'une plateforme de nidification pour les Sternes
 - c. Mise en place de bouées de signalisation afin d'interdire la navigation à l'intérieur de la zone alluviale
3. Création d'un sentier didactique et d'une plateforme d'observation dans les roselières actuelles



Figure 46 : Mesures environnementales et socio-économiques



7.5. Planning prévisionnel des travaux

Les travaux ont été divisés en 5 blocs. Ceux-ci devront être réalisés préférentiellement entre septembre et mars afin de ne pas perturber de manière trop importante l'avifaune. La description de ces blocs, ainsi que le temps de réalisation estimé, sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Bloc 1 : Travaux préparatoires	Préparation du terrain	2 semaines				
	Déplacement de la fourrière	2 semaines				
	Déplacement de l'exutoire de la Step	2 semaines				
Bloc 2 : Création du nouveau canal	Excavation en pleine masse		3 mois			
	Stabilisation des berges - enrochements - géotextile			1 mois		
Bloc 3 : Mise en eau du nouveau canal	Mise en eau du nouveau canal - déplacement de la séparation - suppression de la rive - dragage de l'embouchure				1 semaine	
Bloc 4 : Remblai du canal actuel	Remblai du canal actuel - réutilisation des matériaux d'excavation - enrochements - géotextile - aménagement de la partie aval					3 mois
Bloc 5 : Divers aménagements	Réalisation des mesures environnementales Réalisation des accès pour le public	1 mois				

Sachant que les trois travaux préliminaires peuvent être réalisés en parallèle, le temps total de réalisation des travaux est ainsi estimé à 7 mois et 3 semaines.

De même, l'ensemble des mesures environnementales pourra être effectué en parallèle aux travaux de réalisation du nouveau canal, notamment l'aménagement des roselières et la mise en place des nichoirs dans le lac.

ANNEXE 1 : Dimensionnement hydraulique et technique du nouveau canal de la Broye

Gabarit : le nouveau canal de la Broye aura le même gabarit que le gabarit actuel de la Broye.

Habillage du fond et des berges : Les calculs numériques de la crue de période de retour centennale montrent les éléments suivants :

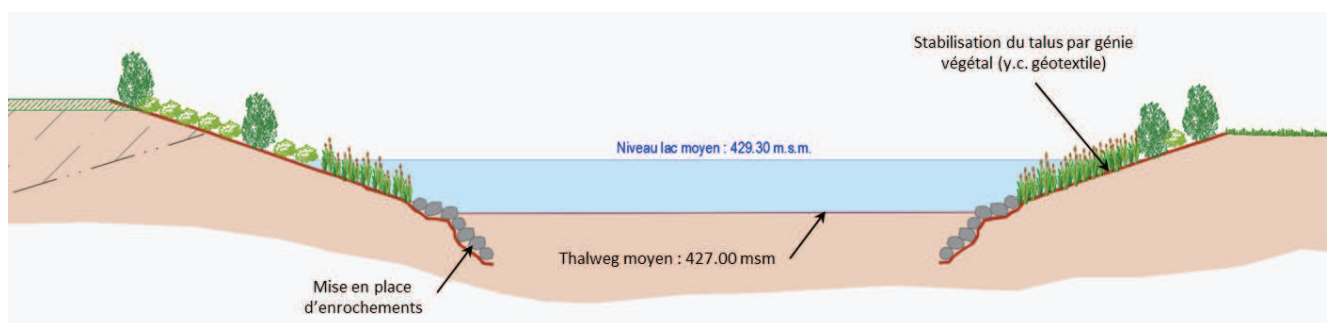
- Le diamètre stable (i.e. diamètre à partir duquel on observe de l'érosion) pour une crue centennale (HQ100) est de l'ordre de 10-20 cm
- Le diamètre stable (i.e. diamètre à partir duquel on observe de l'érosion) pour une crue décennale (HQ10) est de l'ordre de 1 cm
- Le potentiel max. d'affouillement observé sur certains secteurs de la zone à protéger est d'environ 1.5 m, concentré plutôt vers la future zone à dynamique alluviale.

Etant donné la proximité du lac et les dépôts de sédiments fins apportés par la Broye, et en tenant compte d'une marge de sécurité sur le potentiel d'affouillement lors de HQ100, il est proposé de ne pas instaurer une couche de matériaux grossiers (graviers) sur le thalweg, mais d'accepter une certaine variabilité du fond au gré des crues et des apports, et de plutôt protéger les pieds de talus sur 2 mètres de profondeur (les enrochements seront enfouillés et donc pas visibles).

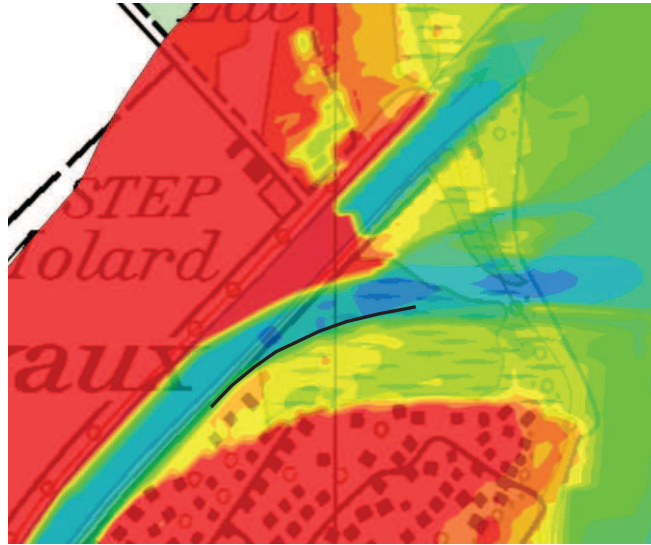
Diamètres stables et potentiel d'affouillement pour HQ100 :

Compte tenu des vitesses moyennes d'écoulement en cas de crue (~ 1 m/s pour la crue annuelle et < 4 m/s en cas de crue de période de retour de 300 ans), et en adéquation avec le profil type de la Broye actuelle plus en amont, la partie supérieure sera protégée par du génie végétal.

L'habillage du profil type est présenté ci-après.



Les vitesses moyennes d'écoulement ainsi que le potentiel d'affouillement pour HQ100 sont présentés ci-après sur différents profils en long.



Localisation du profil en long

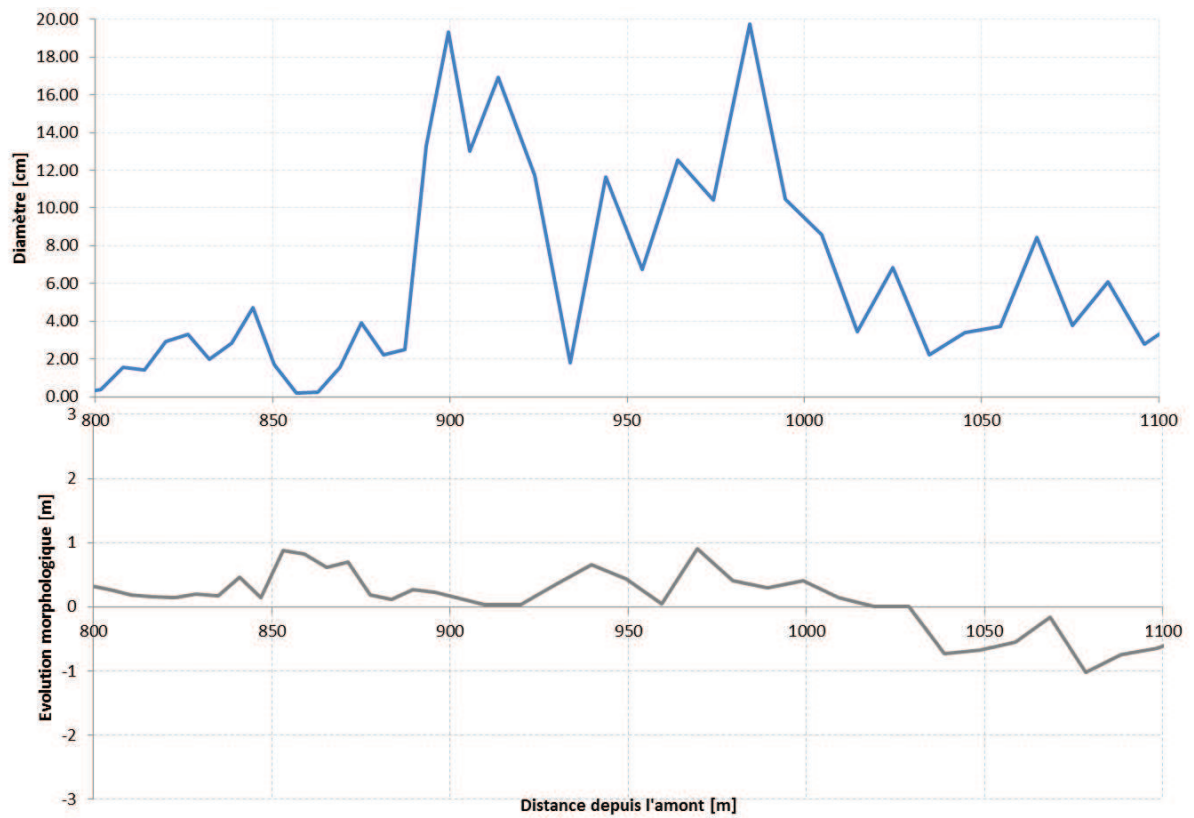
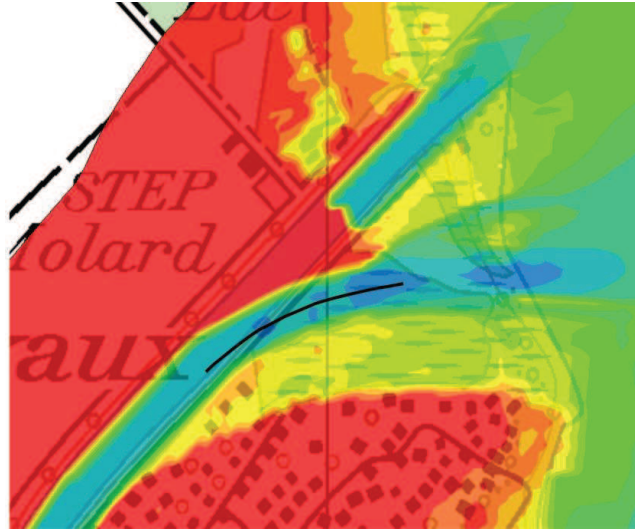


Figure : Diamètre stable et évolution morphologique du pied du talus en rive droite lors de HQ 100



Localisation du profil en long

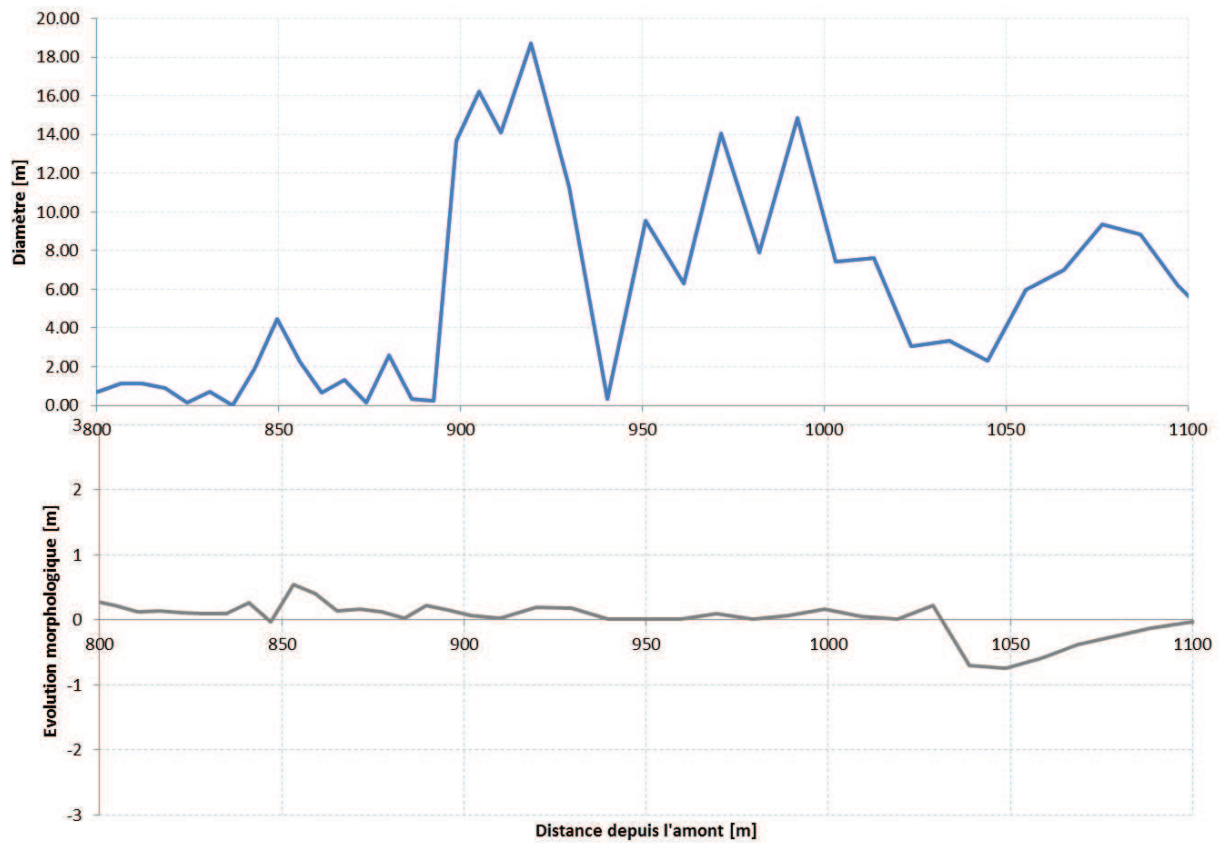
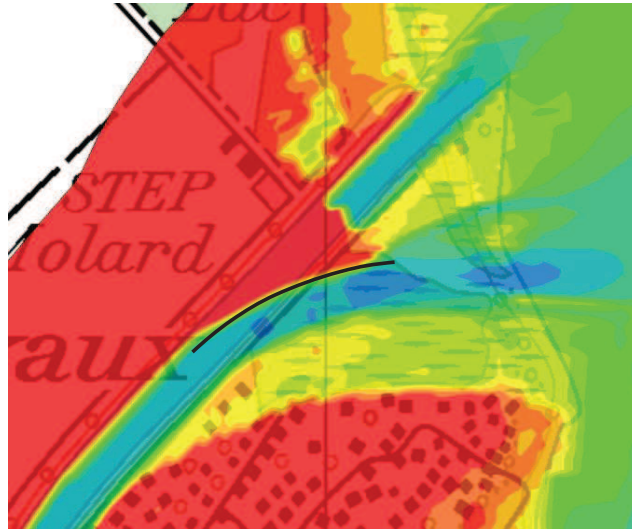


Figure : Diamètre stable et évolution morphologique du thalweg au centre lors de HQ 100



Localisation du profil en long

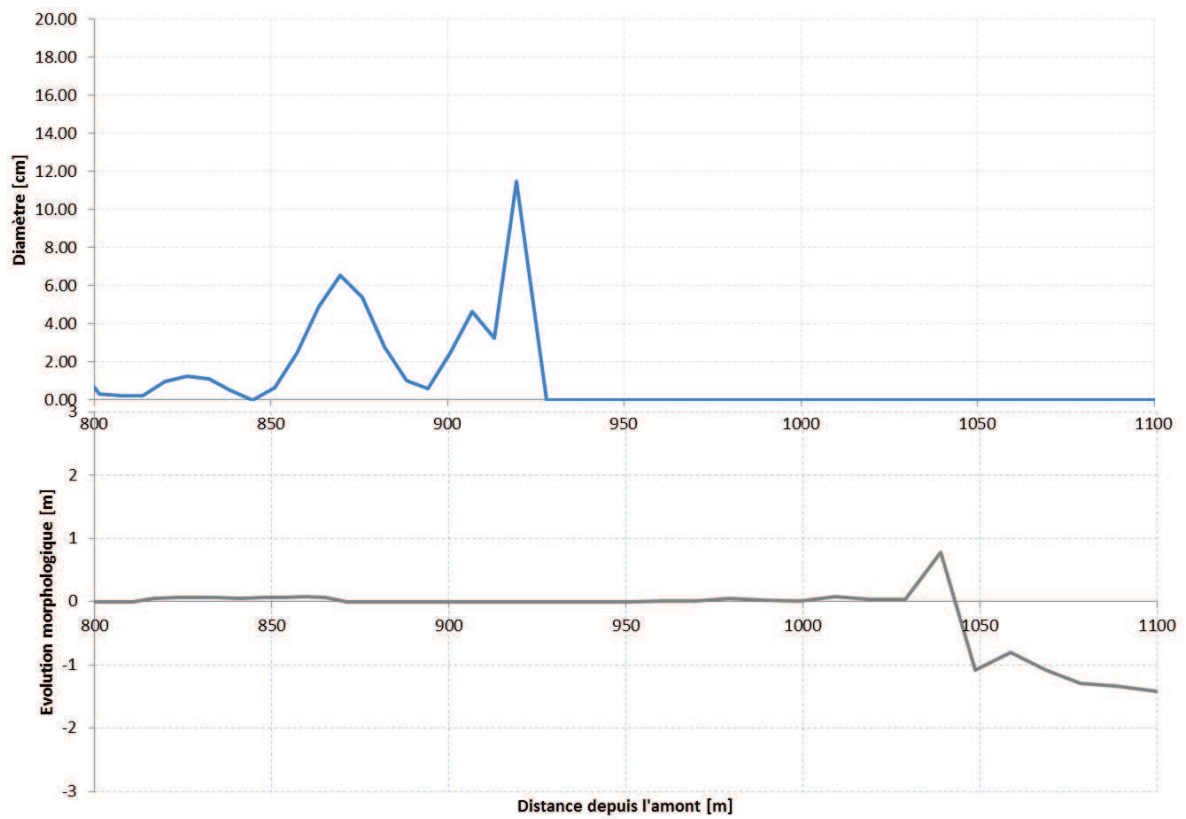
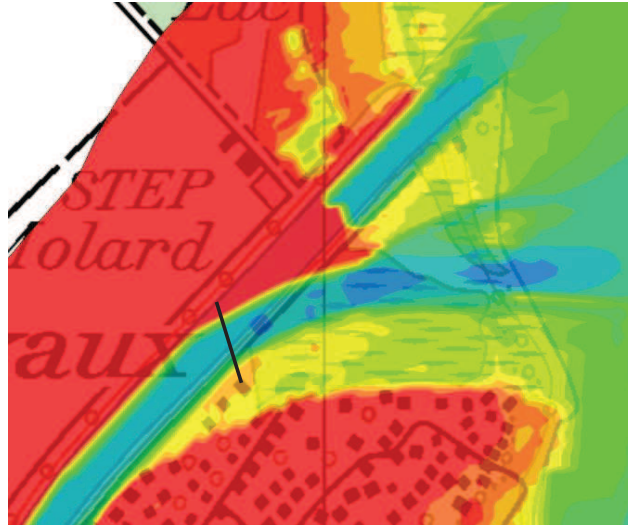


