Etablissement public Loire

PREFIGURATION D'UNE EXPERIMENTATION DE RECONSTITUTION D'UN MATELAS ALLUVIAL DANS LE LIT DU FLEUVE LOIRE DANS LE DEPARTEMENT DE LA LOIRE

PHASE 2 : REALISATION DES ETUDES D'AVANT-PROJET SOMMAIRE ET DEFINITION DU PROTOCOLE DE SUIVI SUR LES DEUX SITES SELECTIONNES

RAPPORT DEFINITIF, 15/07/2020

Action soutenue et financée par l'Agence de l'Eau Loire Bretagne

ARTELIA Eau & Environnement
6 rue de Lorraine
38130 - Echirolles
Tel. : +33 (0) 4 76 33 40 00
Fax : +33 (0) 4 76 33 43 33

DATE : 6 2020 **REF : 8 41 2331**

Version	***Date***	***Auteur***	***Vérificateur***	***Commentaires***
2	15/07/2020	Camille Jourdain Léo Malzieu Clément Misset	Vincent Mano Arnaud Pestel	Version corrigée
1	3/6/2020	Camille Jourdain Léo Malzieu Clément Misset	Vincent Mano Arnaud Pestel	Première version du rapport, pour diffusion COPIL

SYNTHESE ET CONCLUSIONS

La présente étude, portée par l'Etablissement public Loire, se situe dans le contexte général de la **restauration géomorphologique de la Loire Forezienne**. Cette restauration suit un constat de dysfonctionnement géomorphologique, lié à l'histoire des usages du fleuve.

En effet, les extractions de granulats au cours des années 1950 à 1980 ainsi que la construction du barrage de Grangent en 1957 qui piège les sédiments provenant de l'amont ont entraîné un déficit sédimentaire important, qui s'est traduit par une **incision généralisé** du lit de la Loire de l'ordre de 1 à 2 m dans la plaine du Forez. L'incision se poursuit de façon inquiétante dans le substratum marneux.

Face à ces enjeux, la problématique des dysfonctionnements géomorphologiques de la Loire a été identifiée dans le SAGE Loire en Rhône-Alpes La restauration du lit de la Loire est un objectif porté par le **SAGE Loire en Rhône Alpes**, adopté en 2014. Ce schéma d'aménagement a fixé comme objectif général de **« restaurer et améliorer les fonctionnalités naturelles du fleuve Loire »**. Cet objectif est décliné en plusieurs dispositions complémentaires. La disposition 1.6.5, **« expérimenter la reconstitution d'un pavage du lit en matériaux grossiers prélevés dans le lit majeur, »** objet de la présente étude, est l'une d'entre elles.

Deux autres études complémentaires effectuées en parallèle de celle-ci concernent d'autres dispositions du SAGE pour restaurer et améliorer les fonctionnalités naturelles du fleuve Loire :

- Disposition n°1.6.3 : Réactiver l'érosion latérale des terrains en bordure de Loire – étude portée par le Conseil départemental de la Loire (CD 42), démarrage mai 2019 et restitution de la Phase 1 septembre 2019 ;

- Disposition n°1.6.4 : Rétablir des milieux ouverts et la mobilité des dépôts alluvionnaires à travers la gestion de la végétation des berges et des bancs présents dans le lit – étude portée par la Direction Départementale des Territoires (DDT 42), restitution juin 2019.

Pour limiter le phénomène et contribuer à l'atteinte des objectifs du SAGE, **l'Etablissement public Loire** a décidé de porter une étude de préfiguration d'une **expérimentation de reconstitution d'un matelas alluvial dans le lit du fleuve Loire, dans le département de la Loire**.

L'objet de la présente étude est de définir les modalités de réalisation, de contenu, et de rendu de cette préfiguration. Ce travail intègre **la réalisation d'avant-projets sommaires** détaillant la mise en place de ces actions de restauration au droit de deux sites pilotes. Ces avant-projet sommaires se baseront sur **un diagnostic détaillé du fonctionnement de la zone d'intérêt** permettant de **qualifier les sites d'expérimentation les plus pertinents**, ainsi que **sur le retour d'expérience d'actions similaires réalisées sur d'autres sites**. Il sera complété par un **protocole de suivi permettant d'évaluer le succès des actions proposées.**

Ainsi, cette étude repose sur les étapes suivantes :

- **Phase I :** L'état des lieux du secteur d'étude et la préparation du choix de deux sites pilotes ;
- **Phase II** : La réalisation des études d'avant-projet sommaire et la définition du protocole de suivi sur les deux sites sélectionnés.

Le présent rapport présente la Phase 2 de l'étude.

Il présente trois propositions d'avant-projet sommaires pour les deux sites sélectionnés à l'issue de la Phase I.

Site de Craintilleux :

- AVP1 - Scénario avec double butée ;

- AVP2 - Scénario de couverture du seuil par des blocs ;
- AVP 3 –Scénario avec simple butée.

Site de l'Ecopôle :

- AVP1 – Scénario avec triple butée ;
- AVP2 – Scénario avec simple butée ;
- AVP3 – Scénario de seuil à échancrure.

Cette étape fait suite à un travail de concertation autour du choix des scénarios ayant pris place au début de la phase 2.

Le principe général de ces scénarios est décrit ci-après.

Site de Craintilleux

Double butée (AVP1)

Deux butées en enrochements libres sont disposées au milieu et à l'aval du seuil de marnes. Ces butées sont ancrées dans les marnes. Elles présentent les caractéristiques suivantes :

- hauteur par rapport au fond moyen de 50 cm ;
- crête de 120m (aval) et 70m (amont) de large de berge à berge, selon la largeur de la Loire ;
- pente du parement aval de 4%, avec une forte rugosité afin d'assurer la franchissabilité piscicole.

L'amont de la butée aval est rempli de matériaux. On dispose ainsi entre la butée amont et la butée aval des matériaux de toute taille de remplissage, et des matériaux plus grossiers en surface pour constituer le « pavage ». La pente de cette zone de remplissage est de l'ordre de 2‰ et permet de relier la crête de la butée aval au fond moyen du profil n°5, comme indiqué sur la figure en dessous

L'amont de la butée amont ne fait pas l'objet de remplissage de matériaux, dans l'objectif d'expérimenter un remplissage naturel.

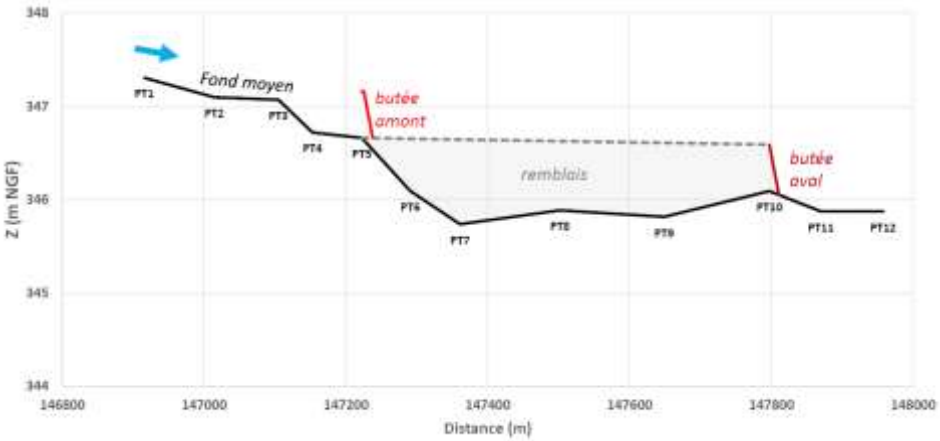


Fig. 1. Schéma de principe de la double butée au niveau du site de Craintilleux (AVP1), vue sur le profil en long

Couverture du seuil par des blocs (AVP2)

Des blocs sont positionnées sur toute la surface du seuil de marnes entre P3 et P8. Ce tapisse termine en aval pas des enrochements encrées dans la marne.

Ce tapis présente les caractéristiques suivantes :

- tapis réparti sur toute la largeur du chenal ;
- taille des blocs de 10 à 15 cm ;
- hauteur par rapport au fonds moyens de l'ordre de 20 cm ;
- butée de faible hauteur en enrochements ancrés dans la marne en aval afin d'assurer la stabilité de l'ouvrage et la franchissabilité piscicole.

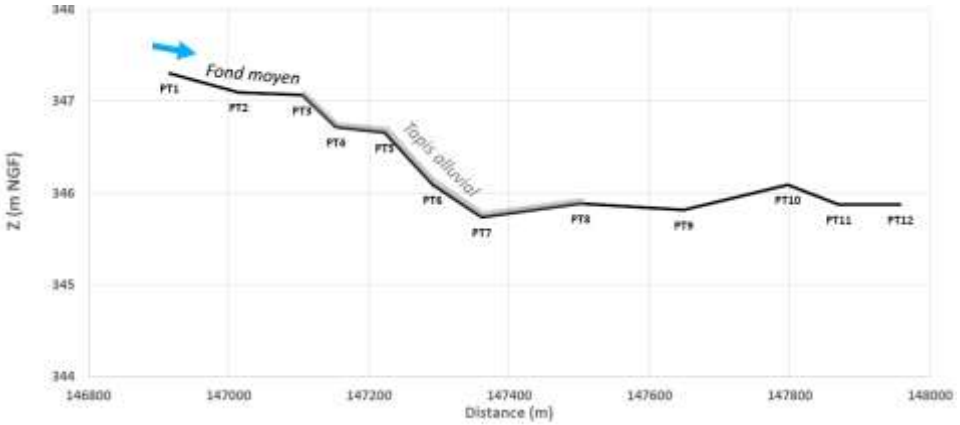


Fig. 2. Schéma de principe de la couverture du seuil par des blocs au niveau du site de Craintilleux (AVP2), vue sur le profil en long

Simple butée (AVP3)

Une butée en enrochements libres est disposée à l'aval du seuil de marnes et ancrée dans les marnes.

Elle présente les caractéristiques suivantes :

- hauteur par rapport au fond moyen de 50 cm ;
- crête de 90m de large berge à berge ;
- pente du parement aval de 4%, avec une forte rugosité pour créer des abris et ainsi assurer la franchissabilité piscicole.

L'amont de la butée est rempli de matériaux (entre P8 et P3). On dispose ainsi de matériaux de toute taille pour le remplissage, et de matériaux plus grossiers en surface pour constituer le pavage et ainsi assurer la stabilité de l'aménagement. La pente de cette zone de remplissage est de l'ordre 0.2‰ et permet de relier la crête de la butée au fond moyen du profil n°3, comme indiqué sur la figure en dessous :

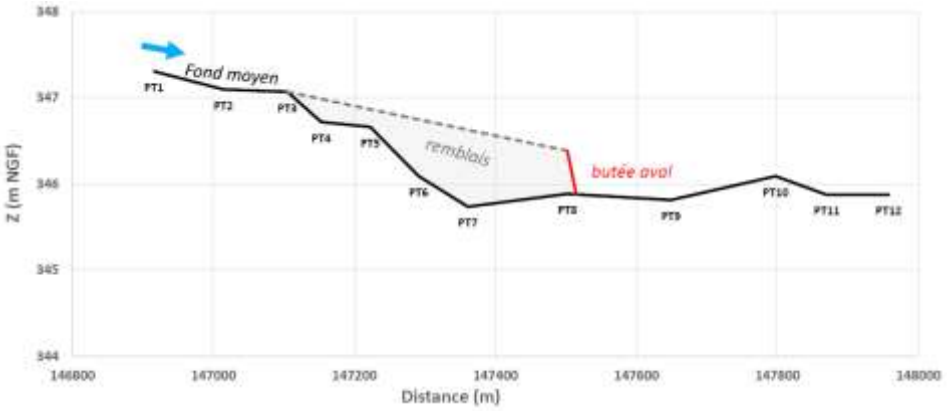


Fig. 3. Schéma de principe de la butée simple au niveau du site de Craintilleux (AVP3), vue sur le profil en long

Le tableau suivant présente un récapitulatif des éléments constitutifs de ces Scénarios.

	AVP 1	AVP 2	AVP 3
Nombre de butées	2, profils 5 et 10	1 butée de faible hauteur	1, profil 8
Taille des matériaux de la butée	LM 10/60	LM 40/200	LM40/200
Volume de la butée	1 300 m^3	200 m^3	630 m^3
Volume matelas alluvial	30 000 m^3	5 200 m^3	16 000 m^3
Diamètre stable du matelas alluvial pour la crue de 2008 (Q50)	33 cm	28 cm	35 cm
Diamètre recommandé pour le « pavage »	10-20 cm (stable Q10 / Q20)	10-20 cm (stable Q10 / Q20)	13-25 cm (stable Q10 / Q20)
Surface de marnes protégées	5.9 Ha + 1.3 Ha suite remplissage butée amont	2.4 Ha	3.6 Ha
Efficacité du dispositif	Efficacité très probable entre les deux butées, risque de déstructuration en cas de grande crue. Efficacité mal connue en amont	Efficacité très probable sur l'ensemble du seuil	Efficacité probable, mais risque de déstructuration en cas de grande crue
Conséquences sur l'hydraulique	Rehausse ligne d'eau de 30 à 50 cm localement	Très faible	Rehausse ligne d'eau de 20 à 30 cm localement
Conséquences sur l'écologie	Effet positif	Effets positifs, mais gros blocs moins favorables.	Effet positif
Coût (HT)	609 897 €	422 879 €	538 065 €

<u>Site de l'Ecopôle</u>

Triple butée (AVP1)

Trois butées en enrochements libres sont disposées à l'aval du seuil de marnes, et au milieu du seuil sur chacun des deux bras. Ces butées sont ancrées dans les marnes.

Ces butées présentent les caractéristiques suivantes :

- hauteur par rapport au fond moyen de 50 cm ;
- crête de 60 m (aval), 47 m et 55 m (amont) de large berge à berge, selon la largeur de la Loire ;
- pente du parement aval de 4%, avec une forte rugosité, afin d'assurer des conditions favorables à la franchissabilité piscicole.

La butée aval permet de rattraper l'incision récente du seuil de marnes et permet également l'alimentation de la frayère à brochets.

La butée aval est remplie de matériaux de toute taille, avec une couche de matériaux plus grossiers en surface constituer le pavage. La pente de cette zone de remplissage est de l'ordre de 2‰. Ce remblai vient protéger l'aval d'un seuil de marne sur le chenal secondaire en rive droite.

La butée amont est construite sans apport de matériaux, dans l'objectif d'un remplissage naturel.

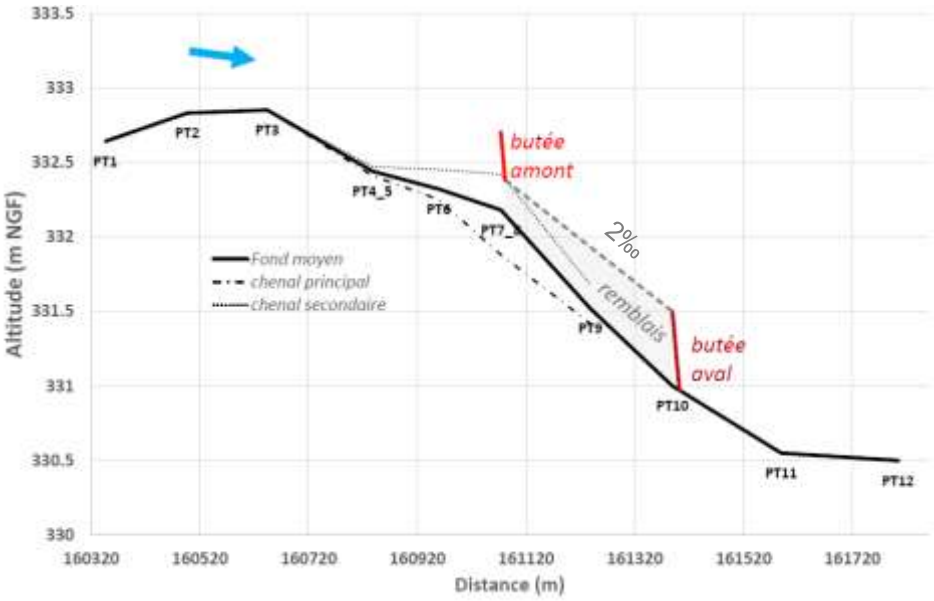


Fig. 4. Schéma de principe de la double butée au niveau du site de l'Ecopôle (AVP1), vue sur le profil en long

Simple butée (AVP 2)

Une butée en enrochement est disposée à l'aval du seuil de marnes et ancrée dans les marnes.

Cette butée présente les caractéristiques suivantes :

- hauteur par rapport au fond moyen de 50 cm ;
- crête de 65m de large berge à berge ;
- pente du parement aval de 4%, avec une forte rugosité afin d'assurer des conditions favorables à la franchissabilité piscicole.

La butée permet de rattraper l'incision récente du seuil de marnes et permet également l'alimentation de la frayère à brochets.

La butée est remplie de matériaux. On dispose des matériaux de toute taille pour remplir la butée, et des matériaux plus grossiers en surface pour constituer le pavage. La pente de cette zone de remplissage est de l'ordre de 2‰.

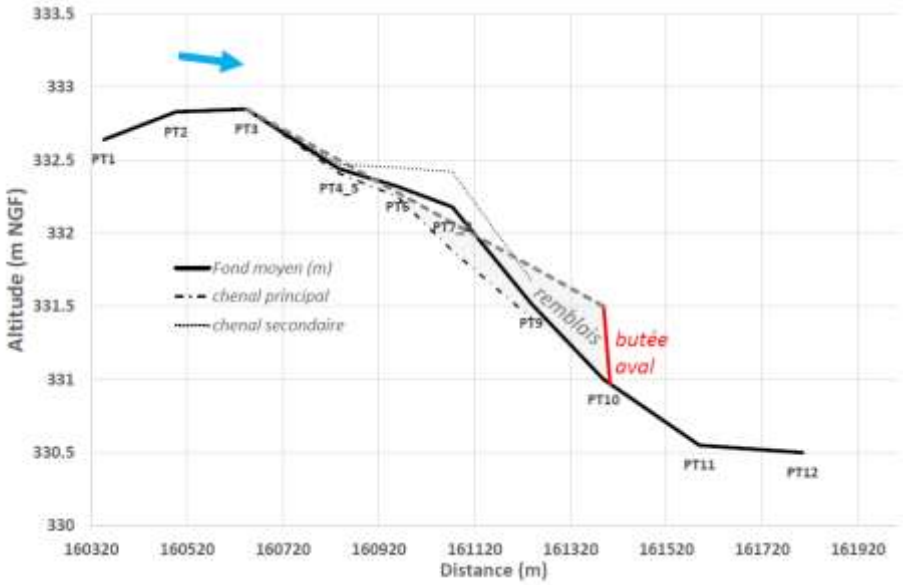


Fig. 5. Schéma de principe de la butée simple au niveau du site de l'Ecopôle (AVP2), vue sur le profil en long

Epis à échancrure (AVP 3)

Des épis à échancrure peuvent être conçus pour rehausser la ligne d'eau, et constituer ainsi une protection hydraulique des marnes. La perte de charge responsable de l'érosion est concentrée au niveau des épis plutôt qu'au niveau du seuil de marnes.

Cette modification de l'hydraulique donne lieu au dépôt de matériaux naturellement en amont, s'il y a un apport de matériaux suffisant.

Au niveau et à l'aval des épis, l'écoulement est fortement accéléré. Les marnes doivent donc être protégées pour éviter les affouillements.

L'avantage de cette solution est qu'elle permet d'éviter d'installer un obstacle sur toute la largeur du chenal. Elle est donc très favorable pour la continuité piscicole. Par ailleurs, les épis peuvent être conçus pour permettre une bonne intégration paysagère et une diversification des habitats.

Ces épis présentent les caractéristiques suivantes :

- hauteur par rapport au fond moyen de 1.50 m ;
- crête de 65m de large berge à berge ;
- ouverture centrale de 10m de large.

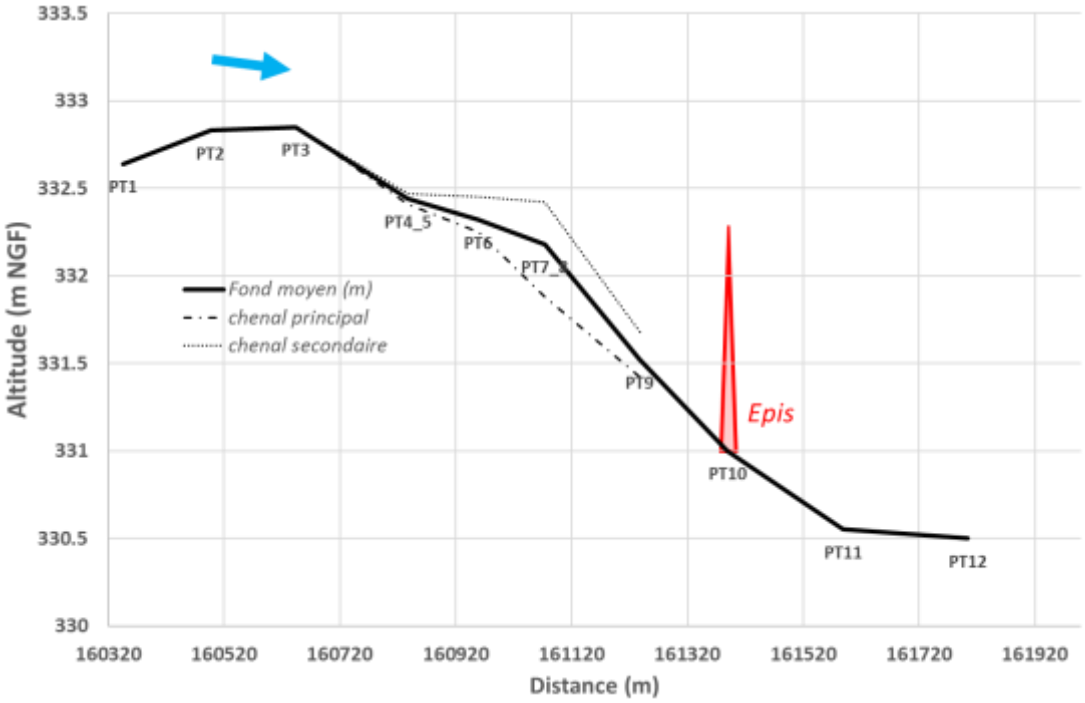


Fig. 6. Schéma de principe des épis à échancrure au niveau du site de l'Ecopôle (AVP3), vue sur le profil en long

Le tableau suivant présente un récapitulatif des éléments constitutifs de ces Scénarios.

	AVP 1 – triple butée	**AVP 2 – simple butée**	**AVP 3 – épis à échancrure**
Nombre de butées	3, profils 7, 8 et 10	1, profil 10	Pas de butée, mais deux épis profil 10
Taille des matériaux de la butée	LM 5/40	LM 5/40	LM40/200
Volume des butées	700 m^3	460 m^3	400 m^3
Volume matelas alluvial	14 000 m^3	12 300 m^3	0 m^3
Diamètre stable du matelas alluvial pour la crue de 2008 (Q50)	6 cm	7 cm	NA
Diamètre recommandé pour le « pavage »	4.5-15 cm	4.5-15 cm	NA
Surface de marnes protégée	2.8 Ha + 4.3 Ha suite remplissage butée amont	7.5 Ha	Inconnue
Efficacité du dispositif	Efficacité très probable entre les butées amont et aval, moins sûre en amont	Efficacité très probable là où le matelas est présent, mais seuil chenal rive droite trop haut pour être protégé par cette solution	Efficacité à valider.
Conséquences sur l'hydraulique	Très faible impact en crue. Rehausse de la ligne d'eau à l'étiage, favorable à la frayère.	Très faible impact en crue. Rehausse de la ligne d'eau à l'étiage, favorable à la frayère, mais moins favorable que la solution 1.	Très faible impact pour les débits de crues et pour les débits d'étiage.
Conséquences sur l'écologie	Effet positif	Effets positifs	Effet positif
Coût (HT)	343 357 €	324 903 €	361 818 €

Protocole de suivi

Un protocole de suivi « a minima » et un protocole de suivi complet de ces expérimentations sont proposés.