Figure : Diamètre stable et évolution morphologique du pied du talus en rive gauche lors de HQ100



Localisation du profil en travers

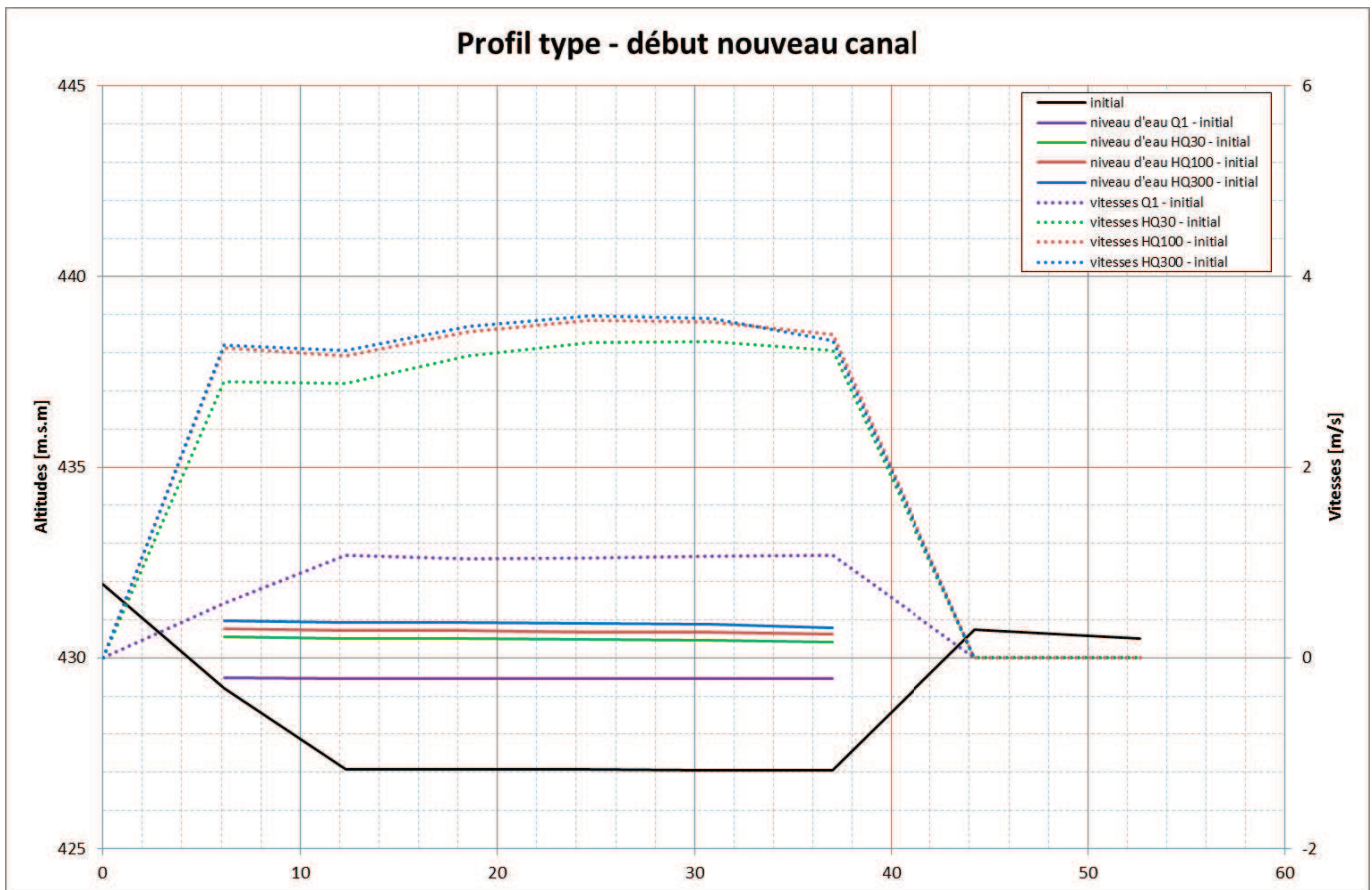
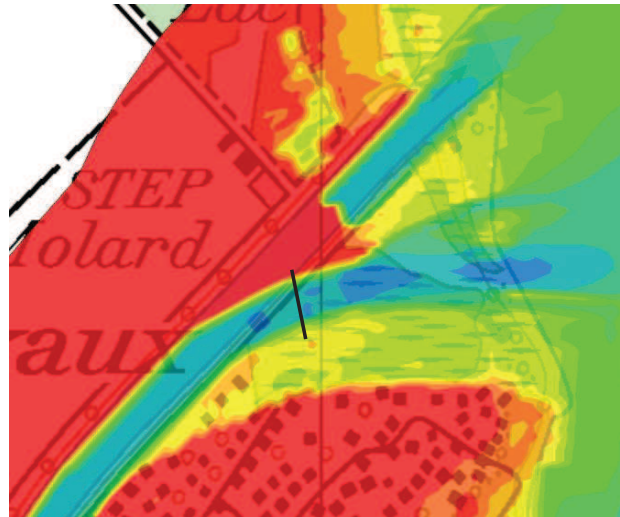


Figure : Vitesses moyennes d'écoulement et niveaux d'eau pour HQ1, HQ30, HQ100, HQ300



Localisation du profil en travers

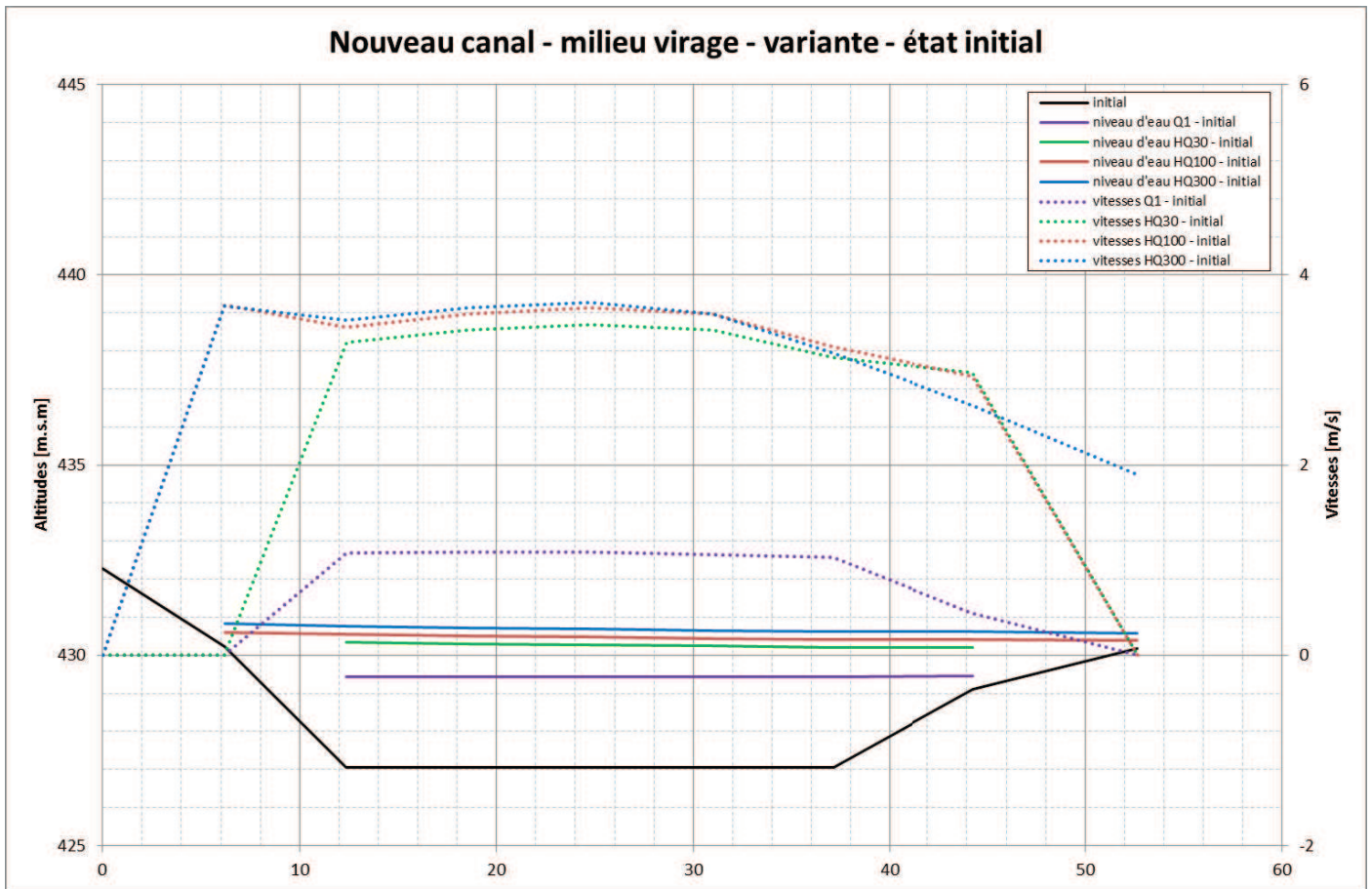
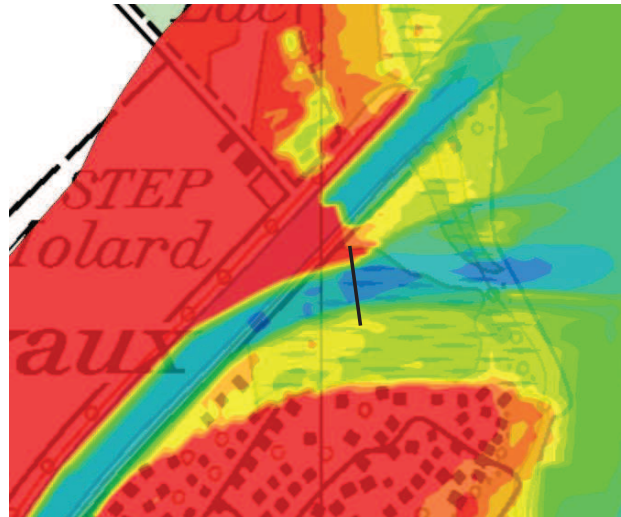


Figure : Vitesses moyennes d'écoulement et niveaux d'eau pour HQ1, HQ30, HQ100, HQ300



Localisation du profil en travers

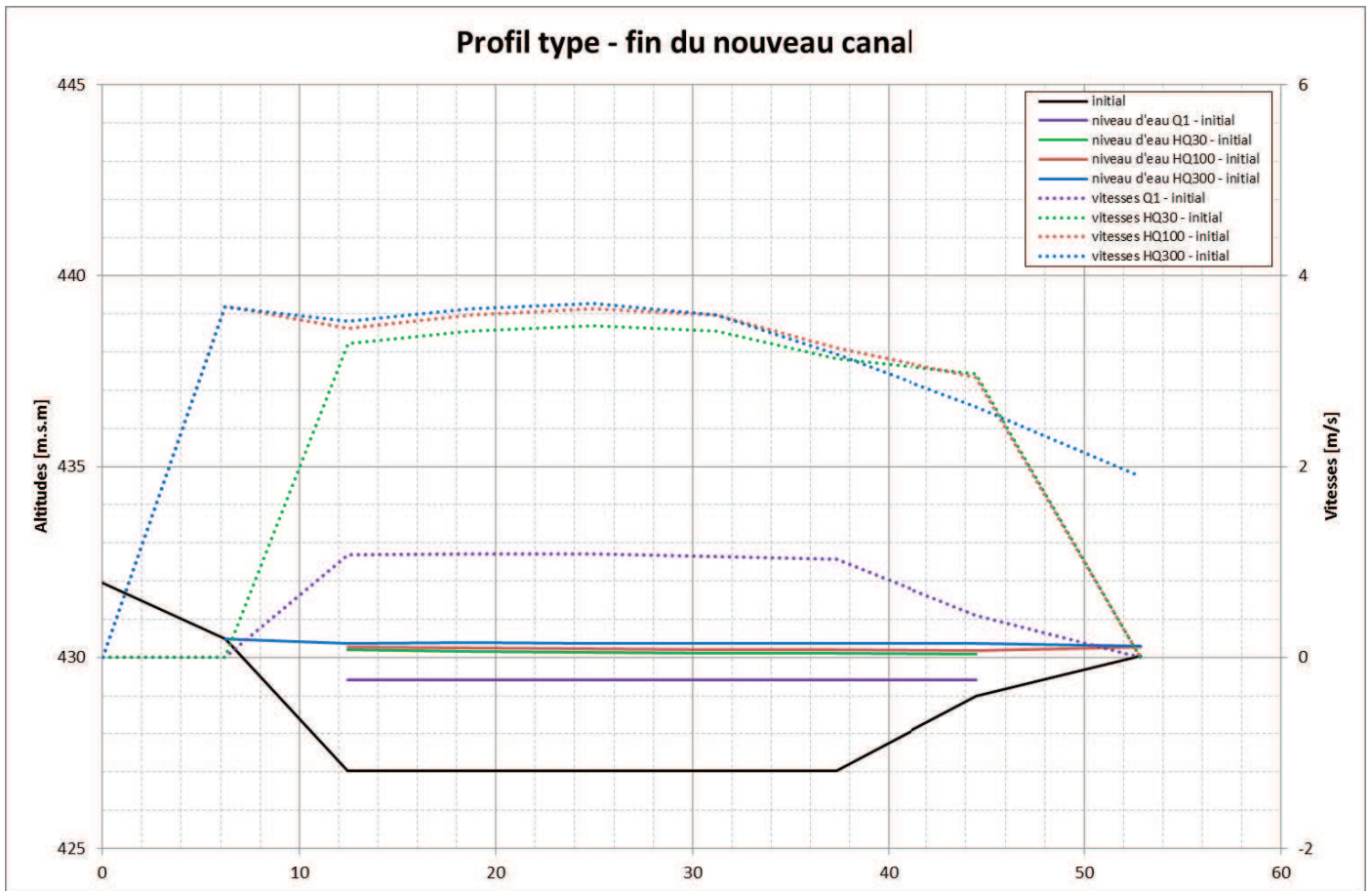


Figure : Vitesses moyennes d'écoulement et niveaux d'eau pour HQ1, HQ30, HQ100, HQ300



ANNEXE 2 : Etude des rejets de la STEP

Les calculs ont été réalisés pour les différents scénarii suivants :

Scénario « Type » :

Niveau du lac : 429.30 msm

Charge à l'exutoire : 429.80 msm

Débit dans la Broye : HQ1

Débit de la STEP :

$$Q_{\text{pointe}} = 18 \text{ L/s}$$

$$Q_{\text{journalier}} = 800 \text{ m}^3/\text{j}$$

Scénario « Haut » :

Niveau du lac : 429.50 msm

Charge à l'exutoire : 431.00 msm

Débit dans la Broye : HQ1

Débit de la STEP :

$$Q_{\text{pointe}} = 18 \text{ L/s}$$

$$Q_{\text{journalier}} = 800 \text{ m}^3/\text{j}$$

Scénario « Extrême » :

Niveau du lac : 429.50 msm

Charge à l'exutoire : 432.80 msm

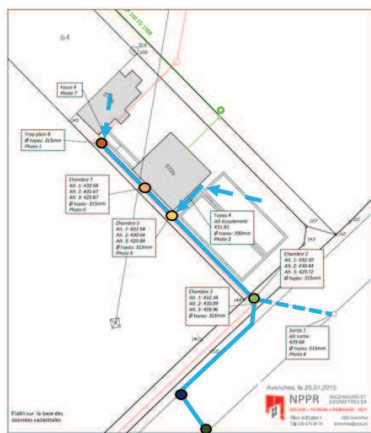
Débit dans la Broye : HQ100

Débit de la STEP :

$$Q_{\text{pointe}} = 18 \text{ L/s}$$

$$Q_{\text{journalier}} = 800 \text{ m}^3/\text{j}$$

Une comparaison des niveaux d'eau en différents points, pour les deux configurations (état actuel et état futur) et pour les différents scénarii, est présentée dans le tableau ci-après. Seule l'exutoire et le dernier regard seraient concernés par des risques de débordement, en situation extrême pour un lac très haut et une crue centennale dans la Broye.