Suivi hydraulique et géomorphologique

Suivi a minima

- Suivi photographique « Time lapse »
  Coût :1200 €
- Suivi ponctuel à l'état initial (pré travaux), état après travaux, années n+1, n+3, n+5, et n+10 et si crue importante
  - Visite de site par un expert hydraulique / géomorphologue :
  - Relevés bathymétriques au niveau du matelas alluvial, en amont, et en aval. Il est possible de se baser sur les profils relevés dans le cadre de la présente étude
  - Cartographie de la zone d'alluvions (emprise)
  - Granulométrie de surface : protocole de type Wolmann à l'étiage, ou à partir de photographies aquatiques pour tout débit.
  - Suivi colorimétrique : installation de bandes colorées (peinture de marquage) à sec à l'issue des travaux. Suivi visuel de l'évolution de ces bandes jusqu'à leur disparition.

  Coût : 8000 € / suivi

Suivi complet
Sur la base du suivi a minima, avec les mesures complémentaires suivantes :

- Relevés bathymétrique affinés
- Suivi du colmatage – méthode Datry
- Suivi du déplacement des particules par « pit tags » actifs (qui n'ont pas besoin d'être insérés dans des galets) mis en place à différentes profondeurs au moment des travaux,
  Cout : 16 000 € / suivi + 7000 € la première année pour l'installation des pit tags

Suivi écologique

Suivi a minima

- Visite de site par un écologue, années n+2 ; n+5 ; n+10 ; n+15
  Coût : 1 500 € / suivi

Suivi complet

- Inventaires des frayères, années n-1 ; n+2 ; n+5 ; n+10 ; n+15
  Coût : 7 000 € / suivi
- Inventaire des macro-invertébrés benthiques, années n-1 ; n+2 ; n+5 ; n+10 ; n+15
  Coût : 4 000 € par année de suivi

Eléments de phasage

Il paraîtrait cohérent de réaliser ces actions de l'aval vers l'amont, les aménagements pouvant donner lieu à une rupture temporaire de la continuité sédimentaire.

Par ailleurs, certaines actions envisagées doivent être couplées à d'autres actions de SAGE :

Site de Craintilleux :

- Désenrochement du site de Montrond-les-Bains amont (Etude érosion latérale, AVP4)
- Arasement des bancs de Rivas en amont et en aval du pont (Etude d'arasement des bancs, sites 7, 8, et 9 pour l'AVP1, site 7 seulement pour l'AVP 3).

Site de l'Ecopôle :

- Désenrochement du site de Marclopt aval (Etude érosion latérale, AVP7)
- Décaissement de la berge au niveau du site de Marclopt amont (Etude érosion latérale, AVP6) pour les AVP 1 et 2.

Ces actions doivent être réalisées soit de façon synchronisées, ou alors la restauration du matelas alluvial doit être réalisée après les actions sus citées, auquel cas une zone de stockage pour les matériaux doit être prévue.

SOMMAIRE

SYNTHESE ET CONCLUSIONS A
OBJET DE L'ETUDE 16
OBJET DU PRESENT RAPPORT 17
1. SITE DE CRAINTILLEUX 18
1.1. PRESENTATION DU SITE 18
1.1.1. SITUATION 18
1.1.2. DONNEES TOPOGRAPHIQUES 20
1.1.3. CARACTERISTIQUES DU SEUIL DE MARNES 20
1.1.4. DIAGNOSTIC ENVIRONNEMENTAL 24
1.1.4.1. Contexte naturel 24
1.1.4.2. Diagnostic écologique 25
1.2. CHOIX DES SCENARIOS D'AMENAGEMENT 28
1.2.1. DOUBLE BUTEE : PRINCIPE 28
1.2.2. COUVERTURE DU SEUIL PAR DES BLOCS : PRINCIPE 29
1.2.3. SIMPLE BUTEE : PRINCIPE 29
1.3. MODELISATION HYDRAULIQUE 30
1.3.1. CONSTRUCTION ET CALIBRATION 30
1.3.2. VALIDITE ET LIMITES DU MODELE 33
1.4. AVP 1 – DOUBLE BUTEE 34
1.4.1. PRESENTATION DE L'AMENAGEMENT 34
1.4.1.1. Principe de l'aménagement 34
1.4.1.2. Butées 36
1.4.1.3. Matelas alluvial - zone de remplissage 40
1.4.2. RESULTATS ATTENDUS ET IMPACTS 43
1.4.2.1. Résultats attendus et impacts morphologiques 43
1.4.2.2. Résultats attendus et impacts hydrauliques et hydrogéologiques 45
1.4.2.3. Résultats attendus et impacts écologiques 47
1.4.3. MODALITES DE REALISATION DES TRAVAUX 48
1.4.3.1. Déroulement des travaux 48
1.4.3.2. Accès et pistes de chantier 49
1.4.3.3. Prise en compte des enjeux environnementaux 49
1.4.3.4. Calendrier et phasage 50
1.4.4. ESTIMATION DES COUTS 50
1.4.5. ETUDES COMPLEMENTAIRES 51
1.4.6. APPROCHE REGLEMENTAIRE 52
1.5. AVP 2 – COUVERTURE DU SEUIL PAR DES BLOCS 53
1.5.1. PRESENTATION DE L'AMENAGEMENT 53
1.5.1.1. Principe 53
1.5.1.2. Ancrage du matelas alluvial 55

1.5.1.3. Blocs du matelas alluvial - zone de remplissage 56
1.5.2. RESULTATS ATTENDUS ET IMPACTS 59
1.5.2.1. Résultats attendus et impacts morphologiques 59
1.5.2.2. Résultats attendus et impacts hydrauliques et hydrogéologiques 61
1.5.2.3. Résultats attendus et impacts environnementaux 62
1.5.3. MODALITES DE REALISATION DES TRAVAUX 63
1.5.3.1. Déroulement des travaux 63
1.5.3.2. Accès et piste de chantier 64
1.5.3.3. Prise en compte des enjeux environnementaux 65
1.5.3.4. Calendrier et phasage 65
1.5.4. ESTIMATION DES COUTS 66
1.5.5. ETUDES COMPLEMENTAIRES 66
1.5.6. APPROCHE REGLEMENTAIRE 67
1.6. AVP 3 – SIMPLE BUTEE 68
1.6.1. PRESENTATION DE L'AMENAGEMENT 68
1.6.1.1. Principe 68
1.6.1.2. Butée 70
1.6.1.3. Matelas alluvial - zone de remplissage 73
1.6.2. RESULTATS ATTENDUS ET IMPACTS 76
1.6.2.1. Résultats attendus et impacts morphologiques 76
1.6.2.2. Résultats attendus et impact hydrauliques et hydrogéologiques 78
1.6.2.3. Résultats attendus et impacts environnementaux 80
1.6.3. MODALITES DE REALISATION DES TRAVAUX 81
1.6.3.1. Déroulement des travaux 81
1.6.3.2. Accès et piste de chantier 82
1.6.3.3. Prise en compte des enjeux environnementaux 82
1.6.3.4. Calendrier et phasage 83
1.6.4. ESTIMATION DES COUTS 83
1.6.5. ETUDES COMPLEMENTAIRES 84
1.6.6. APPROCHE REGLEMENTAIRE 85
2. SITE DE L'ECOPOLE 87
2.1. PRESENTATION DU SITE 87
2.1.1. SITUATION 87
2.1.2. DONNEES TOPOGRAPHIQUES 88
2.1.3. CARACTERISTIQUES DU SEUIL DE MARNES 89
2.1.4. DIAGNOSTIC ENVIRONNEMENTAL 93
2.1.4.1. Contexte naturel 93
2.1.4.2. Diagnostic écologique 94
2.2. CHOIX DES SCENARIOS D'AMENAGEMENT 98
2.2.1. TRIPLE BUTEE : PRINCIPE 98
2.2.2. SIMPLE BUTEE : PRINCIPE 99
2.2.3. EPIS A ECHANCRURE : PRINCIPE 100
2.3. MODELISATION HYDRAULIQUE 101
2.3.1. CONSTRUCTION ET CALIBRATION 101

2.3.2. VALIDITE ET LIMITES DU MODELE 104
2.4. AVP 1 – TRIPLE BUTEE 104
2.4.1. PRESENTATION DE L'AMENAGEMENT 104
2.4.1.1. Principe 104
2.4.1.2. Butées 107
2.4.1.3. Matelas alluvial - zone de remplissage 110
2.4.2. RESULTATS ATTENDUS ET IMPACTS 113
2.4.2.1. Résultats attendus et impacts morphologiques 113
2.4.2.2. Résultats attendus et impacts hydrauliques et hydrogéologiques 116
2.4.2.3. Résultats attendus et impacts environnementaux 119
2.4.3. MODALITES DE REALISATION DES TRAVAUX 120
2.4.3.1. Déroulement des travaux 120
2.4.3.2. Accès et piste de chantier 122
2.4.3.3. Prise en compte des enjeux environnementaux 122
2.4.3.4. Calendrier et phasage 122
2.4.4. ESTIMATION DES COUTS 123
2.4.5. ETUDES COMPLEMENTAIRES 124
2.4.6. APPROCHE REGLEMENTAIRE 125
2.5. AVP 2 – SIMPLE BUTEE 126
2.5.1. PRESENTATION DE L'AMENAGEMENT 126
2.5.1.1. Principe 126
2.5.1.2. Butée 128
2.5.1.3. Matelas alluvial - zone de remplissage 131
2.5.2. RESULTATS ATTENDUS ET IMPACTS 134
2.5.2.1. Résultats attendus et impacts morphologiques 134
2.5.2.2. Résultats attendus et impacts hydrauliques et hydrogéologiques 137
2.5.2.3. Résultats attendus et impacts environnementaux 141
2.5.3. MODALITES DE REALISATION DES TRAVAUX 142
2.5.3.1. Déroulement des travaux 142
2.5.3.2. Accès et piste de chantier 144
2.5.3.3. Prise en compte des enjeux environnementaux 144
2.5.3.4. Calendrier et phasage 144
2.5.4. ESTIMATION DES COUTS 145
2.5.5. ETUDES COMPLEMENTAIRES 146
2.5.6. APPROCHE REGLEMENTAIRE 146
2.6. AVP 3 – EPIS A ECHANCRURE 147
2.6.1. PRESENTATION DE LA SOLUTION 147
2.6.1.1. Principe 147
2.6.1.2. Epis 149
2.6.2. RESULTATS ATTENDUS ET IMPACTS 153
2.6.2.1. Impacts morphologiques 153
2.6.2.2. Impact hydraulique et hydrogéologique 155
2.6.2.3. Impacts environnementaux 158
2.6.3. MODALITES DE REALISATION DES TRAVAUX 159
2.6.3.1. Déroulement des travaux 159
2.6.3.2. Accès et piste de chantier 161

2.6.3.3. Prise en compte des enjeux environnementaux 161
2.6.3.4. Calendrier et phasage 161
2.6.4. ESTIMATION DES COUTS 162
2.6.5. ETUDES COMPLEMENTAIRES 162
2.6.6. APPROCHE REGLEMENTAIRE 163
3. PROTOCOLE DE SUIVI 165
3.1. SUIVI HYDRAULIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE 165
3.1.1. SUIVI A MINIMA 165
3.1.2. SUIVI COMPLET 165
3.2. SUIVI ECOLOGIQUE 166
3.2.1. SUIVI A MINIMA 166
3.2.2. SUIVI COMPLET 166
4. ELEMENTS D'ANALYSE ET DE PHASAGE 168
ANNEXE 1 PROPOSITION DE SCENARIOS – PRESENTATION DE LA REUNION COPIL DU 25/11/2019 171
ANNEXE 2 COMPTE-RENDU DE LA REUNION COPIL DU 25/11/2019 172
ANNEXE 3 PRESENTATION DES SCENARIOS : NOTE TECHNIQUE DIFFUSEE AUX MEMBRES DU COPIL 173
ANNEXE 4 PROFILS TOPOGRAPHIQUES DU SITE DE CRAINTILLEUX 174
ANNEXE 5 PROFILS TOPOGRAPHIQUES DU SITE DE L'ECOPOLE 175

OBJET DE L'ETUDE

La présente étude, portée par l'Etablissement public Loire, se situe dans le contexte général de la **restauration géomorphologique de la Loire Forezienne**. Cette restauration suit un constat de dysfonctionnement géomorphologique, lié à l'histoire des usages du fleuve.

La restauration du lit de la Loire est un objectif porté par le **SAGE Loire en Rhône Alpes**, adopté en 2014. Ce schéma d'aménagement a fixé comme objectif général de **« restaurer et améliorer les fonctionnalités naturelles du fleuve Loire »**. Cet objectif est décliné en plusieurs dispositions complémentaires. La disposition 1.6.5, **« expérimenter la reconstitution d'un pavage du lit en matériaux grossiers prélevés dans le lit majeur, »** objet de la présente étude, est l'une d'entre elles.

Deux autres études complémentaires effectuées en parallèle de celle-ci concernent d'autres dispositions du SAGE pour restaurer et améliorer les fonctionnalités naturelles du fleuve Loire :

- Disposition n°1.6.3 : Réactiver l'érosion latérale des terrains en bordure de Loire – étude portée par le Conseil départemental de la Loire (CD 42), démarrage mai 2019 ;
- Disposition n°1.6.4 : Rétablir des milieux ouverts et la mobilité des dépôts alluvionnaires à travers la gestion de la végétation des berges et des bancs présents dans le lit – étude portée par la Direction Départementale des Territoires (DDT 42), restitution juin 2019.

La **reconstitution d'un pavage** est une action de restauration visant **à limiter l'érosion du lit dans des secteurs de marnes affleurantes**, à l'origine de dysfonctionnement morphologiques et écologique. Cette action a été suggérée en 2009 dans l'étude « Plan d'actions pour limiter le dysfonctionnement géomorphologique du fleuve Loire » réalisée par le bureau d'étude HYDRATEC.

L'objet de la présente étude est de définir les modalités de réalisation, de contenu, et de rendu de cette préfiguration. Ce travail intègre **la réalisation d'avant-projets sommaires** détaillant la mise en place de ces actions de restauration au droit de deux sites pilotes. Ces avant-projet sommaires se baseront sur **un diagnostic détaillé du fonctionnement de la zone d'intérêt** permettant de **qualifier les sites d'expérimentation les plus pertinents**, ainsi que **sur le retour d'expérience d'actions similaires réalisées sur d'autres sites**. Il sera complété par un **protocole de suivi permettant d'évaluer le succès des actions proposées.**

Ainsi, cette étude repose sur les étapes suivantes :

- **Phase I :** L'état des lieux du secteur d'étude et la préparation du choix de deux sites pilotes ;
- **Phase II** : La réalisation des études d'avant-projet sommaire et la définition du protocole de suivi sur les deux sites sélectionnés.

OBJET DU PRESENT RAPPORT

Le présent document est le rapport de restitution de la Phase II. Il présente trois propositions d'avant-projet sommaires pour les deux sites sélectionnés à l'issue de la Phase I.

Site de Craintilleux :

- AVP1 - Scénario avec double butée ;
- AVP2 - Scénario de couverture du seuil par des blocs ;
- AVP 3 –Scénario avec simple butée.

Site de l'Ecopôle :

- AVP1 – Scénario avec triple butée ;
- AVP2 – Scénario avec simple butée ;
- AVP3 – Scénario de seuil à échancrure.

Cette étape fait suite à un travail de concertation autour du choix des scénarios ayant pris place au début de la phase 2, présentés succinctement dans le présent rapport, et dont les éléments de rendu (présentation power point, compte-rendu de réunion, et note technique) sont présentés en Annexe 1, 2, et 3 respectivement.

1. SITE DE CRAINTILLEUX

1.1. PRESENTATION DU SITE

1.1.1. Situation

Le site de Craintilleux se situe en aval du pont de Rivas entre les communes de Craintilleux en rive gauche, et Rivas en rive droite.

Fig. 7. Carte de situation du site de Craintilleux. Source : IGN (géoportail)

Ce site se trouve à l'aval de la confluence de la Loire et du Furan, et à l'amont de la confluence de la Loire avec la Mare et la Coise.

Une vue aérienne récente (2016) du site est présentée ci-après.

Fig. 8. Photographie aérienne du site de Craintilleux. Source : IGN (géoportail)

1.1.2. Données topographiques

Des profils topographiques ont été réalisés sur ce site en février 2020. La localisation des profils est présentée sur la figure ci-après.

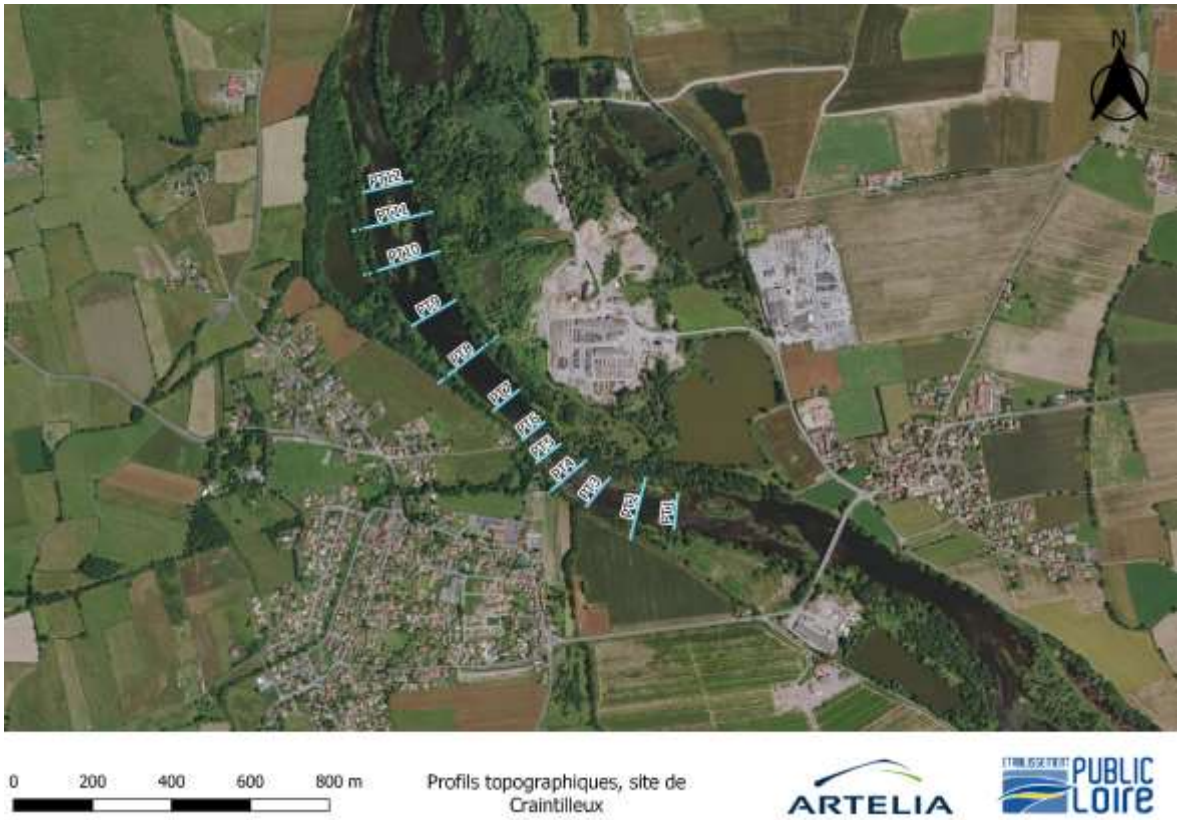


Fig. 9. Site de Craintilleux : profils topographiques

Ces profils sont présentés en Annexe 1.

1.1.3. Caractéristiques du seuil de marnes

Le seuil de Craintilleux est une zone de forte pente pour la Loire : 3‰ au droit du seuil, alors que la pente moyenne de la Loire s'établit autour de 0.2‰ sur le secteur. Il est situé au niveau d'un resserrement de la largeur de la Loire. Cette zone est caractérisée sur la photographie aérienne ci-après par la couleur claire et texturée de l'eau, témoignant de plus fortes vitesse dans le cours d'eau, et d'une lame d'eau plus faible.

Fig. 10. Le seuil de marnes de Craintilleux

Ce site a fait l'objet de deux visites, le 16 mai 2019 et le 3 février 2020. Les photographies ci-après montrent l'affleurement marneux et la configuration du site.

Fig. 11. Photographies de la zone de Craintilleux, photographies ARTELIA, 16 mai 2019 et 3 février 2020

Les dalles sont lisses. Au niveau du seuil, des blocs d'assez grande taille sont présents.

Le site étudié se situe au sein d'un affleurement marneux de plus grande emprise, particulièrement visible au niveau du site de Craintilleux. La zone d'affleurement est en effet déjà visible au niveau du pont de Rivas, et s'étend au moins jusqu'aux îlots situés 1,5 km à l'aval du pont.

Dans l'étude SOGRAH de 1998, il est précisé que l'affleurement commençait 200 m à l'aval du pont de Rivas, ce qui implique un agrandissement de la zone d'affleurement depuis cette époque, et donc une poursuite des processus d'érosion.

Le profil topographique longitudinal du site permet d'appréhender la configuration du seuil.

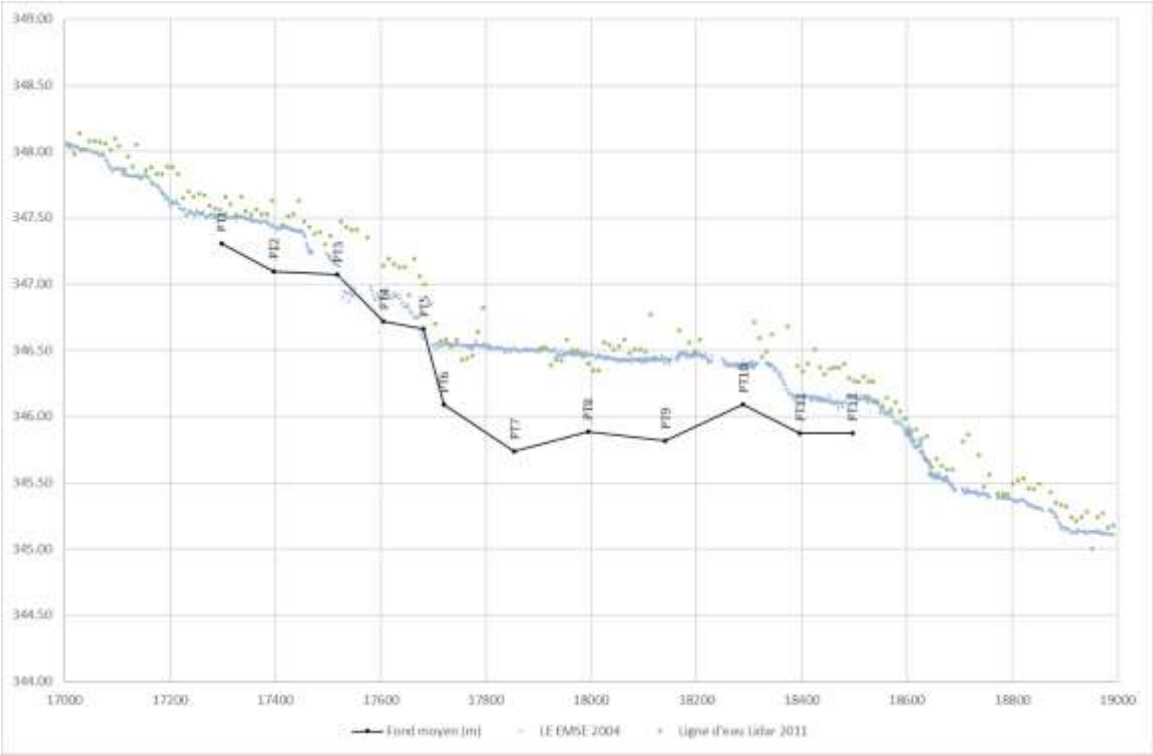


Fig. 12. Profil en long du site de Craintilleux

Au niveau du fond, la chute est de 1.33 m entre le profil 3 et le profil 7, sur une distance de 336 m. La chute est moins marquée au niveau de la ligne d'eau, qui est tenue à l'aval par un fond moins profond (profil 10). La chute de la ligne d'eau est de 0.90 m.