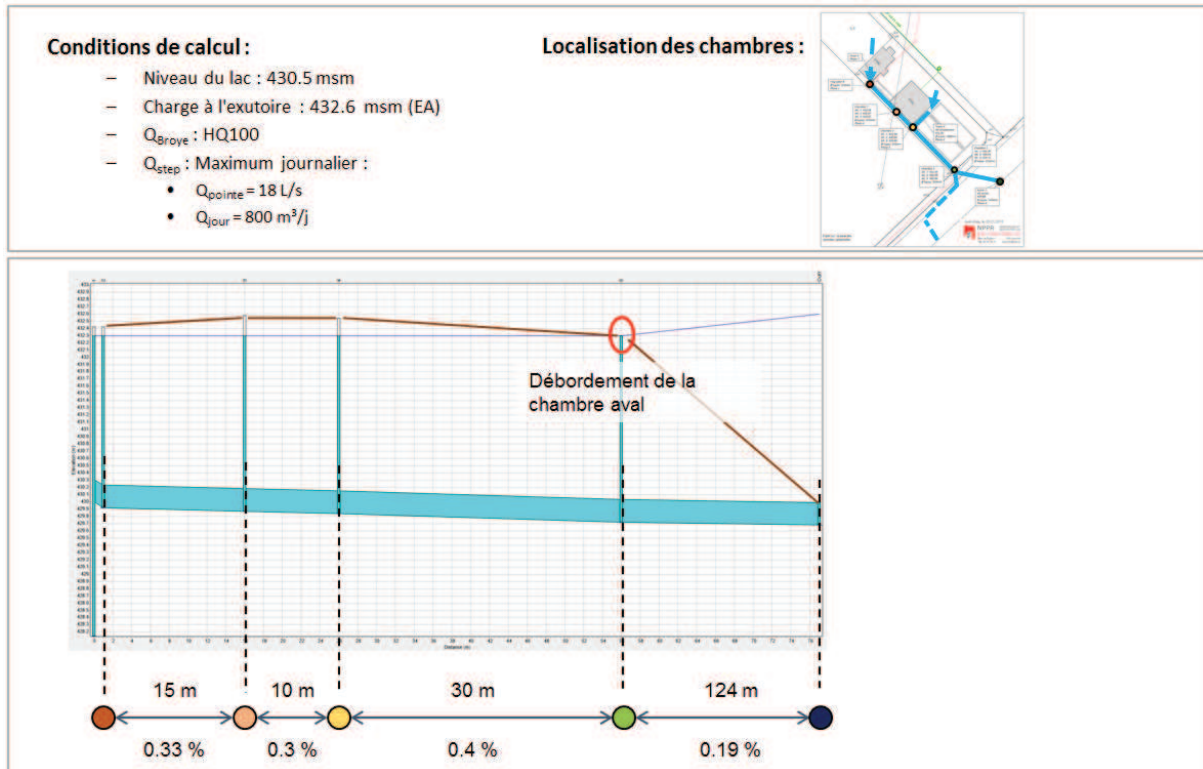
		Trop plein 8	Chambre 7	Tuyau 4	Chambre 5	Chambre 2	Chambre nv	Sortie
Altitude du haut		432.42	432.58	432.51	432.54	432.3	432.18	EA : 429.995 CL : 429.95
Scénario	Etat							
Type	Actuel	429.92	429.92	431.86	429.92	429.82	-	429.8
	Cond. longue	429.92	429.92	431.86	429.92	429.81	429.8	429.8
Haut	Actuel	431.01	431.01	431.86	431.01	431	-	431
	Cond. longue	431.03	431.03	431.86	431.03	431.03	431	431
Extrême	Actuel	432.31	432.31	432.31	432.31	432.3	-	432.6
	Cond. longue	432.19	432.19	432.19	432.19	432.18	432.18	432.8



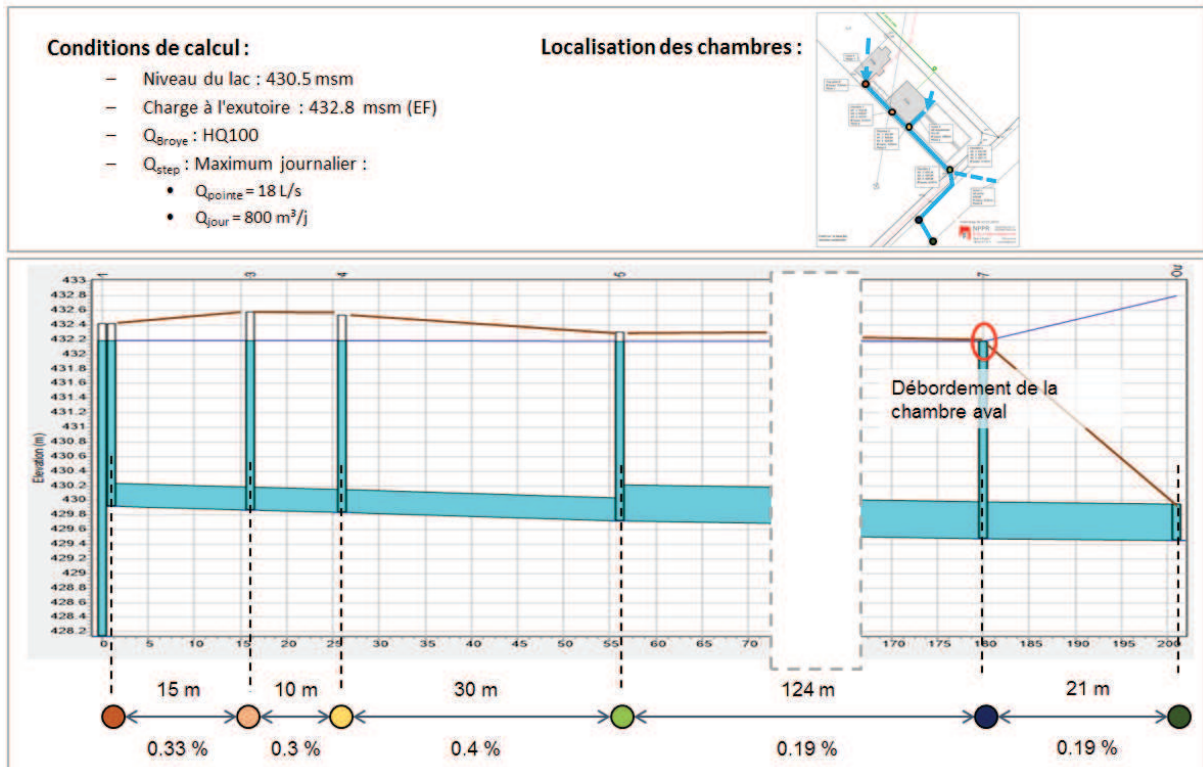
: Débordement
 : Risque de débordement

Les lignes d'eau obtenues pour le scénario « Extrême » sont présentées sur la figure ci-après pour l'état actuel et pour l'état après travaux.

Configuration actuelle :



Configuration future :





Les caractéristiques des bateaux amarrés aux bouées en pleine eau sont présentées sur le tableau ci-après. Les numéros en rouge sont les bouées qui devront être déplacée dans l'état futur.

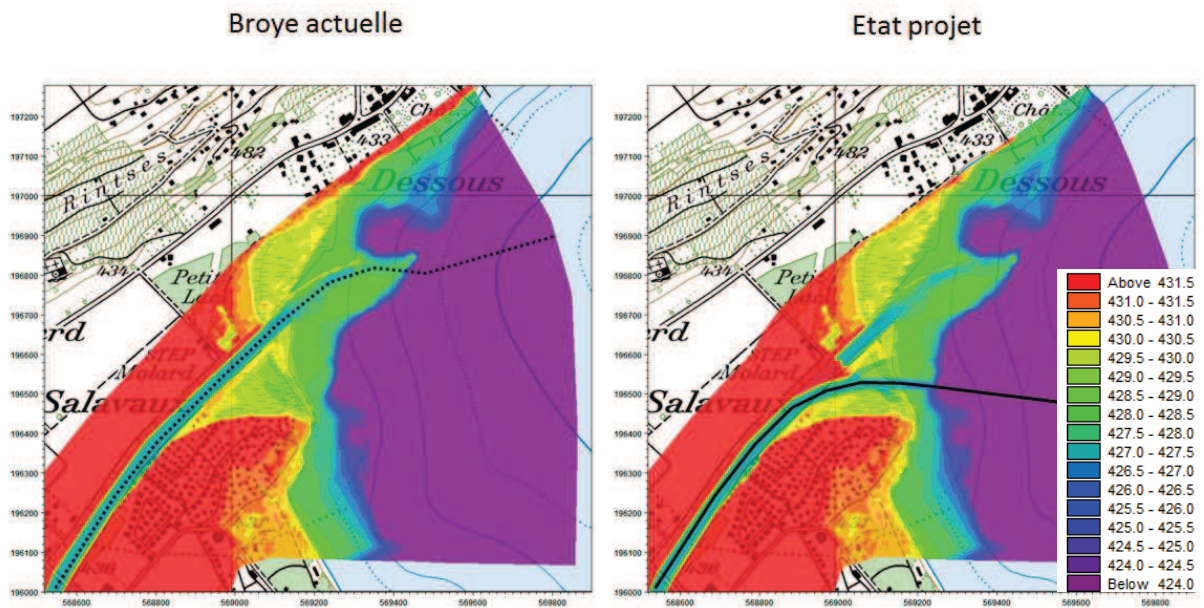
Bouée n°	N° bateau	Remarque	Dimension
218		pas de bouée	10.04 x 3.49
219	-		
220	9749		6.70 x 2.25
221	25125		5.65 x 2.20
222	14798		4.85 x 2.10
223	-		
224	27932	manque plaquette	5.64 x 2.19
225	-	bouée mauvais état	
226	27048		6.53 x 2.16
227	-	pas de bouée	
228			
229	-		
230	17903		6.10 x 1.90
231	-		
232	26561		5.03 x 2.16
233	FR3869		
234	-	pas de bouée	
235	-		
236	26392		6.0 x 2.28
237	-		
238	-		
239	-		
333	-	pas de bouée	
373	23942		6.35 x 2.32

ANNEXE 4 : Evolution du risque d'inondation pour HQ100

4.1 Etat initial sans dépôts

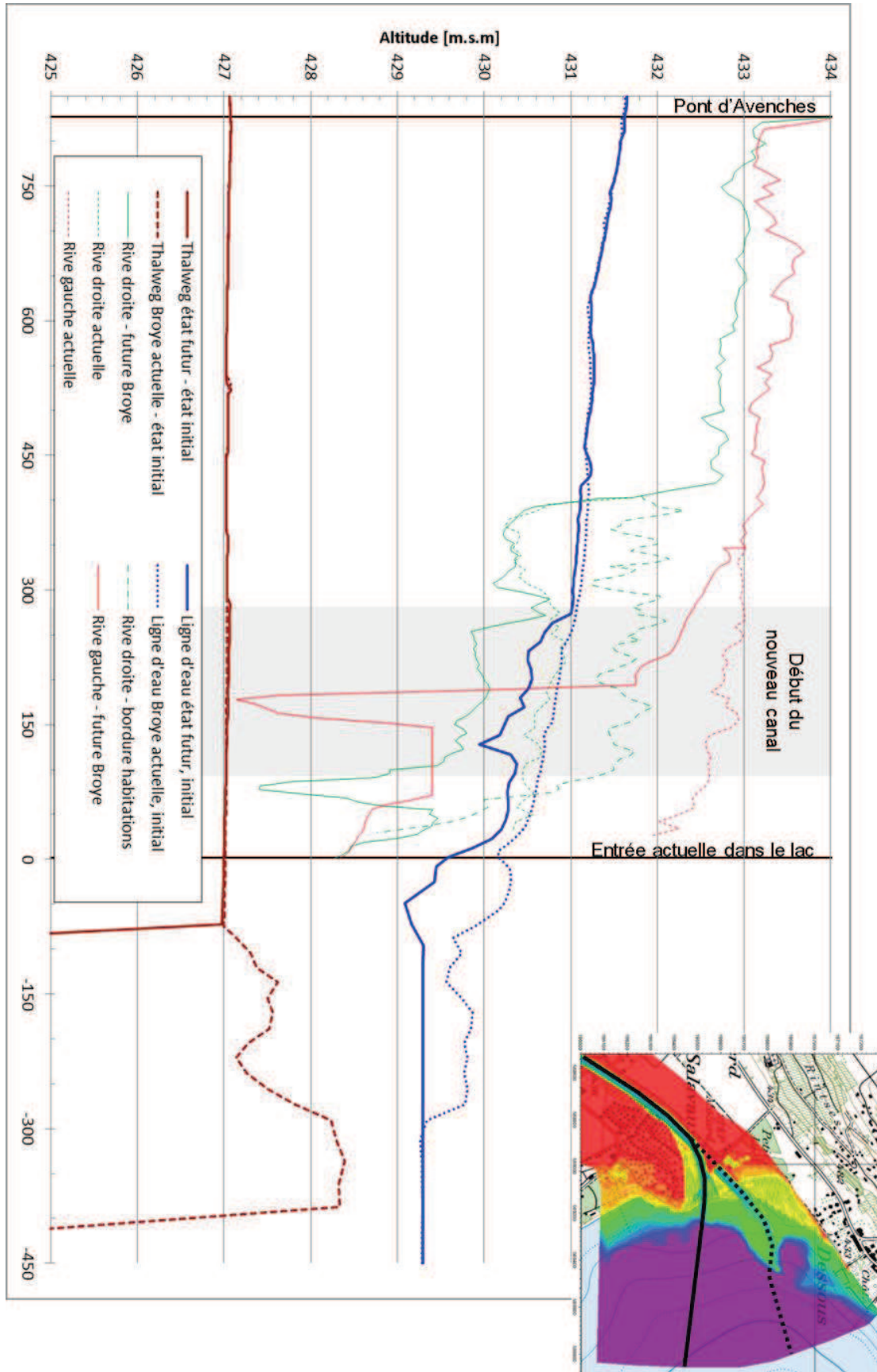
4.1.1 Bathymétries

Les bathymétries utilisées lors des calculs des lignes d'eau figurent ci-après. Il s'agit de la bathymétrie actuelle (sans delta) et de la bathymétrie du futur canal de suite après travaux.