Ce site a connu une incision de l'ordre de 50 cm entre 1995 et 2004 (étude HYDRATEC 2009). Entre 2004, et 2011, le secteur ne semble pas s'être plus incisé (graphe ci-avant). Il pourrait être susceptible de continuer à évoluer dans le futur.

Les profils en travers PT4 à PT7 présentés ci-après avec les mêmes échelles horizontales et verticales permettent d'illustrer la configuration du seuil. Sur le profil P4, en amont du seuil, il n'y a pas de surcreusement. Le lit de la Loire est relativement plat, avec la présence d'une bosse qui correspond à une petite île. Sur le profil PT 5, bien que le fond moyen soit très proche du fond moyen du profil PT4, on distingue déjà un surcreusement localisé, d'une largeur de 5.19 m et d'une profondeur de 0.75 m. Le profil PT6 est situé lui beaucoup plus bas en termes de fond moyen. On y distingue aussi un surcreusement sans doute dans la continuité de celui du profil PT 5, qui se serait élargi (13.36 m) et dont la profondeur est aussi de l'ordre de 0.77 m. Au niveau du profil PT7, dont le fond moyen est le plus bas, ce surcreusement est toujours visible. Il est encore plus large (17.77 m) et de la même profondeur (0.77 m).

Ces éléments suggèrent une érosion de la marne en « canyon », concentrée dans une zone spécifique du chenal. La chute associée à ce seuil de marne est progressive, et non marquée par une marche comme cela peut être le cas pour les seuils « en barrette » présents dans d'autres secteurs de la Loire.

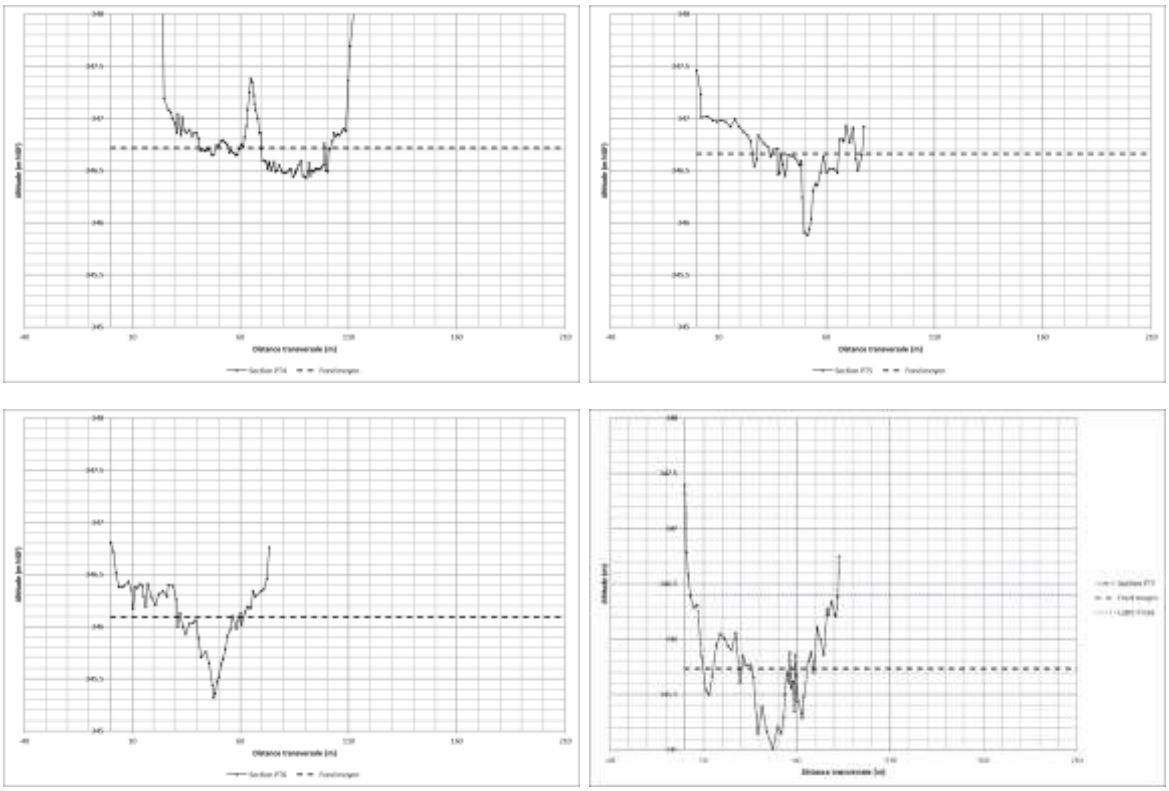


Fig. 13. Profils topographiques PT4 (haut gauche), PT5 (haut droite), PT6 (bas gauche), et PT7 (bas droite)

1.1.4. Diagnostic environnemental

1.1.4.1. Contexte naturel

Le site de Craintilleux est directement concerné par plusieurs zonages.

- **site Natura 2000, directive habitats (ZSC) : Milieux alluviaux et aquatiques de la Loire - FR8201765 ;**
- **site Natura 2000, directive oiseaux (ZPS) : Plaine du Forez FR8212024 ;**
- ZICO : Plaine du Forez n°00185 ;
- ZNIEFF Type 2 : Plaine du Forez n°820002499 ;
- ZNIEFF Type 1 : Fleuve Loire et annexes fluviales de Grangent à Balbigny n°820032225.

Ces zonages valorisent l'ensemble naturel formé par la Loire. Ils comprennent le fleuve et la plaine alluviale qui abritent une mosaïque de milieux naturels notamment humides et aquatiques. Les bordures de la Loire sont remaniées en fonction des déplacements du cours d'eau. La plaine alluviale est également marquée par l'exploitation de gravières qui a largement façonné le paysage. Cet ensemble supporte une biodiversité importante, et constitue une zone particulièrement remarquable pour de nombreuses espèces d'oiseaux.

Les principales pressions identifiées sur ces sites sont :

- la pollution des eaux de surfaces ;

- le changement des conditions hydrauliques induit par l'homme ;
- les espèces exotiques envahissantes ;
- les pratiques agricoles.

Ainsi, les enjeux de conservation visent à :

- maintenir la dynamique du fleuve ;
- favoriser les zones d'érosion et de dépôts sédimentaires ;
- réaménager certains faciès dégradés (fond du lit, berges ...).

Plusieurs autres zonages sont présents à proximité :

- **Site Natura 2000 directive habitats (ZSC) :**
  - Etangs du Forez FR8201755 < 2km
- APB :
  - Etang de la Ronze n°820032194 < 2km
- ZNIEFF Type 1 :
  - FR3800411 Etang De La Ronze < 2km

D'un point de vu général, le site fait partie d'un ensemble naturel à très fort intérêt écologique situé dans un contexte très anthropisé (urbanisation, culture, exploitation de matériaux…). Cet ensemble forme un corridor écologique important.

1.1.4.2. Diagnostic écologique

Le site de Craintilleux est situé dans un contexte anthropique assez marqué. Des chemins longent les berges à proximité immédiate du cours d'eau. La rive droite est très marquée par l'exploitation de gravières, où une carrière est en activité. La rive gauche est caractérisée par la présence d'habitations et d'activités agricoles, notamment de cultures proches de la Loire.

Au niveau aquatique, le matelas alluvial est presque intégralement absent (en particulier à l'amont) si bien que l'écoulement se réalise quasi intégralement sur le substratum rocheux constitué de marnes. Les conditions sont donc très défavorables à la faune aquatique. Un substrat principalement grossier est davantage présent en aval au niveau des ilots. En aval du seuil de marnes, le courant ralentit et des herbiers aquatiques à Elodée du Canada (*Elodea canadensis*) se développent, espèce exotique envahissante formant tout de même un habitat d'intérêt communautaire (3150-1 « Plans d'eau eutrophes avec végétation enracinée avec ou sans feuilles flottantes »).

La Loire est contrainte en rive gauche par un relief très marqué formant une falaise marneuse au centre du site. Les pentes de la berge diminuent en s'éloignant de ce point haut. La forêt alluviale est donc peu présente sur cette rive. En rive droite la berge est largement anthropisée, remblayée sur une grande partie du linéaire. Un chemin parcourt l'ensemble du site laissant un cordon boisé réduit le long de la Loire.

	CORINE Biotopes		Natura 2000				
Libellé habitat naturel	**Code**	**Libellé**	**Code**	**Statut**	**Libellé**	**Enjeux**	**Surface (ha)**
Boisement alluvial	44.4 / 44.1	Forets mixtes de chênes, d'ormes et de frênes des grands fleuves / Formations riveraines de saules	91E0	PR	Forêts alluviales à Alnus glutinosa et Fraxinus excelsior (Alno-Padion,Alnion incanae, Salicion albae)*	Fort	0,1456
Boisement alluvial dégradé	44.4 / 44.1	Forets mixtes de chênes, d'ormes et de frênes des grands fleuves / Formations riveraines de saules	91E0	PR	Forêts alluviales à Alnus glutinosa et Fraxinus excelsior (Alno-Padion,Alnion incanae, Salicion albae)*	Moyen	1,6588
Boisement alluvial récent	44.4 / 44.1	Forets mixtes de chênes, d'ormes et de frênes des grands fleuves / Formations riveraines de saules	91E0	PR	Forêts alluviales à Alnus glutinosa et Fraxinus excelsior (Alno-Padion,Alnion incanae, Salicion albae)*	Fort	0,1625
Boisement mésophile	41.2	chênaies-charmaies		NC		Moyen	0,4157
Chemin	86	Villes, villages et sites industriels		NC		Faible	0,5172
Dalle marneuse	62	Falaises continentales et rochers exposés		NC		Faible	0,0392
Formation à Renouée	37.71	Voiles des cours d'eau	6430	IC	Mégaphorbiaies hygrophiles d'ourlets planitiaires et des étages montagnard à alpin	Faible	0,5373
Loire	24.1	Lits des rivières		NC		Fort	10,0625
Mégaphorbiaie alluviale	53.16 / 37.71	Végétation à Phalaris arundinacea / Voiles des cours d'eau	6430	IC	Mégaphorbiaies hygrophiles d'ourlets planitiaires et des étages montagnard à alpin	Moyen	0,3244

Les principales espèces exotiques envahissantes sont les suivantes :

- La Renouée (*Reynoutria grp. japonica*) est fréquente le long des berges et forme des ensembles parfois importants notamment en rive gauche.
- Le Robinier faux-acacia (*Robinia pseudoacacia*) est également fréquent au sein des cordons boisés de la Loire.

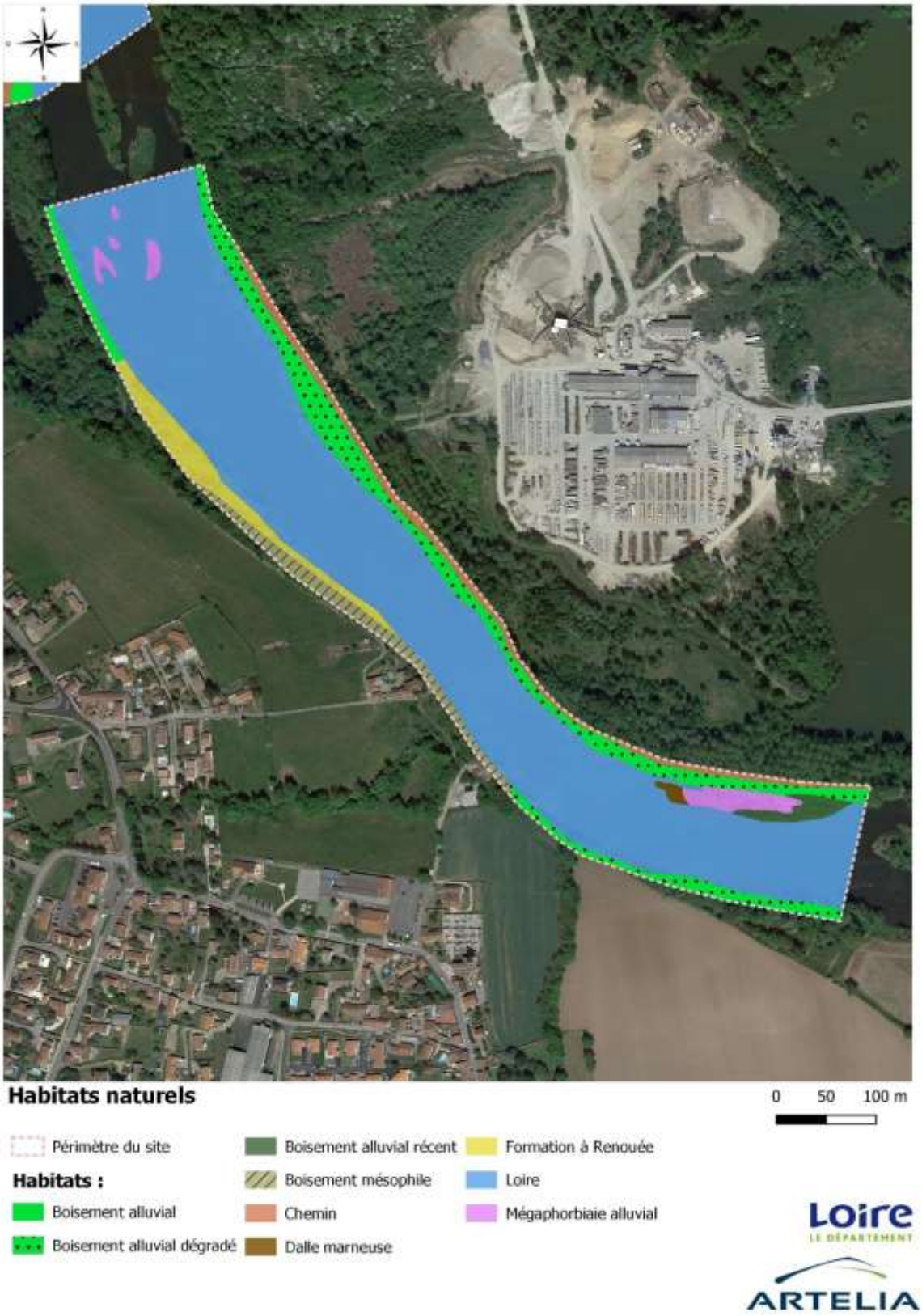


Fig. 14. Carte des habitats naturels du site de Craintilleux

1.2. CHOIX DES SCENARIOS D'AMENAGEMENT

Le choix des scénarios d'aménagement s'est déroulé en plusieurs étapes :

- Le bureau d'étude a présenté plusieurs solutions d'aménagement pour chacun des sites lors d'une réunion du COTECH le 25 novembre 2019. Ces différentes options ont fait l'objet de discussions, et ont amené des suggestions de la part des membres du COTECH.
- A l'issue de cette réunion, des discussions complémentaires ont eu lieu entre le maître d'ouvrage, le bureau d'étude, et certains membres du COTECH, afin d'affiner la définition des scénarios.
- Enfin, une note technique présentant les scénarios retenus a été diffusée à l'ensemble des membres du COTECH pour validation. Ce document a été approuvé.

Les diapositives diffusées lors de cette réunion sont présentées en Annexe 2. Le compte-rendu de la réunion est présenté en Annexe 3. La note technique validée est présentée en Annexe 4.

Ces scénarios sont inspirés des travaux antérieurs réalisés sur cette même problématique :

- Reconstitution du matelas alluvial du lit de la Loire : étude générale, étude détaillée du site de Feurs La grande Motte, Rapport technique de SOGREAH pour la Direction départementale de l'équipement de la Loire, 1998
- Etude complémentaire au diagnostic du SAGE Loire en Rhône-Alpes - Plan d'actions pour limiter le dysfonctionnement géomorphologique du fleuve Loire, Rapport technique, Hydratec, Département de la Loire, 2009

Pour ces différents scénarios d'AVP, il a semblé judicieux de varier les solutions afin de proposer un panel de solutions envisageables. Le niveau d'ambition de protection des marnes varie d'un scénario à l'autre. Le caractère expérimental de ces aménagements est affirmé.

Les grands principes des solutions retenues sont présentés ci-après.

1.2.1. Double butée : principe

Deux butées en enrochements libres sont disposées au milieu et à l'aval du seuil de marnes. Ces butées sont ancrées dans les marnes et visent à assurer la stabilité du matelas alluvionnaire qui doit se reconstituer en amont

Elles ont une hauteur de 50 cm. La pente aval de ces butées est de 4%, avec une forte rugosité afin d'assurer des conditions favorables à la franchissabilité piscicole.

Le lit en amont de la butée aval est rempli de matériaux. On dispose des matériaux de toute taille pour remplir la butée, et des matériaux plus grossiers en surface pour constituer le pavage et assurer la stabilité du matelas alluvial. La pente de cette zone de remplissage est de l'ordre de la pente du lit en aval du seuil (0.1‰).

La butée amont est construite sans apport de matériaux, dans l'objectif d'expérimenter un remplissage naturel.

Cette solution est plus ambitieuse que la simple butée (cf. scénario 3) : elle permet un remplissage alluvionnaire du lit sur un linéaire plus important et devrait permettre une meilleure stabilité du matelas alluvionnaire, la pente du matelas reconstitué étant plus faible.

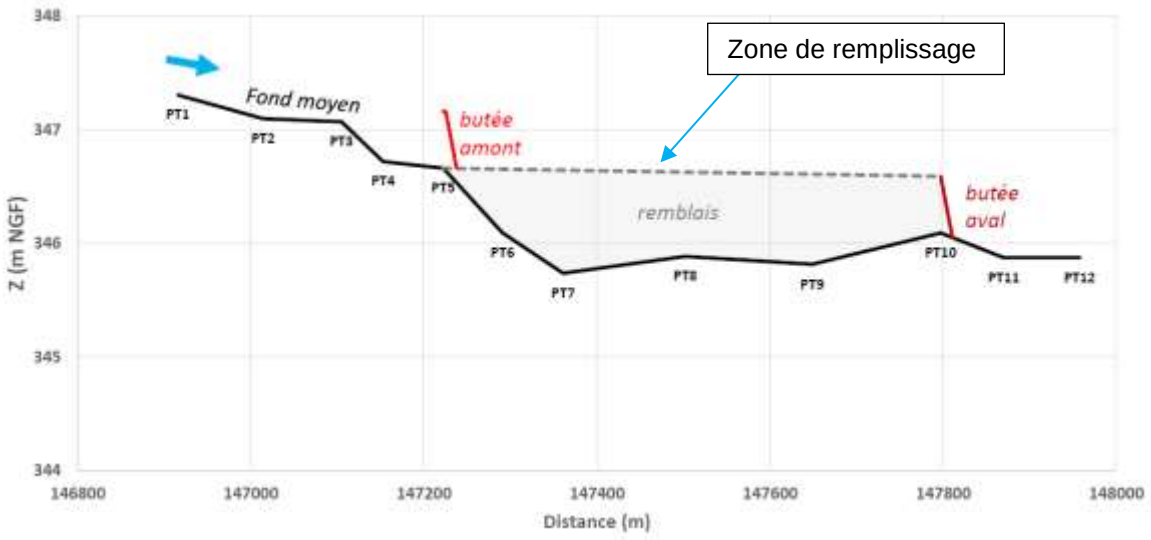


Fig. 15. Site de Craintilleux, Scenario 1 : schéma sur le profil en long

1.2.2. Couverture du seuil par des blocs : principe

On dispose des blocs de grande taille sur toute la surface du seuil et sur toute la largeur du chenal afin de protéger le fond du lit.

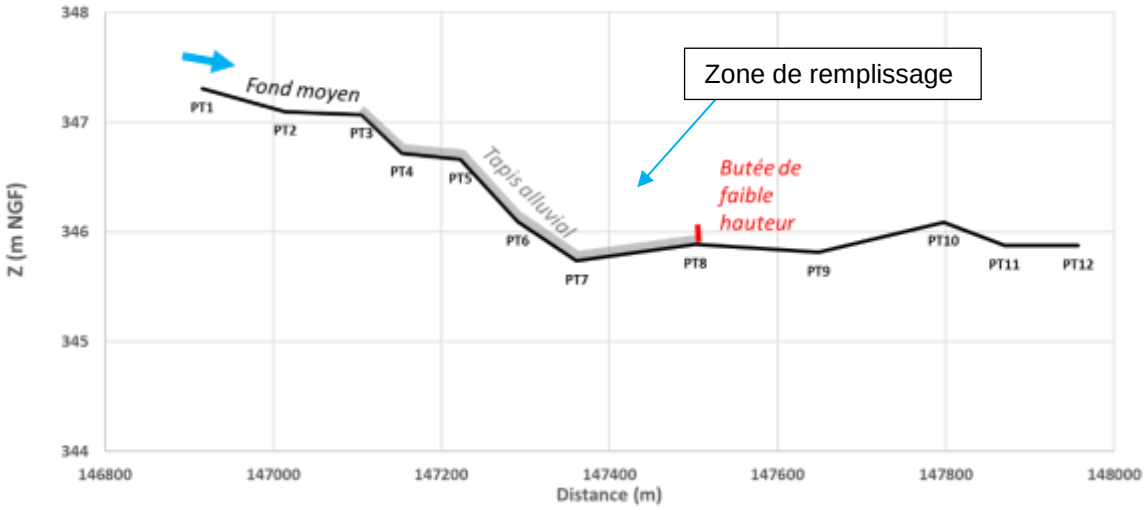


Fig. 16. Site de Craintilleux, Scenario 2 : schéma sur le profil en long

1.2.3. Simple butée : principe

Une butée en enrochements libres est disposée à l'aval du seuil de marnes. Cette butée est ancrée dans les marnes.

Elle a une hauteur de 50 cm. La pente aval de cette butée est de 4%, avec une forte rugosité afin d'assurer des conditions favorables à la franchissabilité piscicole.

La butée est remplie de matériaux. On dispose des matériaux de toute taille pour remplir la butée, et des matériaux plus grossiers en surface pour constituer le pavage. La pente de cette zone de remplissage est de 1.4‰, pente intermédiaire entre la pente du seuil (3‰) et la pente du lit en aval du seuil (0.2‰).