4.1.2 Comparaison des lignes d'eau HQ100 (avec et sans renaturation) :

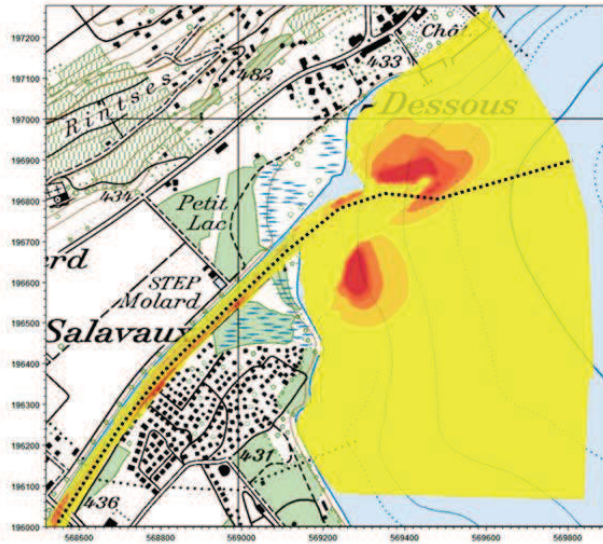


4.2 Etat morphologique dans 10 ans

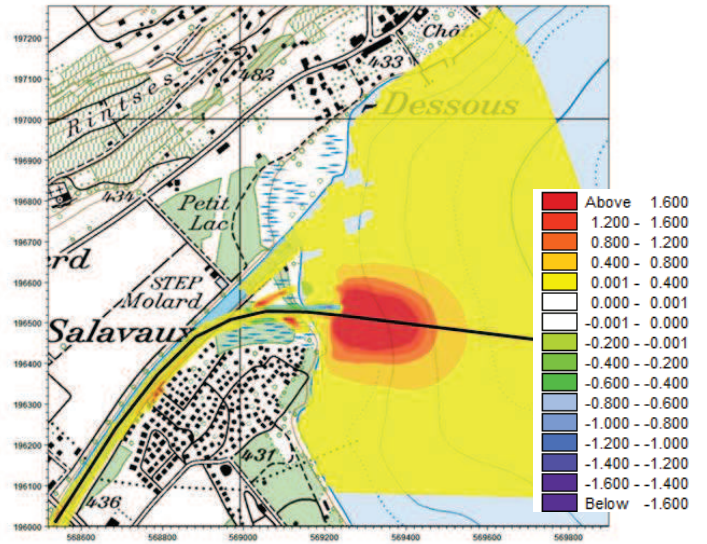
4.2.1 Comparaison des dépôts

Etat avant HQ100

Etat actuel – après 10 ans

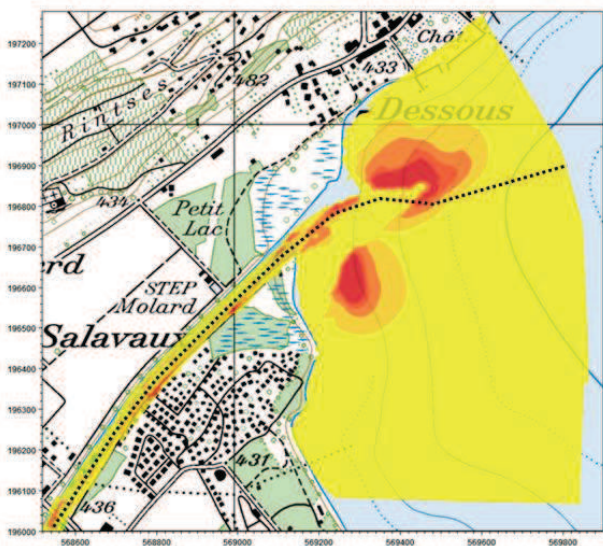


Etat projet – après 10 ans

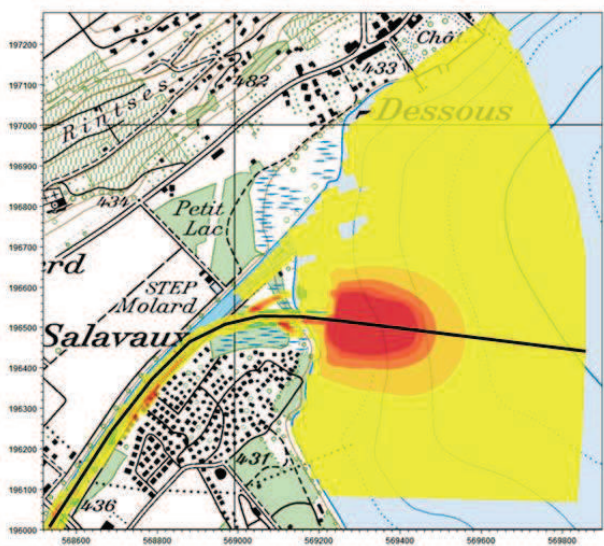


Etat après HQ100

Etat actuel – après 10 ans



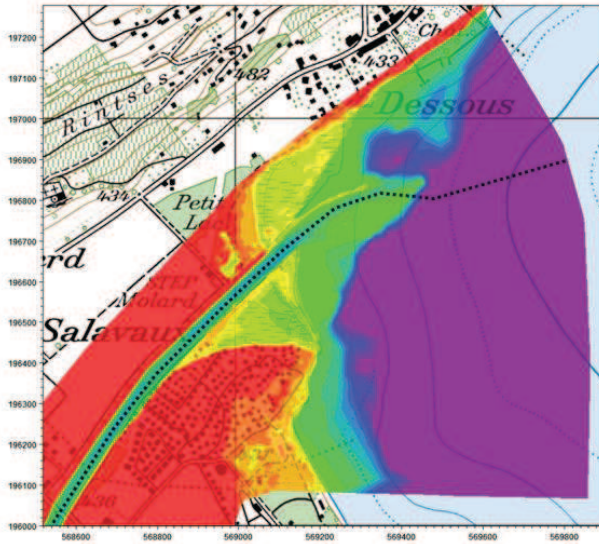
Etat projet – après 10 ans



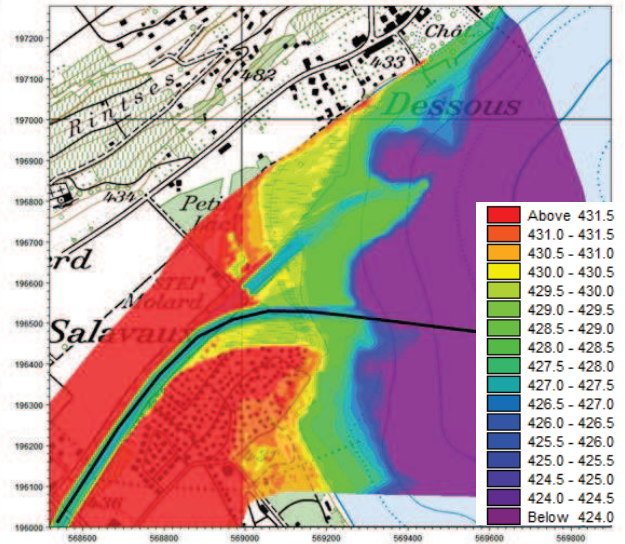
4.2.2 Comparaison des bathymétries

Bathymétrie après 10 ans – avant HQ100

Etat actuel – après 10 ans

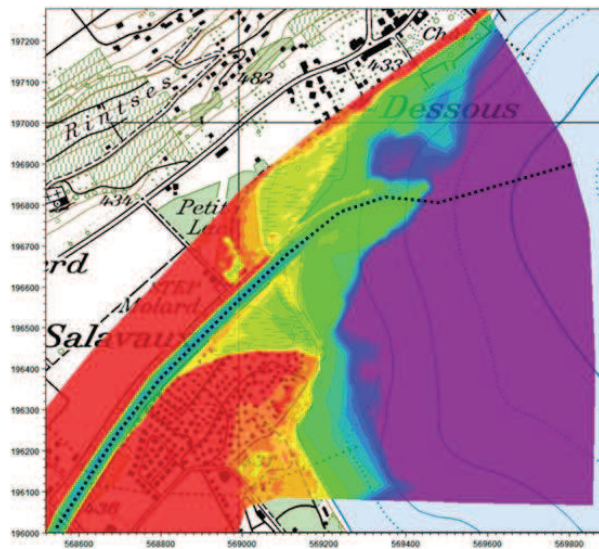


Etat projet – après 10 ans

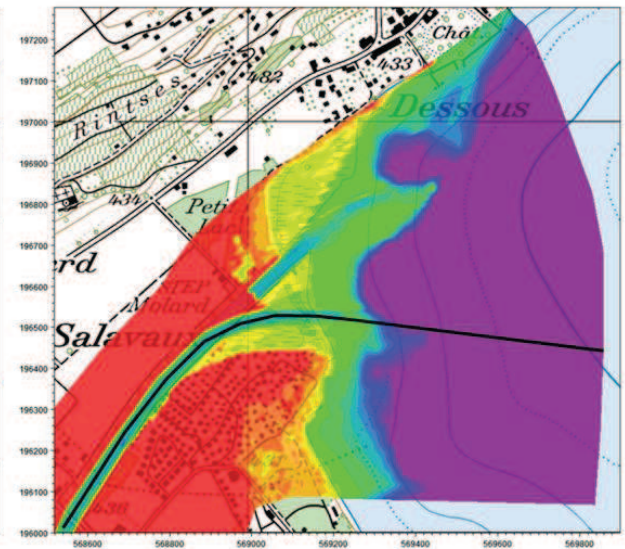


Bathymétrie après 10 ans – après HQ100

Etat actuel – après 10 ans

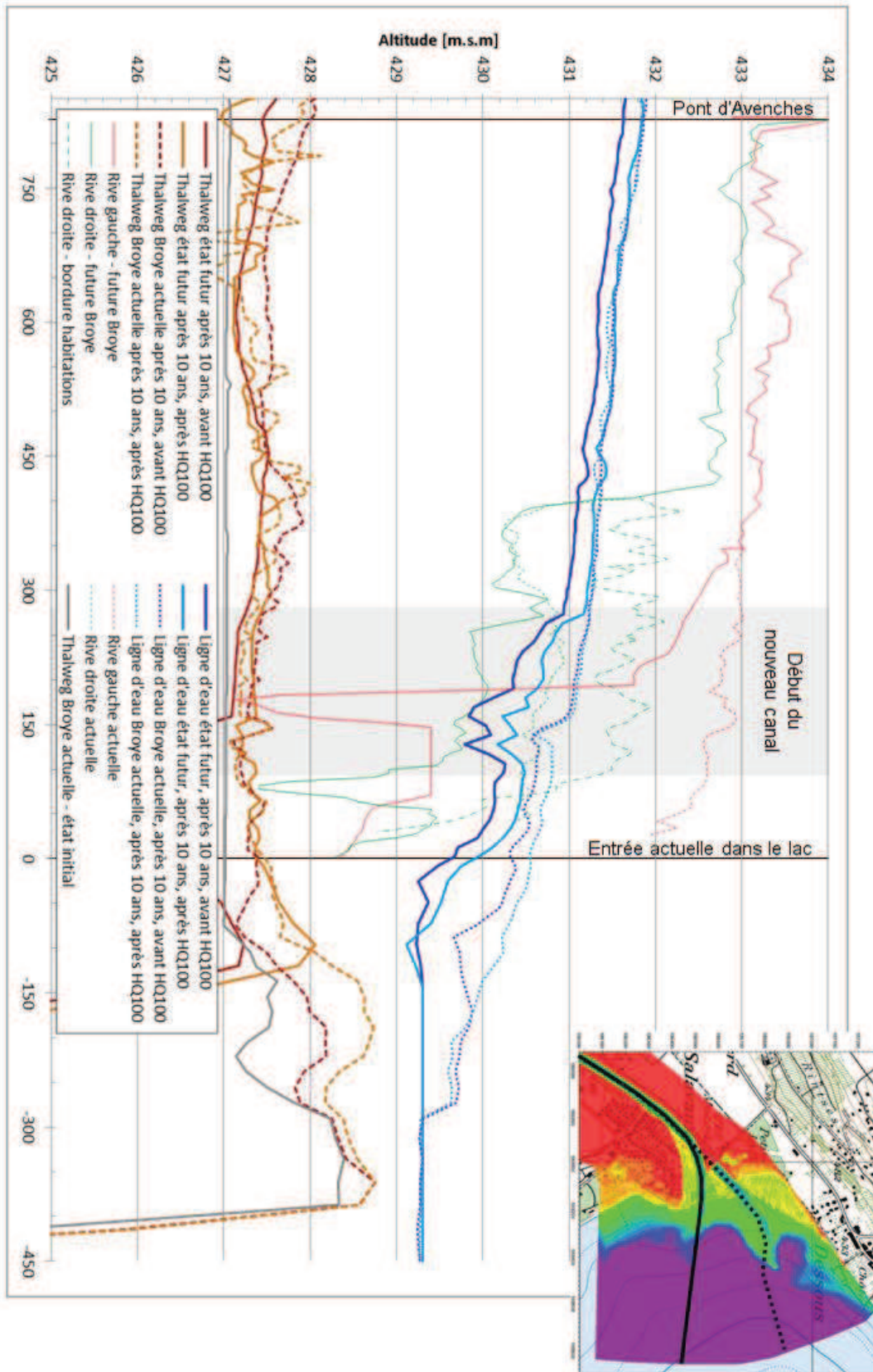


Etat projet – après 10 ans





4.2.3 Comparaison des lignes d'eau

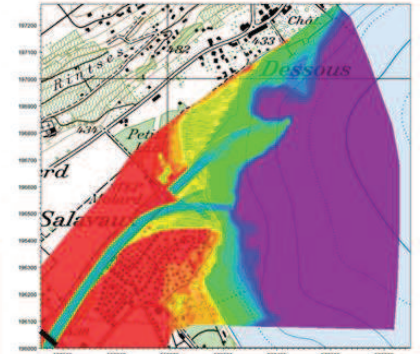
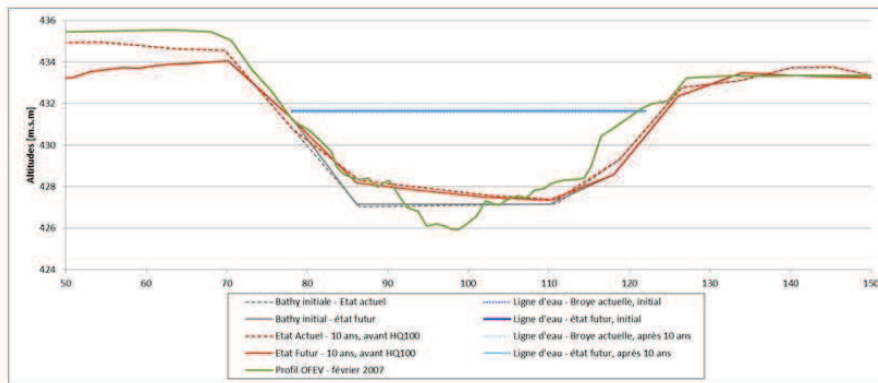




4.2.4 Evolution des profils en travers

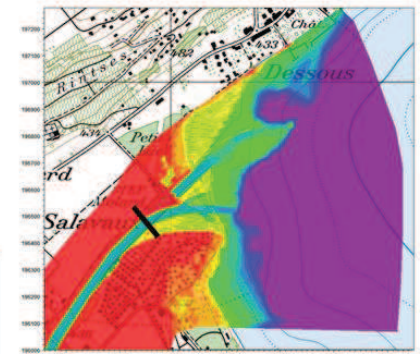
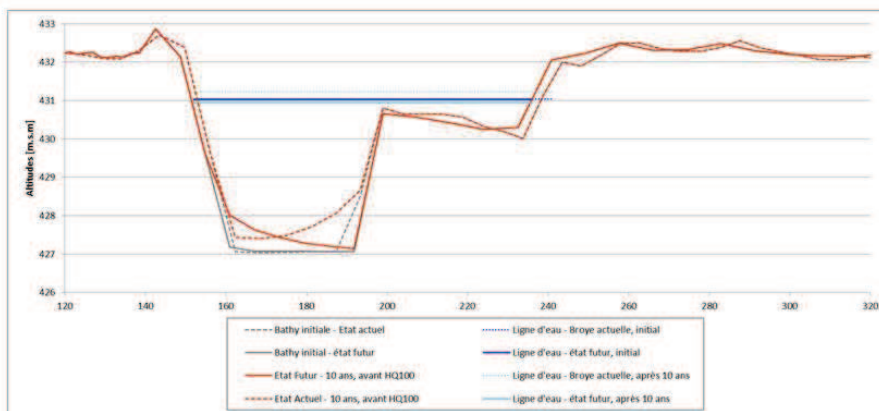
Profil situé au niveau du pont d'Avenches

Pont d'Avenches	Broye actuelle	Etat futur
Initial	431.61	431.65
Après 10 ans, avant HQ100	431.78	431.63
Après 10 ans, après HQ100	431.84	431.85



Profil situé à l'entrée du nouveau bras

Amont nouveau bras	Broye actuelle	Etat futur
Initial	431.04	431.03
Après 10 ans, avant HQ100	431.22	430.95
Après 10 ans, après HQ100	431.23	431.20

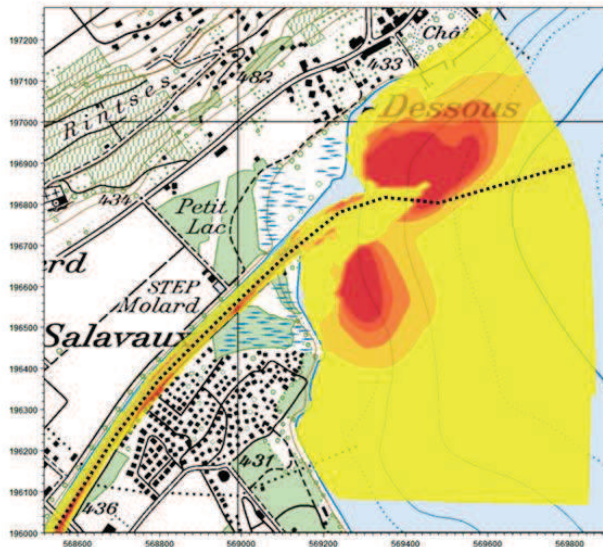


4.3. Etat morphologique dans 20 ans

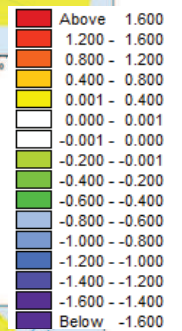
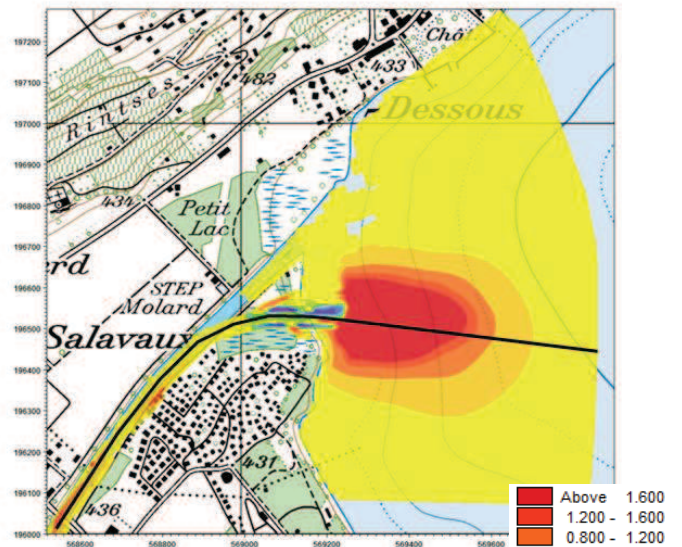
4.3.1. Comparaison des dépôts