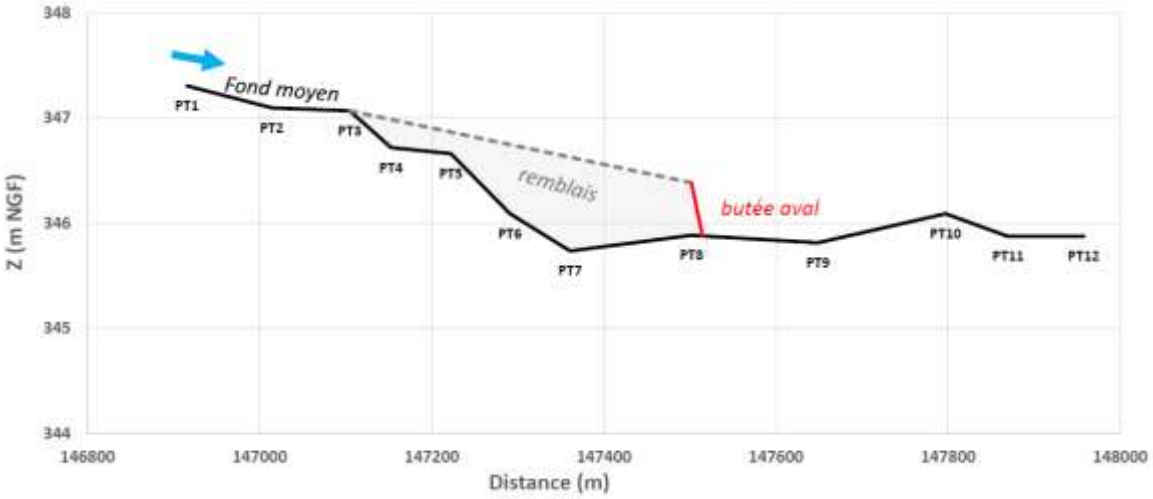


Fig. 17. Site de Craintilleux, Scenario 3 : schéma sur le profil en long

1.3. MODELISATION HYDRAULIQUE

1.3.1. Construction et calibration

L'état actuel et les états aménagés du site de Craintilleux ont fait l'objet d'une modélisation hydraulique unidimensionnelle en régime permanent à l'aide du logiciel HECRAS. Les données topographiques utilisées pour construire le modèle correspondent à 12 sections en travers dans le lit mineur prolongées par les données lidar (2011) pour le lit majeur.

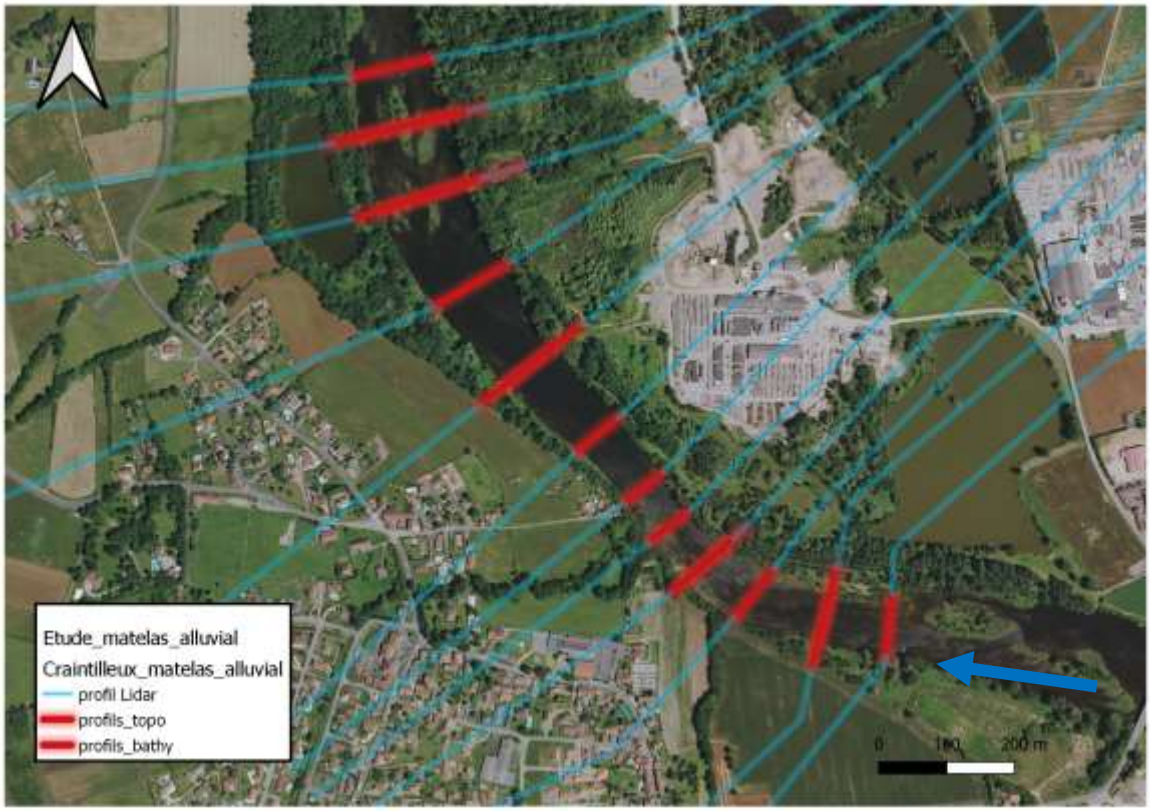


Fig. 18. Carte des profils du modèle hydraulique, site de l'Ecopôle

Un modèle unidimensionnel (Mascaret) construit avec une plus grande étendue spatiale (de Gaudet à Feurs) dans le cadre de l'étude de modélisation 1D réalisée par ARTELIA pour l'EP Loire en 2018 a été utilisée pour déterminer les conditions aux limites du modèle HECRAS utilisé dans la présente étude. Le modèle Mascaret a été calibré en ligne d'eau pour les crues de 2003 et de 2008, et validé sur la crue de 2016. Les simulations HECRAS sont réalisées en introduisant un débit en amont du modèle et en fixant un niveau en aval. La relation niveau aval/débit tirée du modèle MASCARET est présenté ci-après :

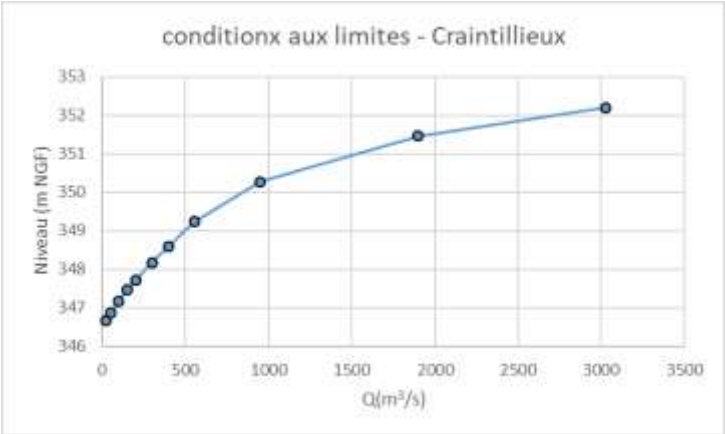


Fig. 19. Site de Craintilleux : relation niveau/débit déterminant la condition à la limite aval du modèle hydraulique

Des coefficients de frottement de Strickler pour le lit mineur et majeur de respectivement 23 et 10 ont été utilisés après validation des lignes d'eau en considérant le modèle MASCARET comme référence pour 4 débits (554, 950, 1900 et 3030 m³/s) :

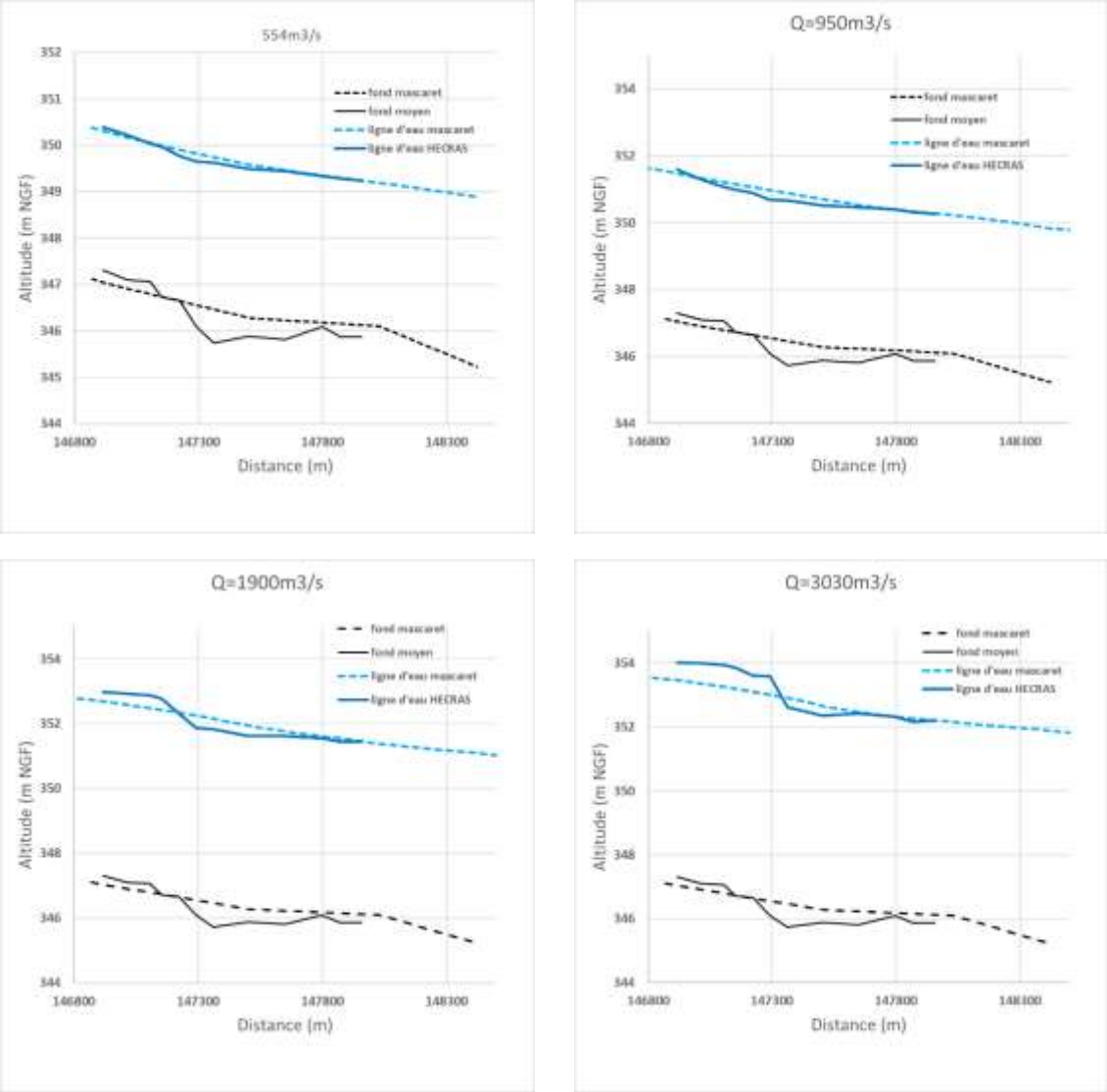


Fig. 20. Comparaison des lignes d'eau obtenues avec le modèle HEC-RAS et le modèle de référence Mascaret pour 4 débits

Les différents états aménagés sont simulés en faisant varier la forme et en ajoutant des sections en travers représentant les aménagements. Les grandeurs hydrauliques (vitesses, contraintes, niveau d'eau, etc.) sont utilisées dans le dimensionnement des aménagements.

1.3.2. Validité et limites du modèle

En complément des lignes d'eau présentée plus haut, on présente ci-après les vitesse et contraintes modélisées pour l'état actuel.

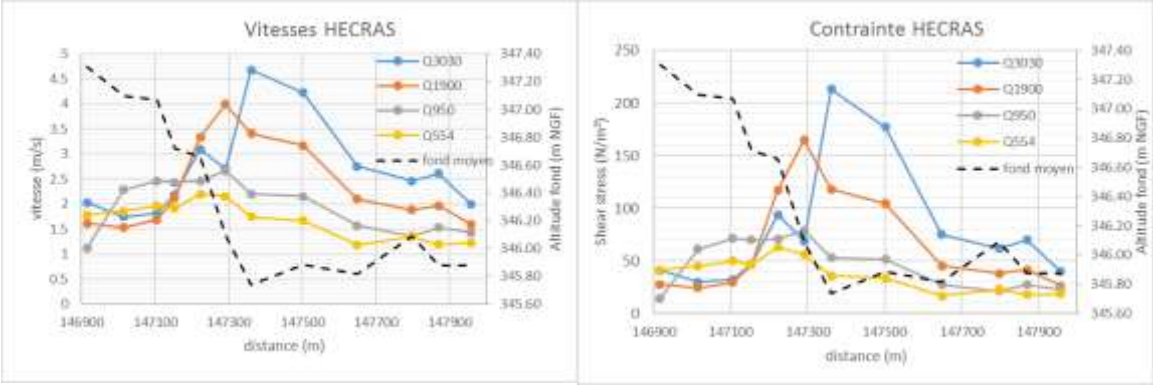


Fig. 21. Résultats du modèle HEC-RAS pour le site de Craintilleux, état actuel, vitesses et contraintes

Pour 554 m³/s (Q2) et 950 m³/s (Crue 2016, Q5-10), les lignes d'eau du modèle construit pour cette étude ont un comportement similaire aux lignes d'eau du modèle mascaret. La représentation du seuil étant plus précise dans le courant modèle, son effet sur la ligne d'eau est visible, avec chute plus prononcée au niveau du seuil. Les vitesses sont de l'ordre de 1 à 3 m/s, avec un pic de vitesse au niveau du seuil. Les contraintes, inférieures à 100 N/m², ont un comportement similaire. Ces deux débits ne sont pas débordant dans ce secteur. Ces comportements sont cohérents. L'écoulement en lit mineur semble représenté de façon adéquate dans ce modèle.