Etat avant HQ100

Etat actuel – après 20 ans

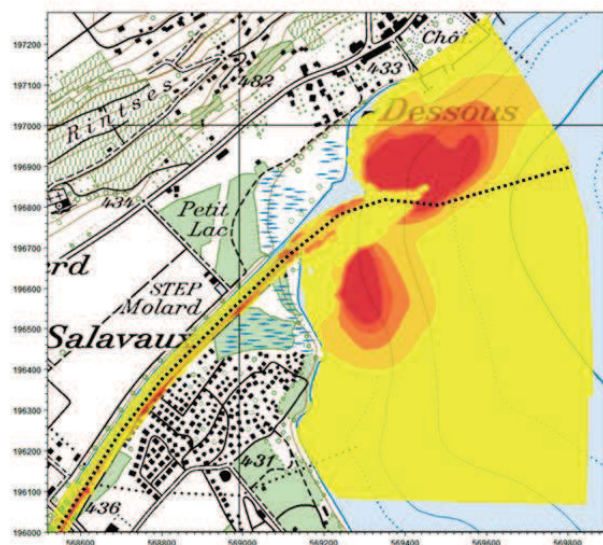


Etat projet – après 20 ans

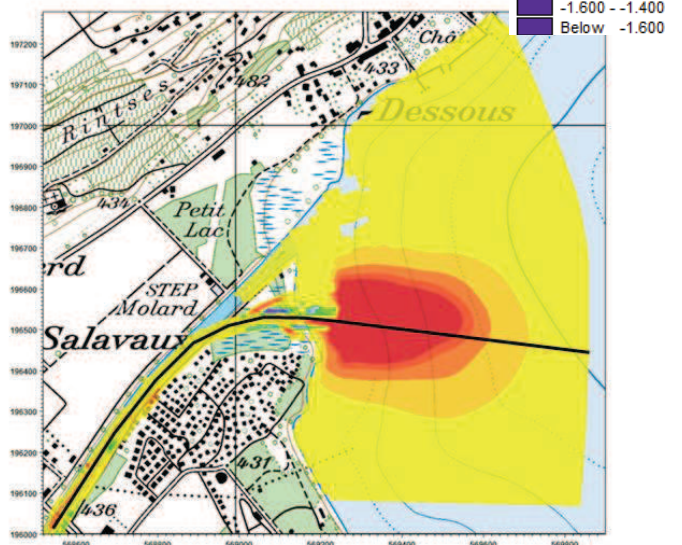


Etat après HQ100

Etat actuel – après 20 ans



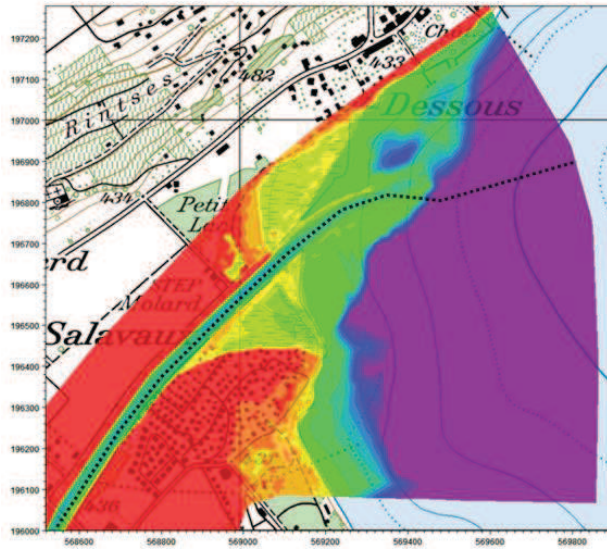
Etat projet – après 20 ans



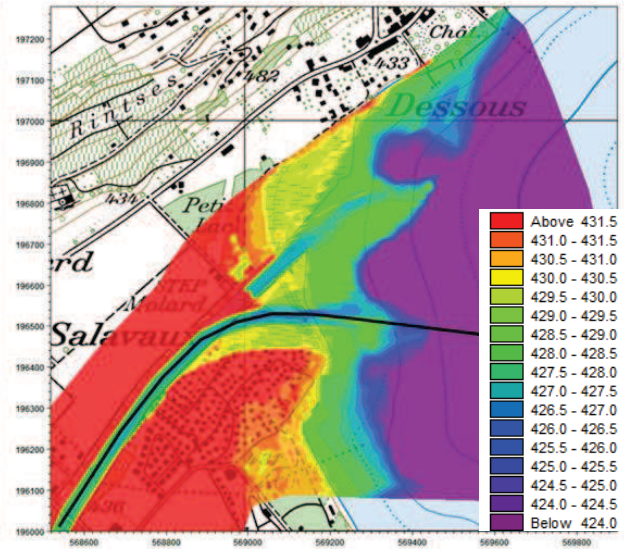
4.3.2 Comparaison des bathymétries

Bathymétrie après 20 ans – avant HQ100

Etat actuel – après 20 ans

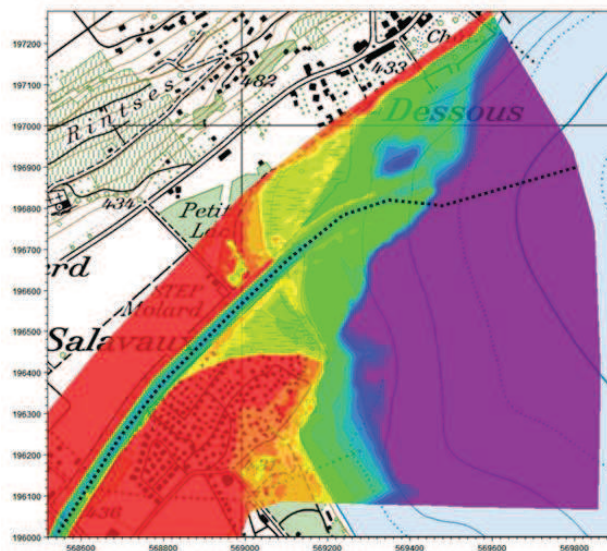


Etat projet – après 20 ans

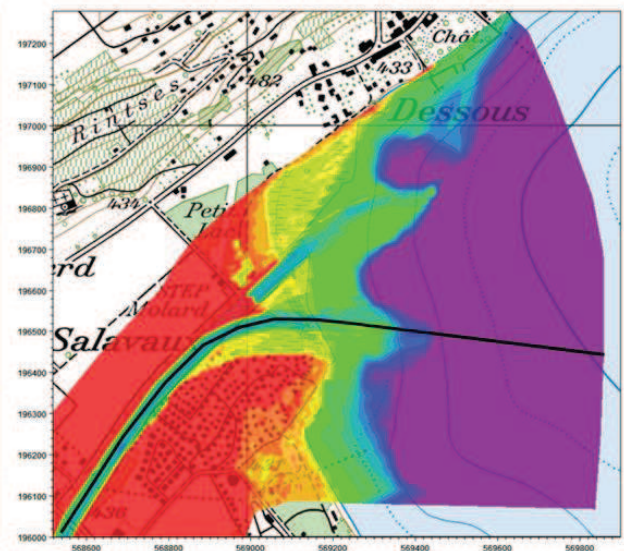


Bathymétrie après 20 ans – après HQ100

Etat actuel – après 20 ans

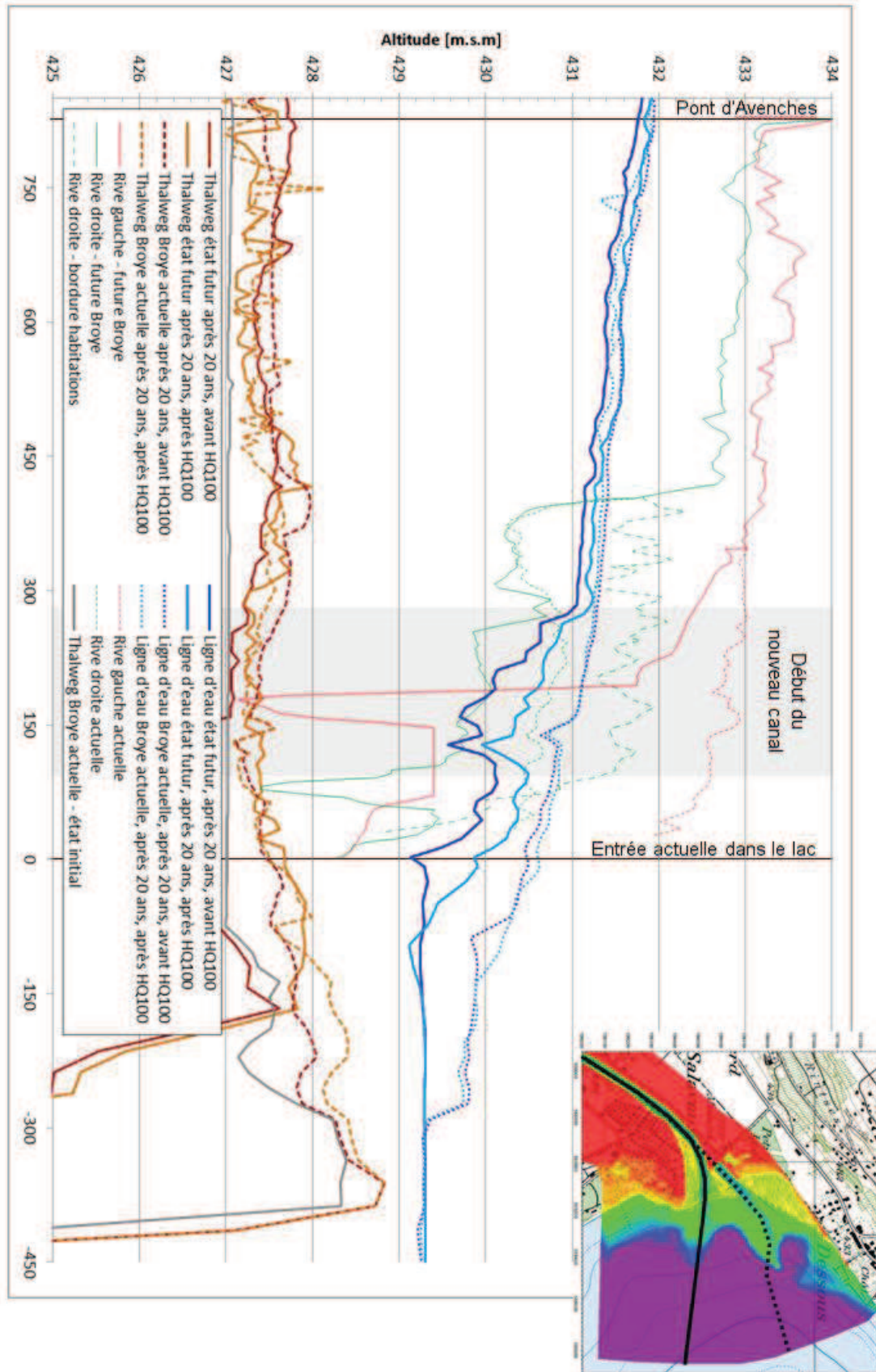


Etat projet – après 20 ans





4.3.3 Comparaison des lignes d'eau

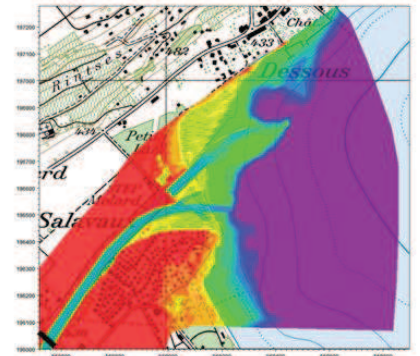
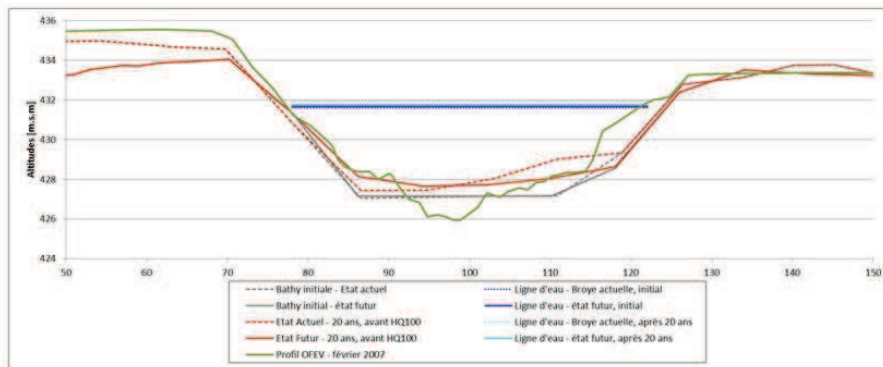




4.3.4 Comparaison des profils en travers

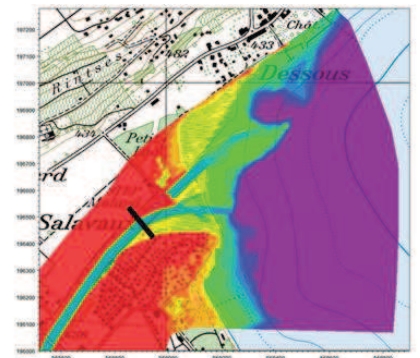
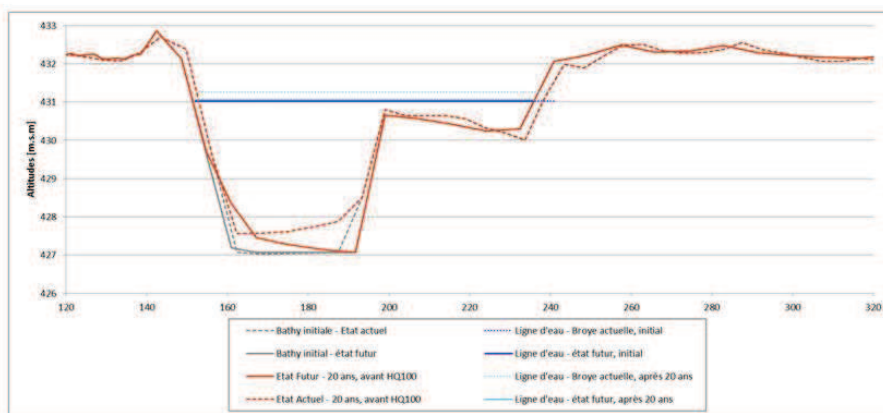
Profil situé au niveau du pont d'Avenches

Pont d'Avenches	Broye actuelle	Etat futur
Initial	431.61	431.65
Après 20 ans, avant HQ100	431.94	431.77
Après 20 ans, après HQ100	431.90	431.85



Profil situé à l'entrée du nouveau bras

Amont nouveau bras	Broye actuelle	Etat futur
Initial	431.04	431.03
Après 20 ans, avant HQ100	431.27	431.05
Après 20 ans, après HQ100	431.24	431.22



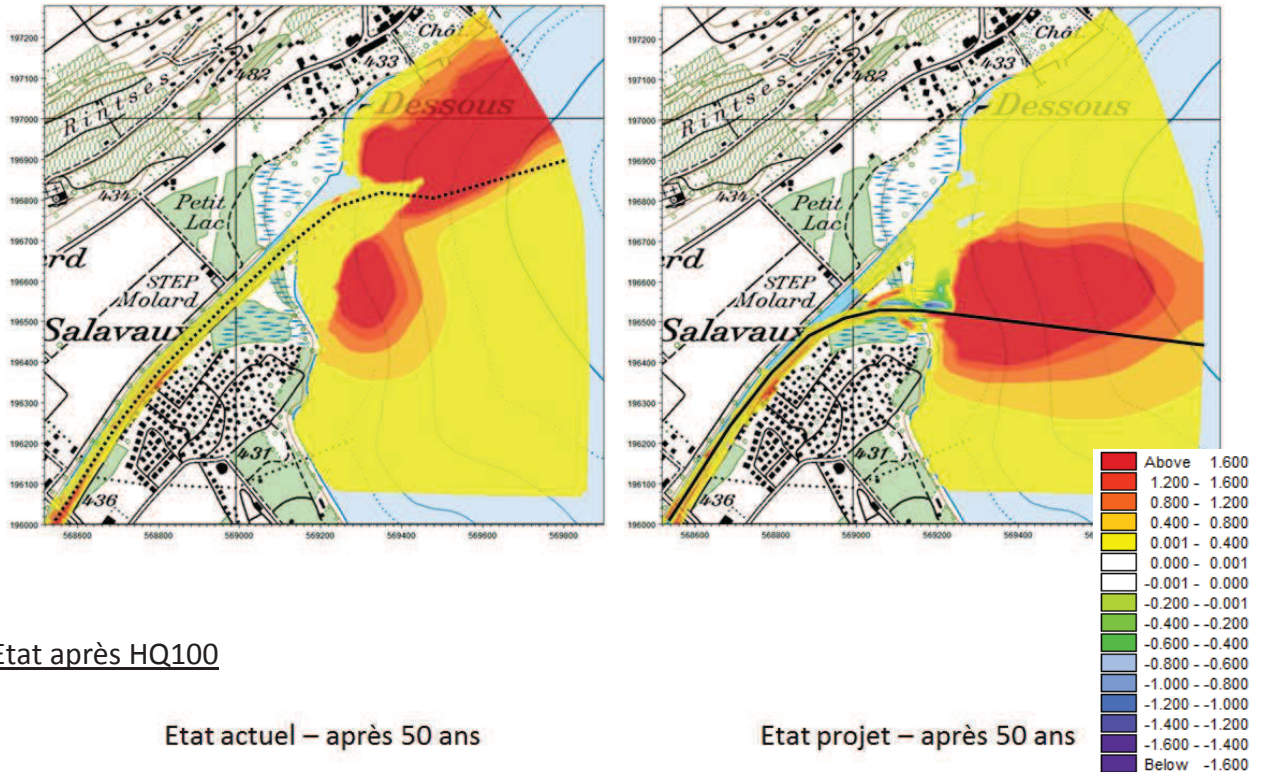
4.4 Etat morphologique dans 50 ans

4.4.1 Comparaison des dépôts

Etat avant HQ100

Etat actuel – après 50 ans

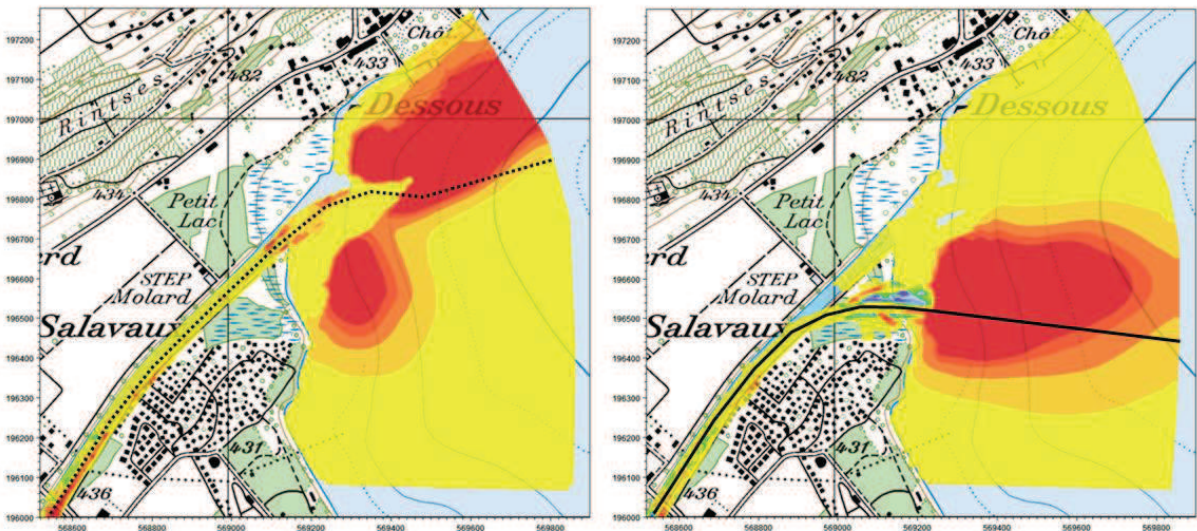
Etat projet – après 50 ans



Etat après HQ100

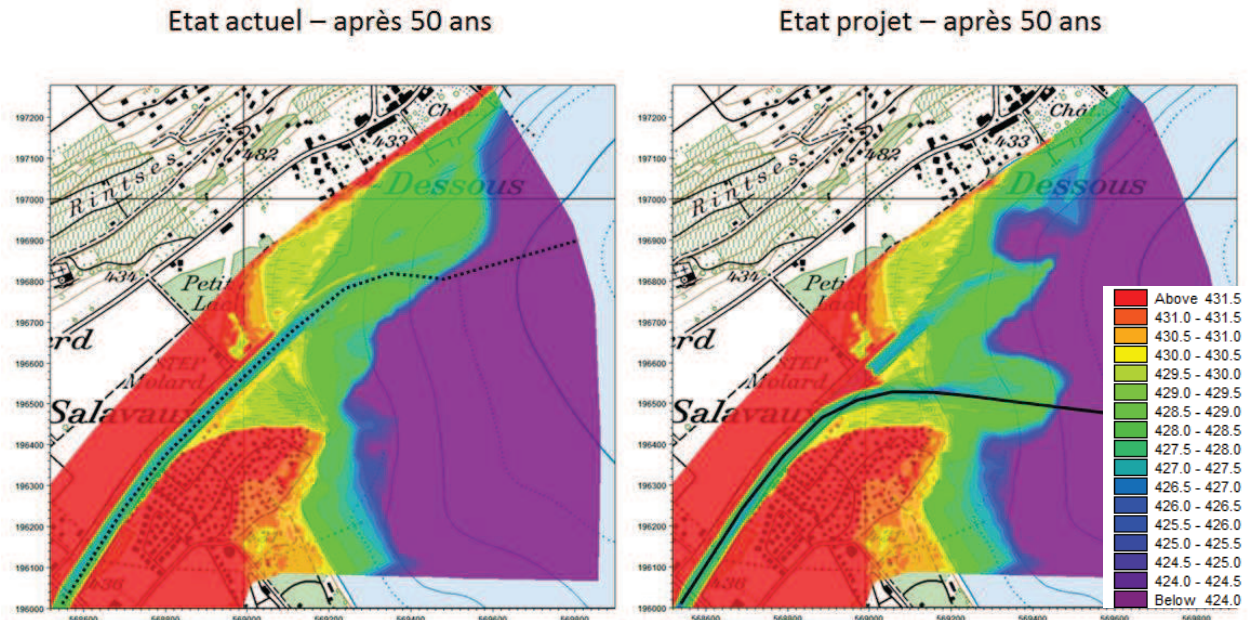
Etat actuel – après 50 ans

Etat projet – après 50 ans

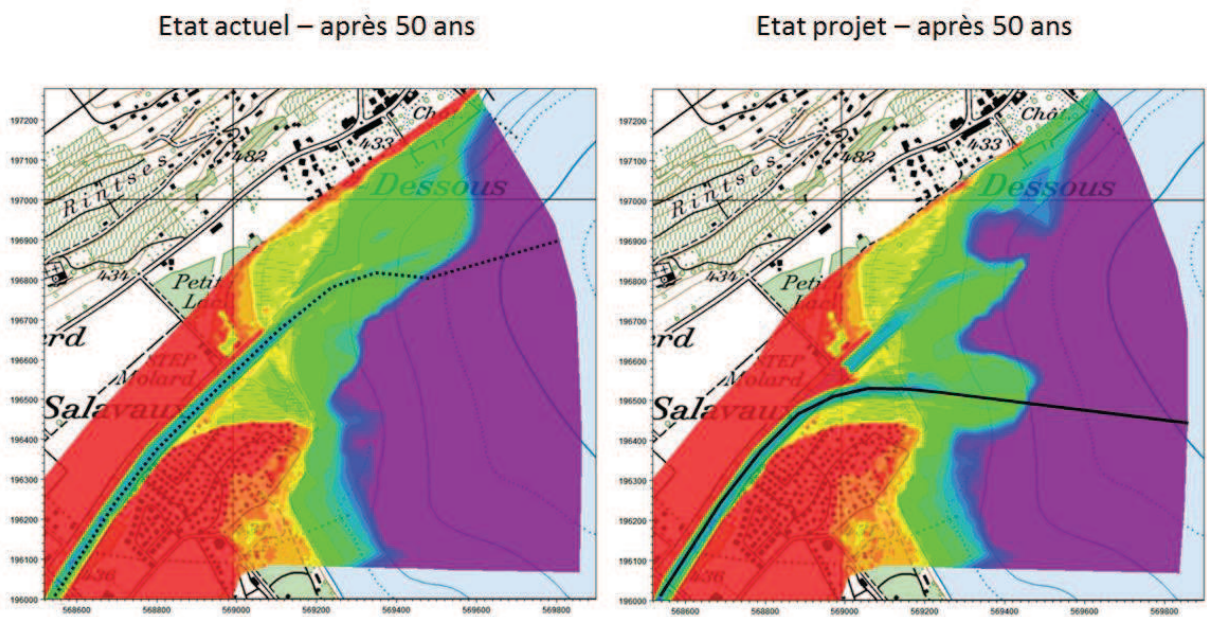


4.4.2. Comparaison des bathymétries

Bathymétrie après 50 ans – avant HQ100

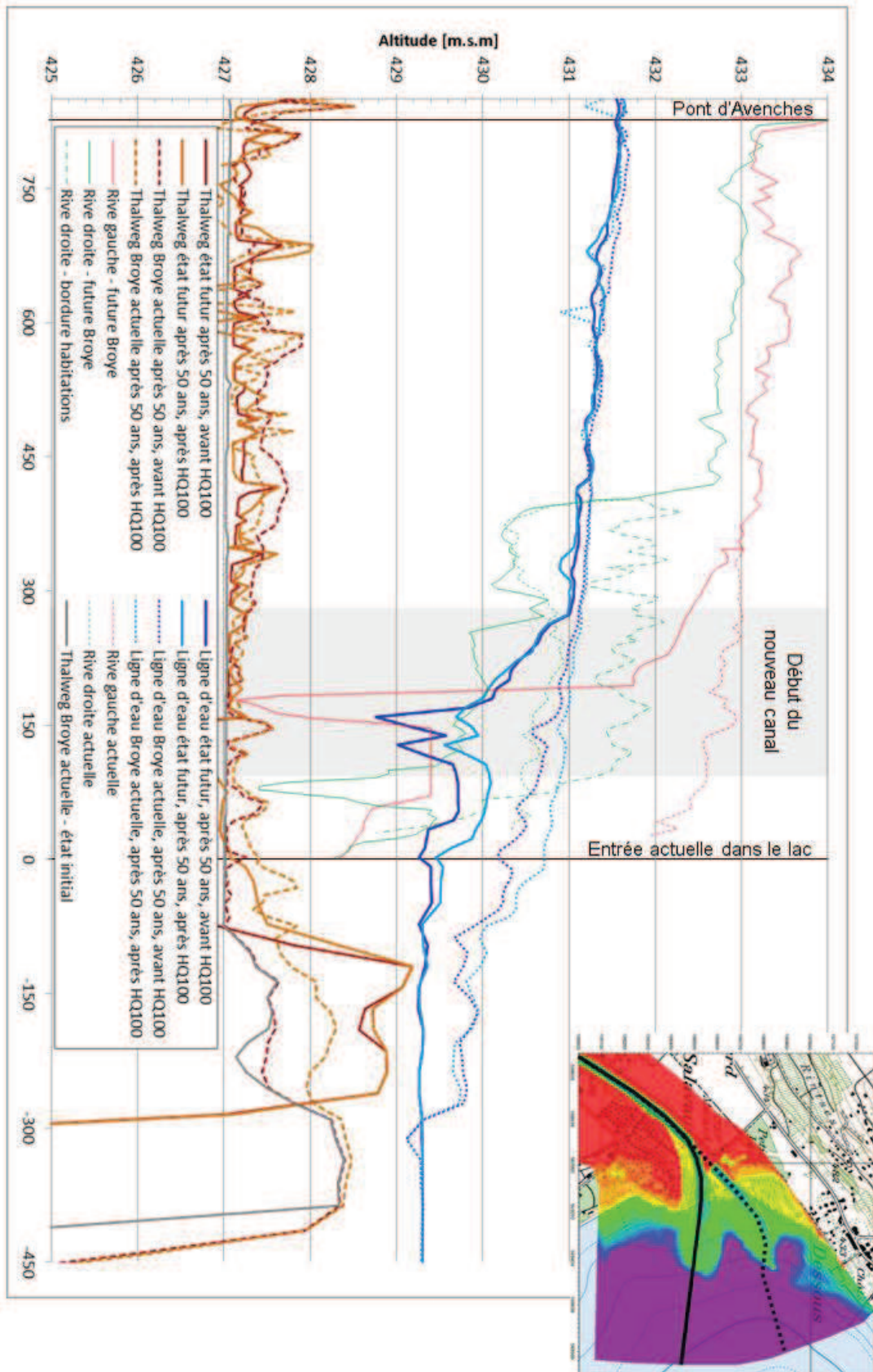


Bathymétrie après 50 ans – après HQ100





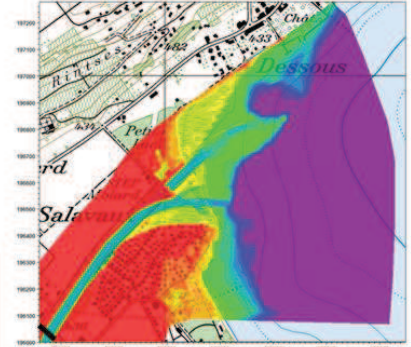
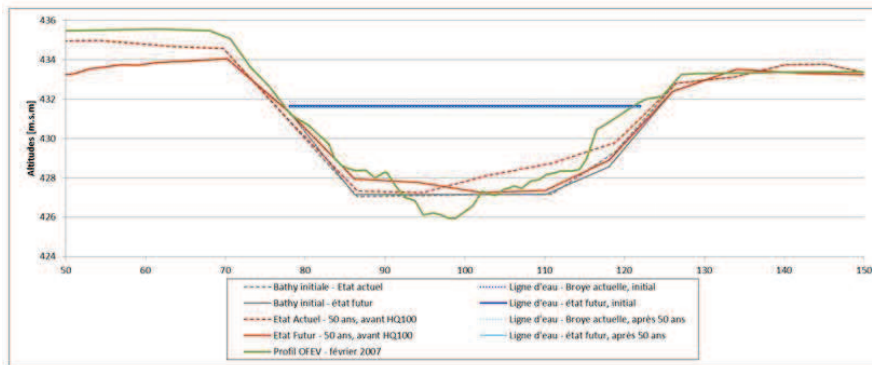
4.4.3 Comparaison des lignes d'eau



4.4.4 Comparaison des profils en travers

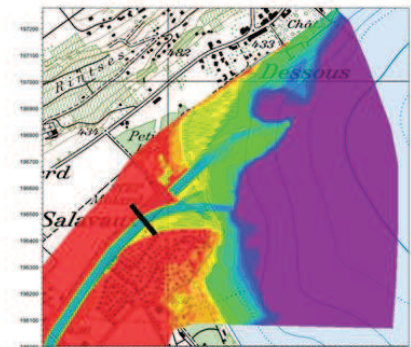
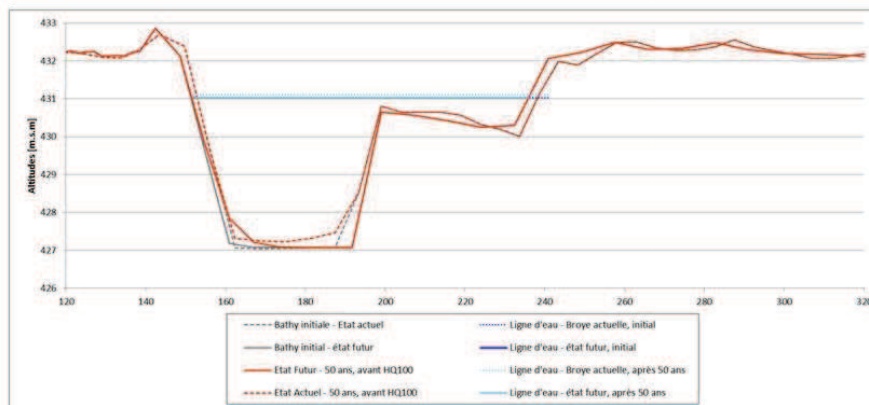
Profil situé au pont d'Avenches

Pont d'Avenches	Broye actuelle	Etat futur
Initial	431.61	431.65
Après 50 ans, avant HQ100	431.90	431.56
Après 50 ans, après HQ100	431.60	431.60



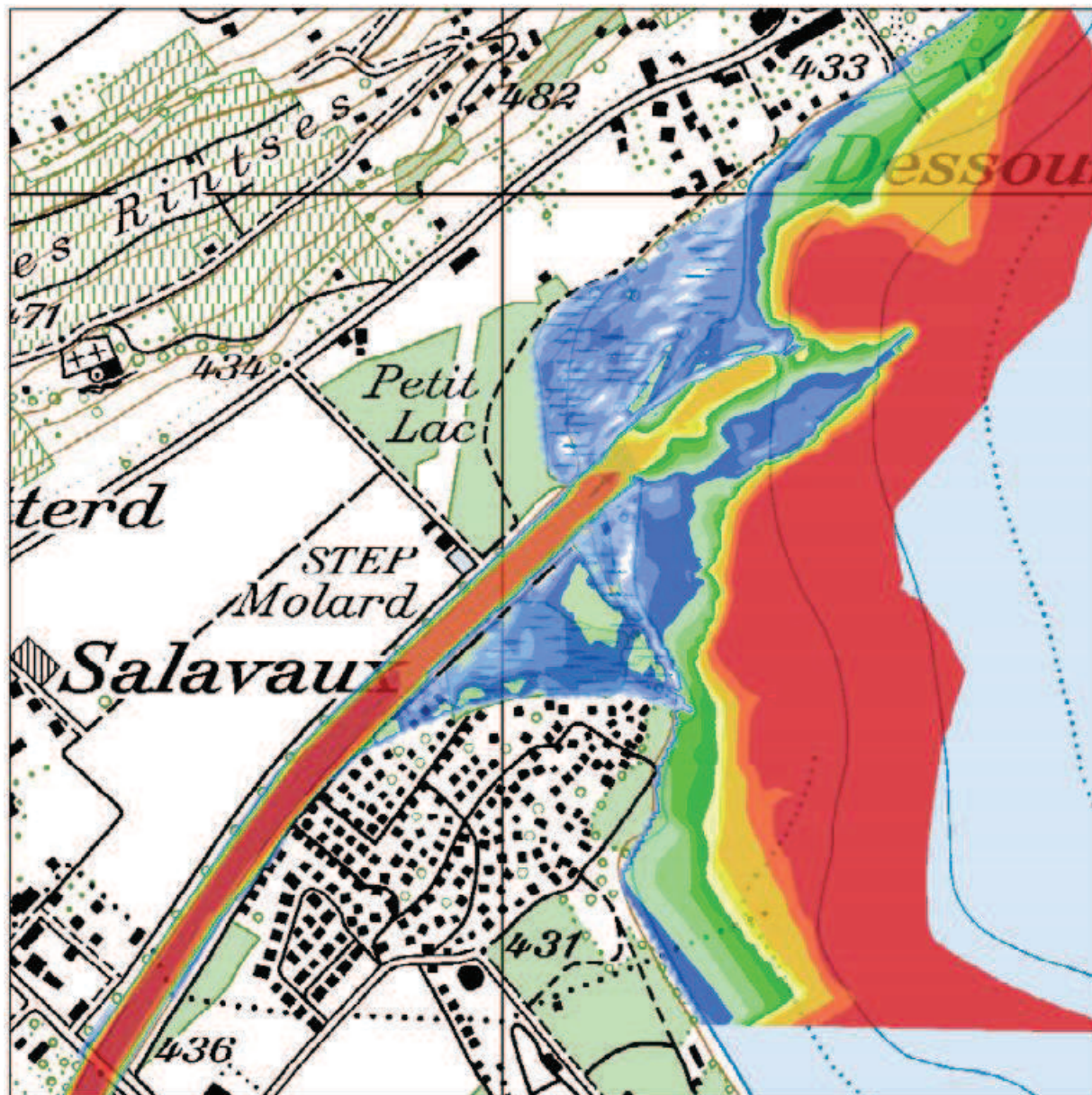
Profil situé au niveau du nouveau bras

Amont nouveau bras	Broye actuelle	Etat futur
Initial	431.04	431.03
Après 50 ans, avant HQ100	431.10	431.04
Après 50 ans, après HQ100	431.15	431.01

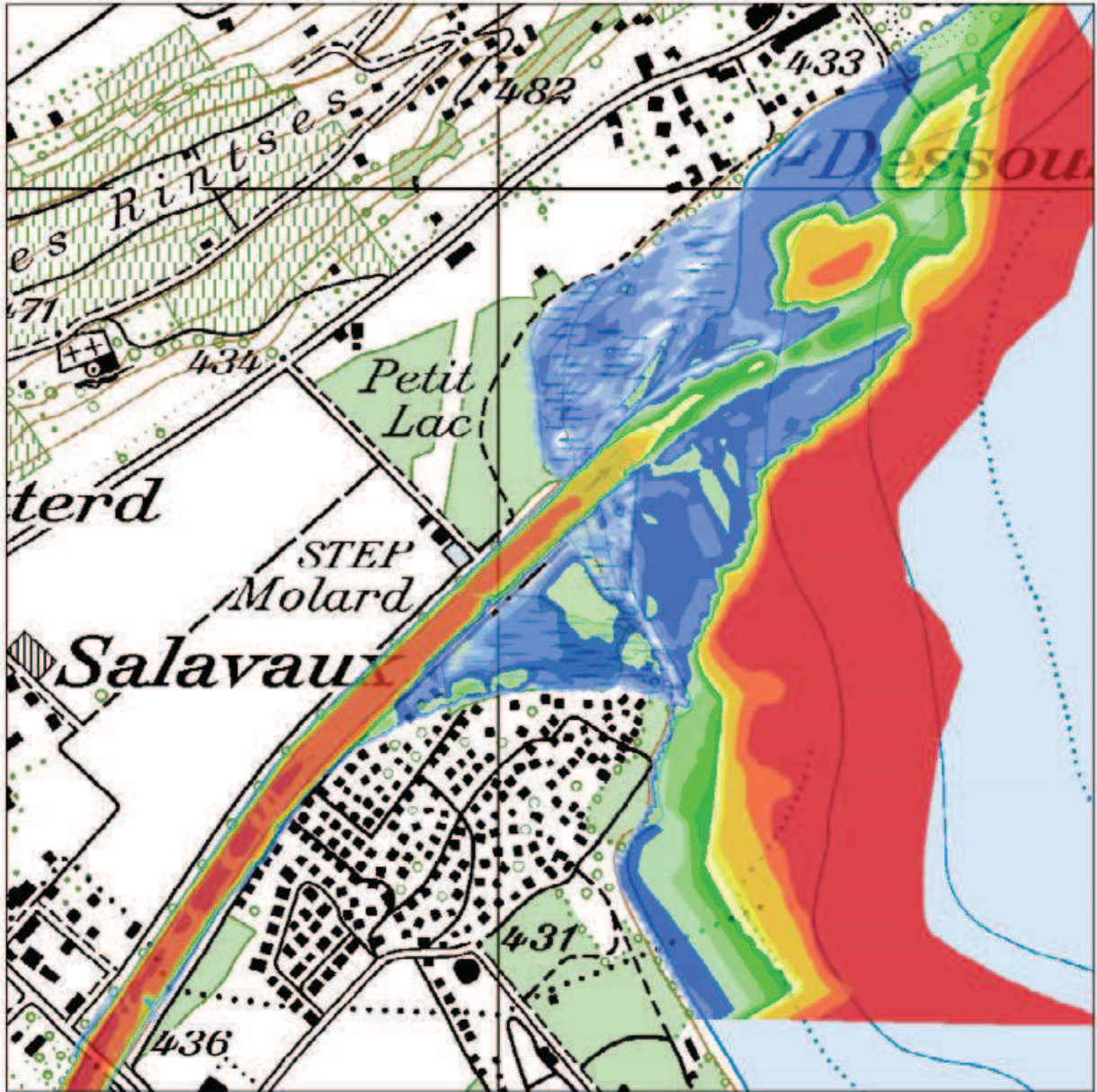


ANNEXE 5 : Cartes d'inondation

Les cartes d'inondation pour la configuration actuelle, dans l'état initial et dans l'état après 20 ans de transport sédimentaire sont présentées ci-après :

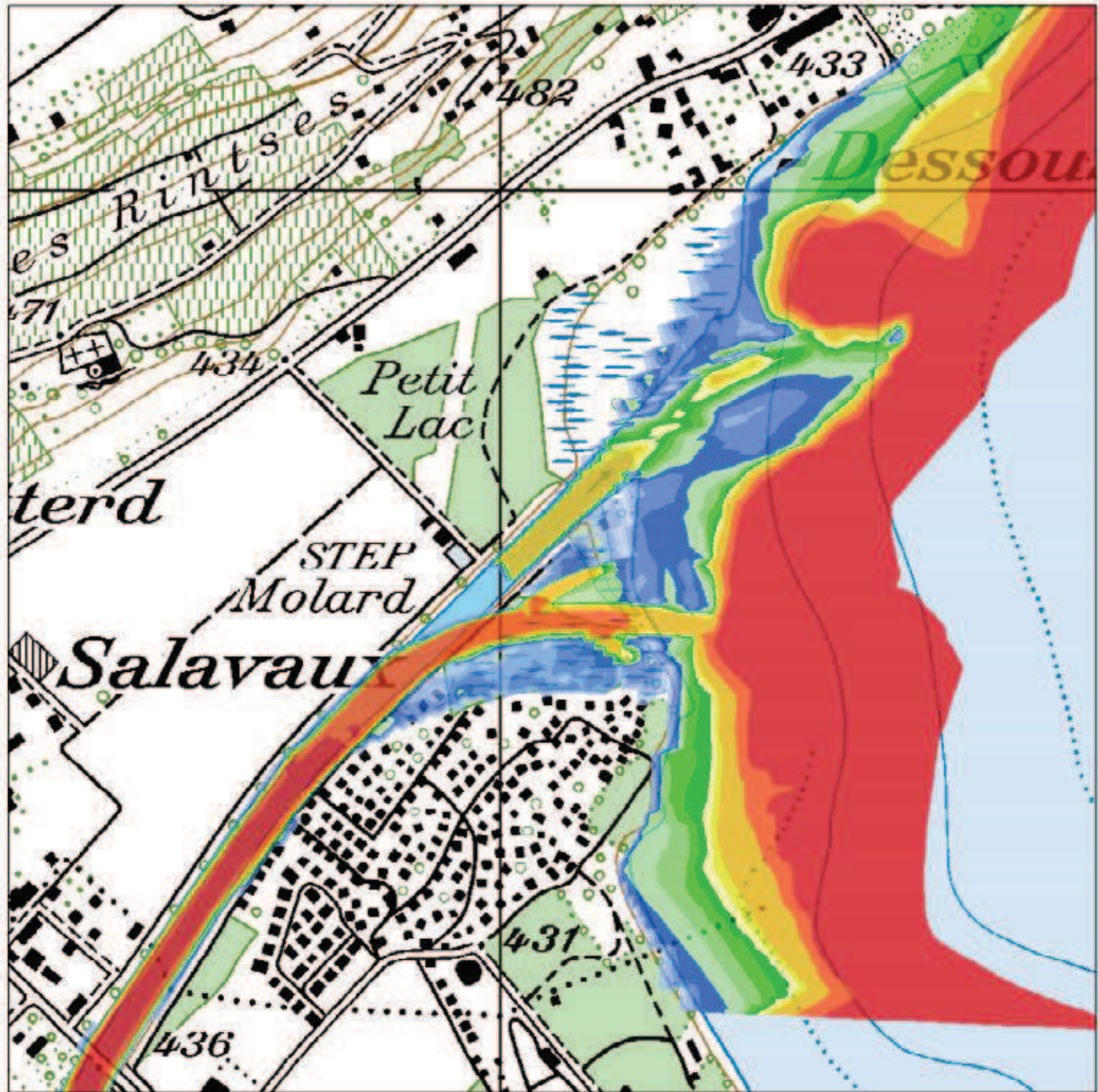


Etat actuel - HQ100 - état initial

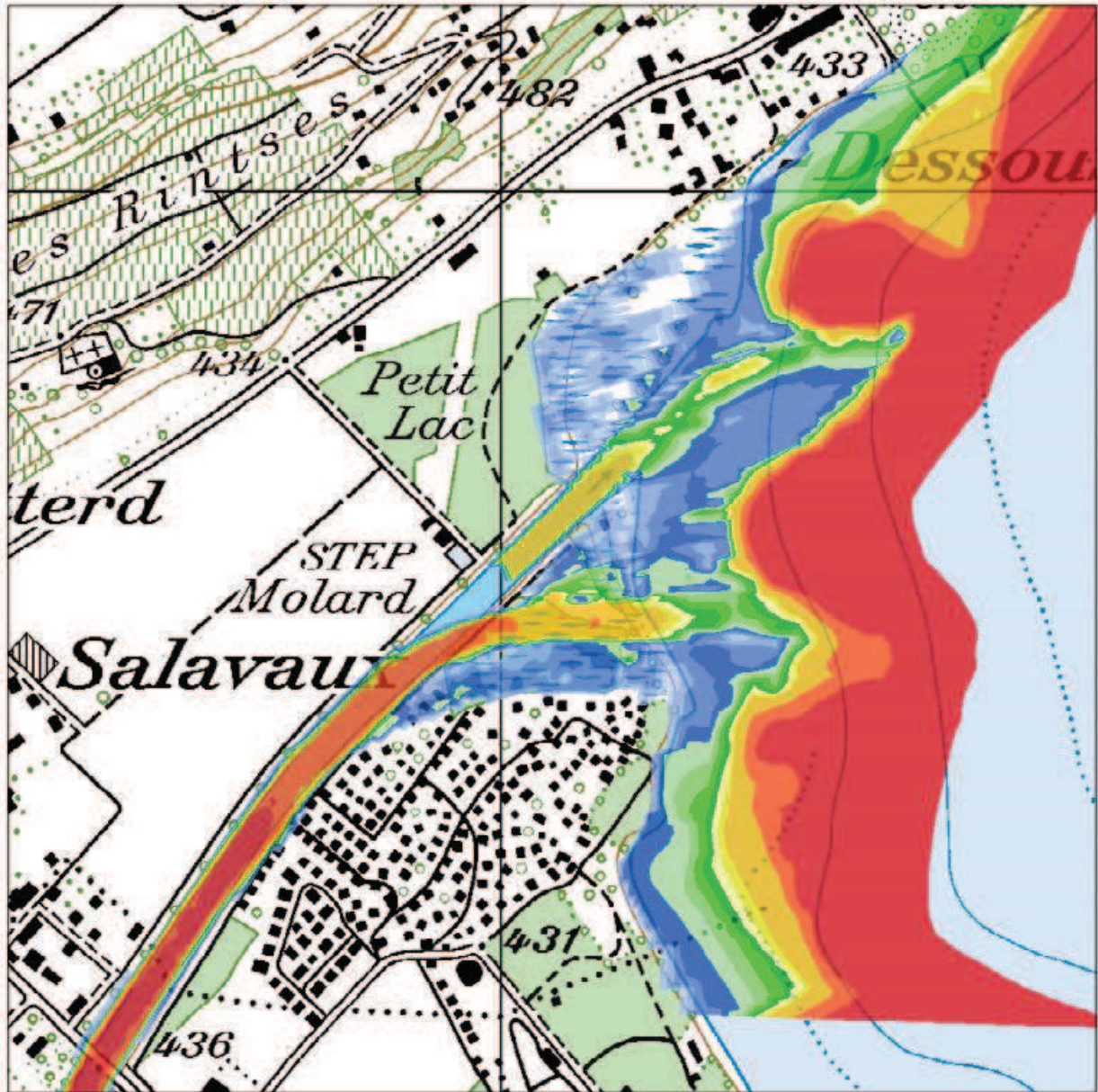


Etat actuel - HQ100 - après 20 ans

Les cartes d'inondation pour la configuration après renaturation de l'embouchure de la Broye, dans l'état initial et dans l'état après 20 ans de transport sédimentaire sont présentées ci-après :



Etat variante - HQ100 - état initial

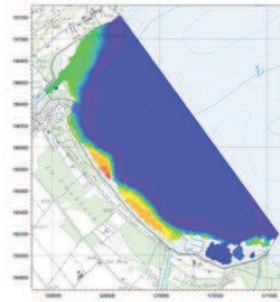


Etat variante - HQ100 - après 20 ans

ANNEXE 6 : Evolution du delta sous l'action de la houle

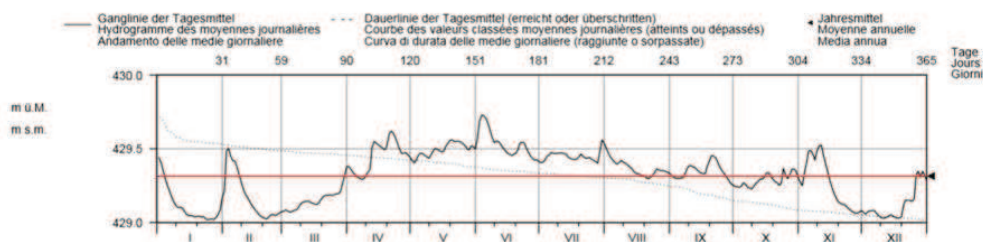
4.1 Conditions des calculs

- **1. Bathymétrie :**
 - Situation actuelle (avec points levés en 2007)
 - L'ensemble de la rive Sud est intégrée dans le modèle (de Vallamand à Faoug)



- **2. Niveau du lac :**
 - Niveau moyen du lac : 429.30 msm

Evolution du niveau du lac de Morat année 2013 (source : bafu) :



- **3. Granulométrie :**
 - D50 = 0.4 mm
- **4. Houle :**
 - vent sous 70° (voir détails ci-après)

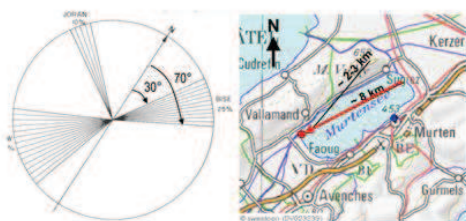


Figure 15 : Rose des vents et fetch valables au lac de Morat

Remarque : seule la direction de vent prépondérante en termes de charriage a été modélisée.

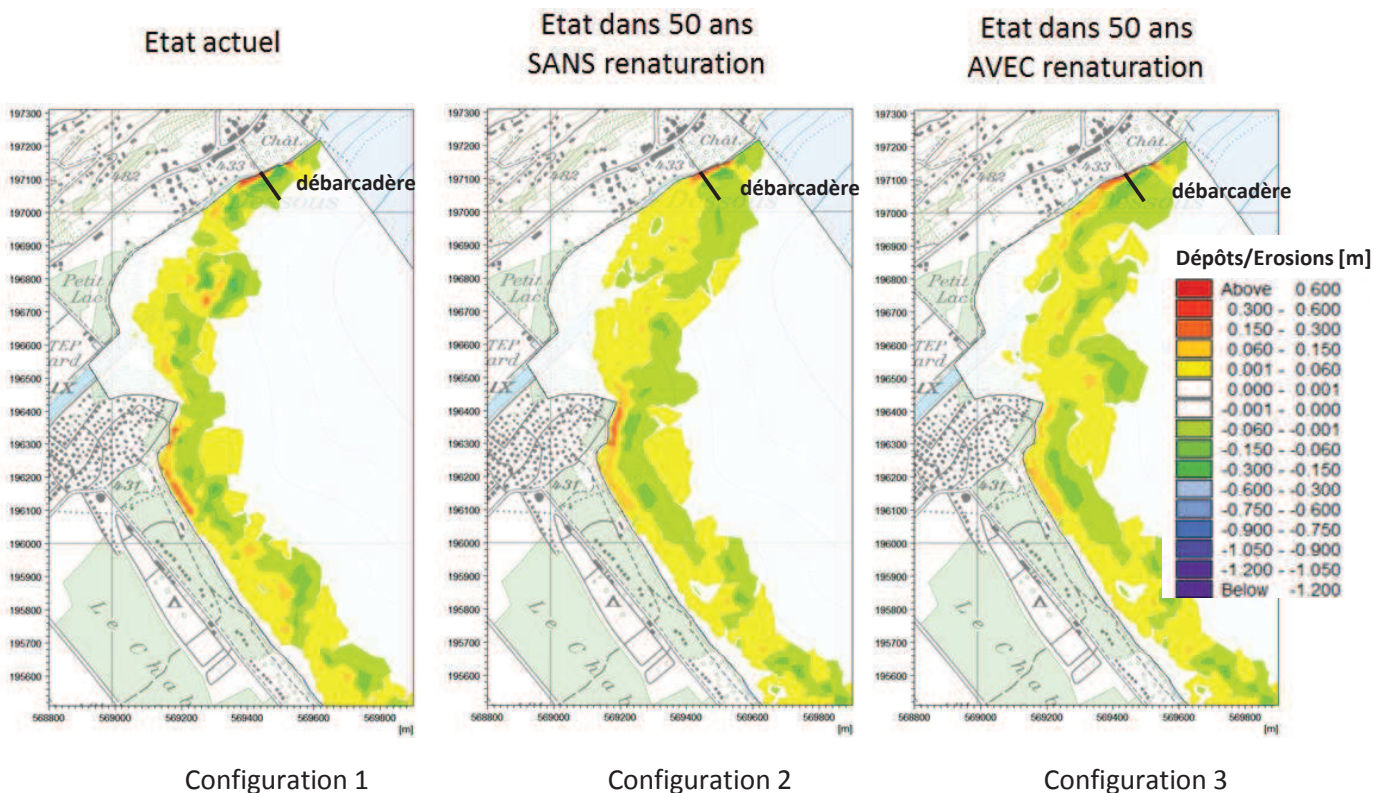
Période de retour :	10 ans
Vitesse du vent :	14.5 m/s
Durée physique :	4h
Hauteur des vagues :	0.92 m

4.2 Evolution morphologique

Les figurent ci-dessous présentent les résultats de l'évolution morphologique du delta dans 3 configurations différentes :

- Configuration 1 : situation actuelle
- Configuration 2 : situation actuelle du delta (sans renaturation) après 50 ans de charriage
- Configuration 3 : situation future du delta (après renaturation) après 50 ans de charriage.

Les résultats sont présentés après 10 ans de houle.

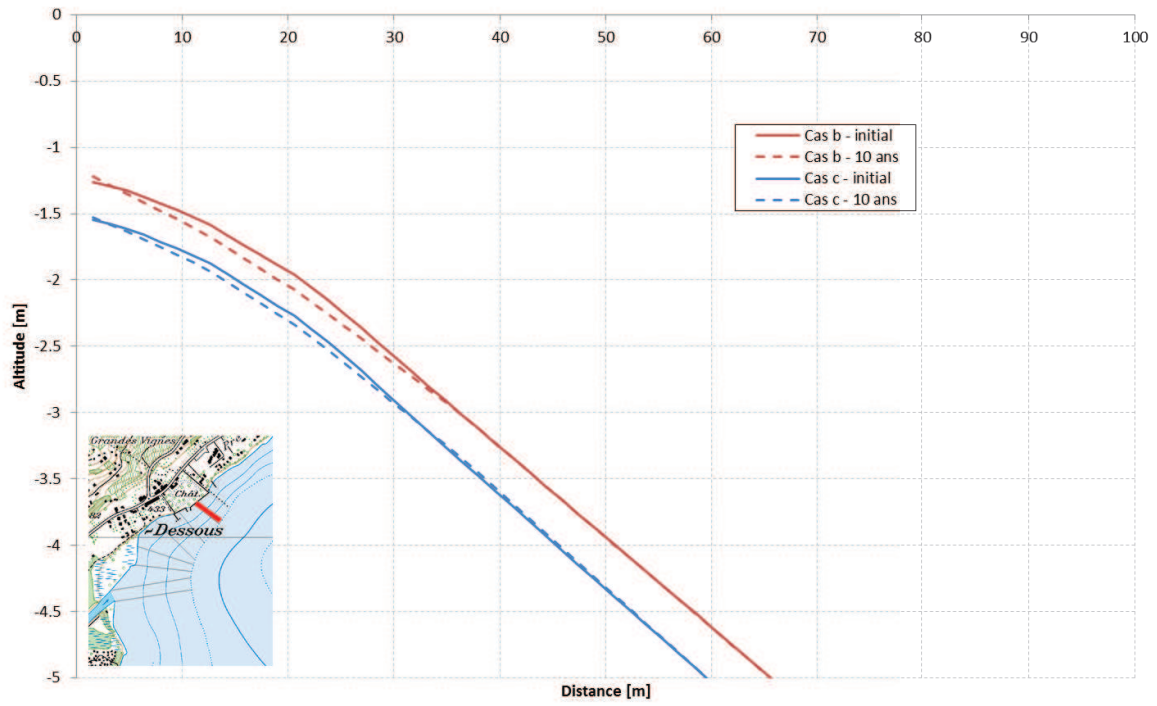


L'évolution du fond est comparée pour les configurations 2 et 3 le long de la berge entre le débarcadère et l'embouchure actuelle de la Broye.

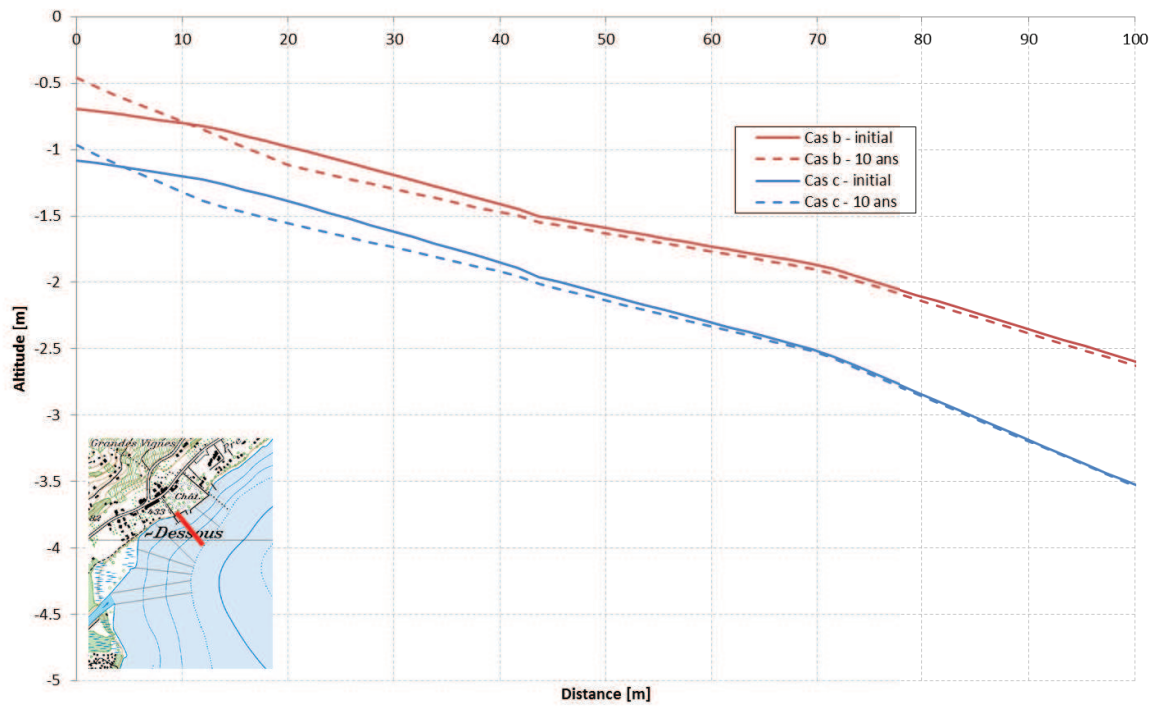


4.4 Comparaison des profils

Profil 1 :

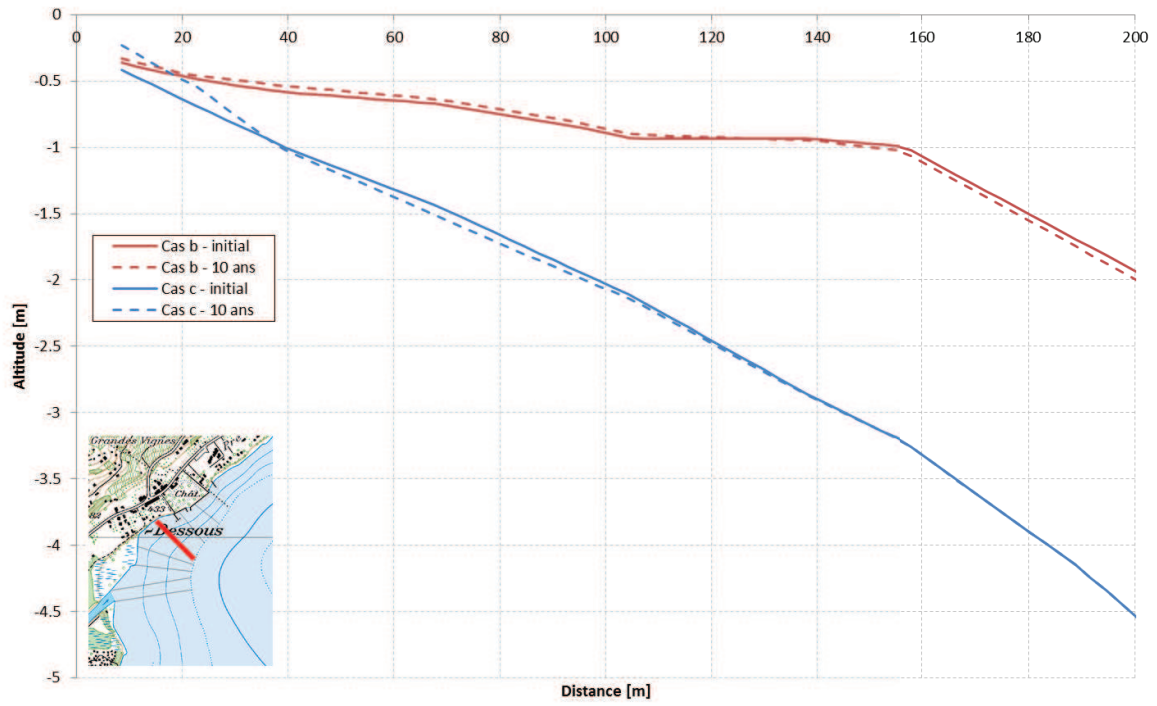


Profil 2 :

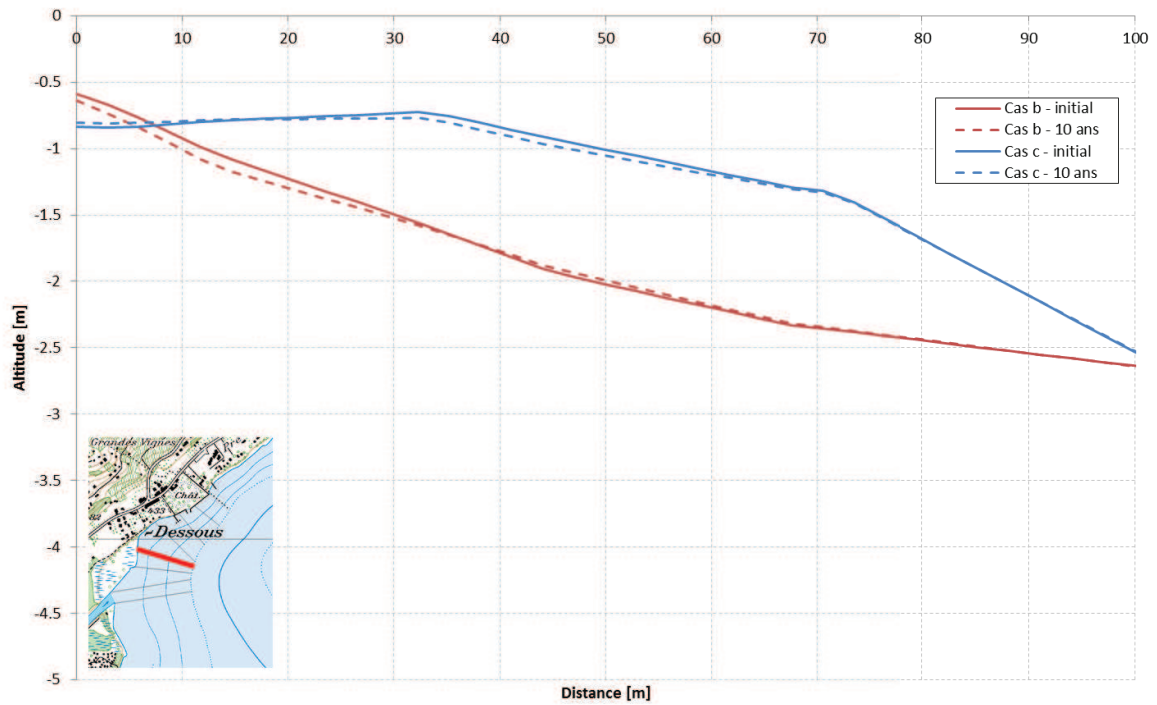




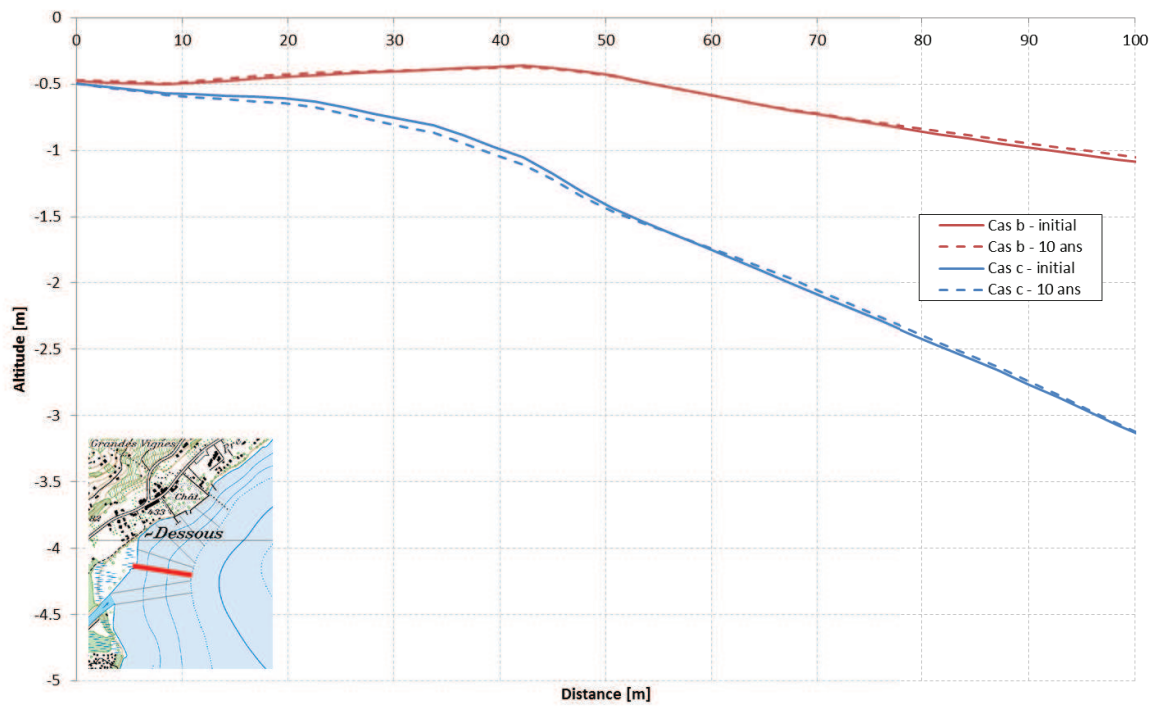
Profil 3 :



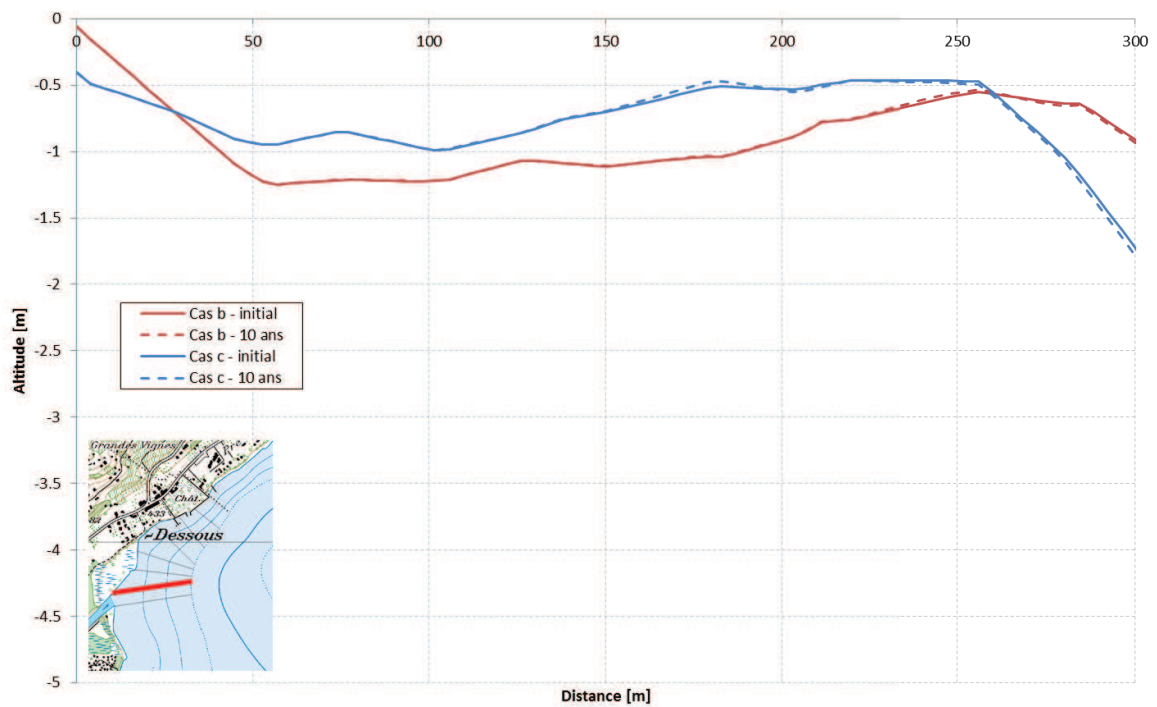
Profil 4 :



Profil 5 :



Profil 6 :





Profil 7 :