Le comportement du modèle est différent pour les débits plus importants, de 1900 m3/s (Crue 2003, Q20) et 3030 m³/s (Crue 2008, Q50). La ligne d'eau présente une « marche » avec une perte de charge très importante et localisée à l'aval du seuil, qui se traduit par une ligne d'eau en amont du modèle bien supérieure à la ligne d'eau du modèle mascaret. La vitesse et la contrainte présentent des pics à l'aval du décrochement de pente du fond du lit, de 4 à 5 m/s pour la vitesse et de 200 N/m² pour la contrainte. Ces crues sont débordantes dans le secteur. Ce comportant du modèle s'explique par une contraction très importante de la section au niveau du profil P7 (147 500 m), due au fait que ce profil est limité par une digue qui n'est pas submergée à ces débits, alors que l'écoulement coule en lit majeur en amont et en aval de ce profil. Cette contraction se traduit ainsi par des vitesses très importantes et une perte de charge à l'origine de cette « marche » visible au niveau de la ligne d'eau.

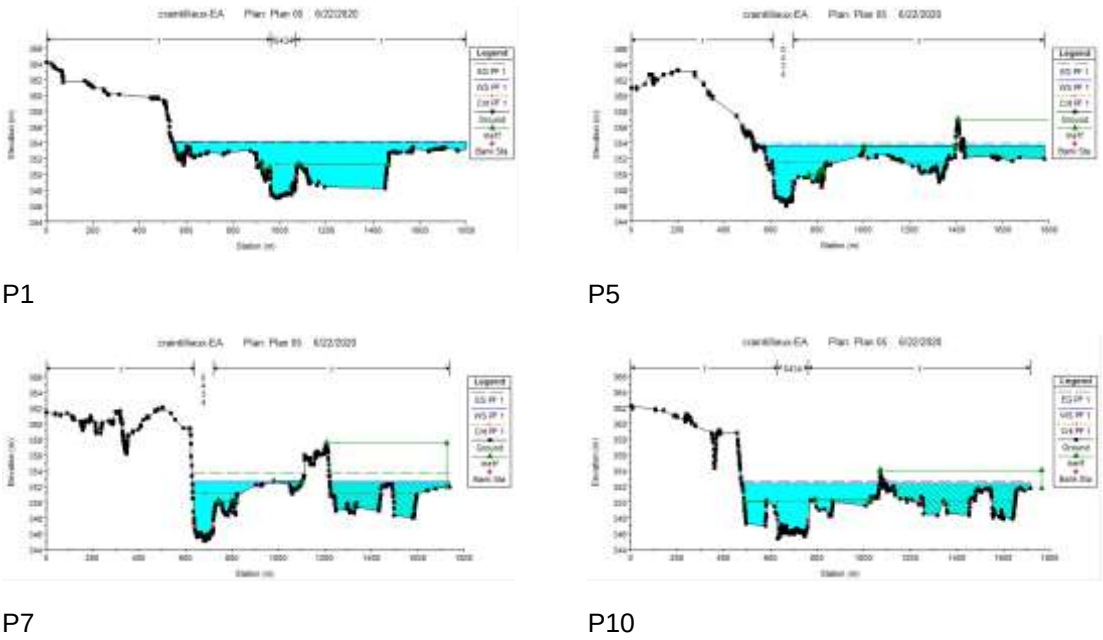


Fig. 22. Profils et lignes d'eau du modèle HEC-RAS pour un débit de 3030 m³/s

Ce comportement ne paraît pas tout à fait réaliste. En effet, en cas de débordement important, on peut s'attendre à un écoulement en lit majeur qui contourne la digue. Ce processus bidimensionnel n'est pas représenté dans le présent modèle. Un tel écoulement en lit majeur aurait pour effet de rendre la contraction de largeur beaucoup moins marquée. On pourrait ainsi s'attendre à une perte de charge moins importante dans le secteur, et un pic de vitesses et de contrainte peut-être existant, mais beaucoup moins marqué. Ainsi, pour les crues débordantes, le modèle est moins fiable, et il surestime très probablement les vitesses et contraintes.

En conclusion, le modèle paraît pertinent pour la représentation des crues non débordantes (temps de retour jusqu'à 10 ans), et moins fiable pour représenter les crues débordantes et les écoulements en lit majeur.

1.4. AVP 1 – DOUBLE BUTEE

1.4.1. Présentation de l'aménagement

1.4.1.1. Principe de l'aménagement

Deux butées en enrochement sont disposées au milieu et à l'aval du seuil de marnes. Ces butées sont ancrées dans les marnes. Elles reprennent le principe généra décrit au *1.2 Choix des scenarios d'aménagement.*

Ses caractéristiques sont les suivantes :

- hauteur par rapport au fond moyen de 50 cm ;
- crête de 120m (aval) et 70m (amont) de large berge à berge, selon la largeur de la Loire ;
- pente du parement aval de 4%, avec une forte rugosité pour créer des abris, afin d'assurer la franchissabilité piscicole.

L'amont de la butée aval est remplie de matériaux. On dispose ainsi entre la butée amont et la butée aval des matériaux de toute taille de remplissage, et des matériaux plus grossiers en surface pour constituer le pavage. La pente de cette zone de remplissage est de l'ordre de 0.1‰ et permet de relier la crête de la butée aval au fond moyen du profil n°5, comme indiqué sur la figure ci-après.

L'amont de la butée amont ne fait pas l'objet de remplissage de de matériaux, dans l'objectif d'expérimenter un remplissage naturel.

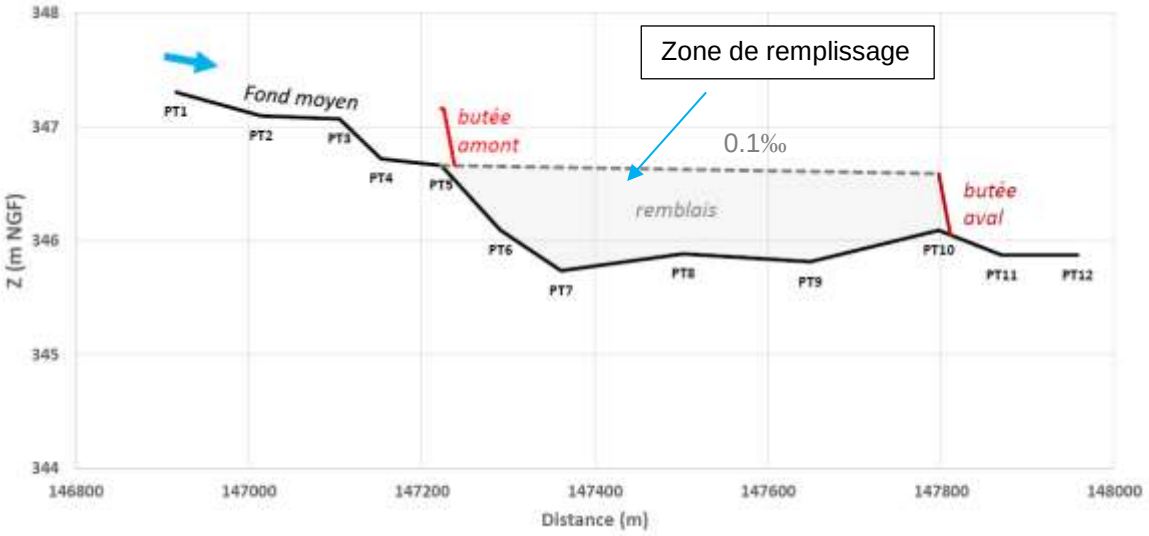


Fig. 23. Schéma sur le profil en long (double butée)

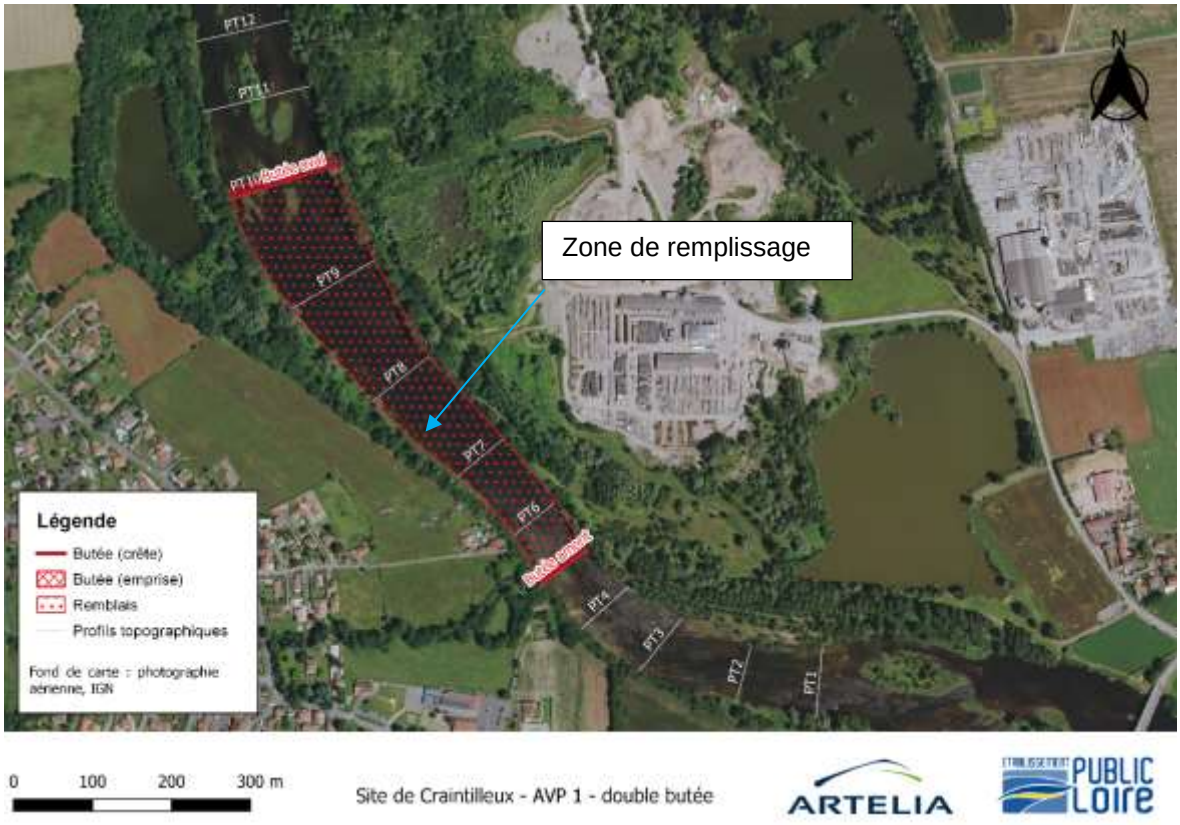


Fig. 24. Vue en plan de l'aménagement (double butée)

1.4.1.2. Butées

Les crêtes des butées sont positionnées au droit des profils n° 5 et n°10, 50 cm au-dessus de la cote moyenne :

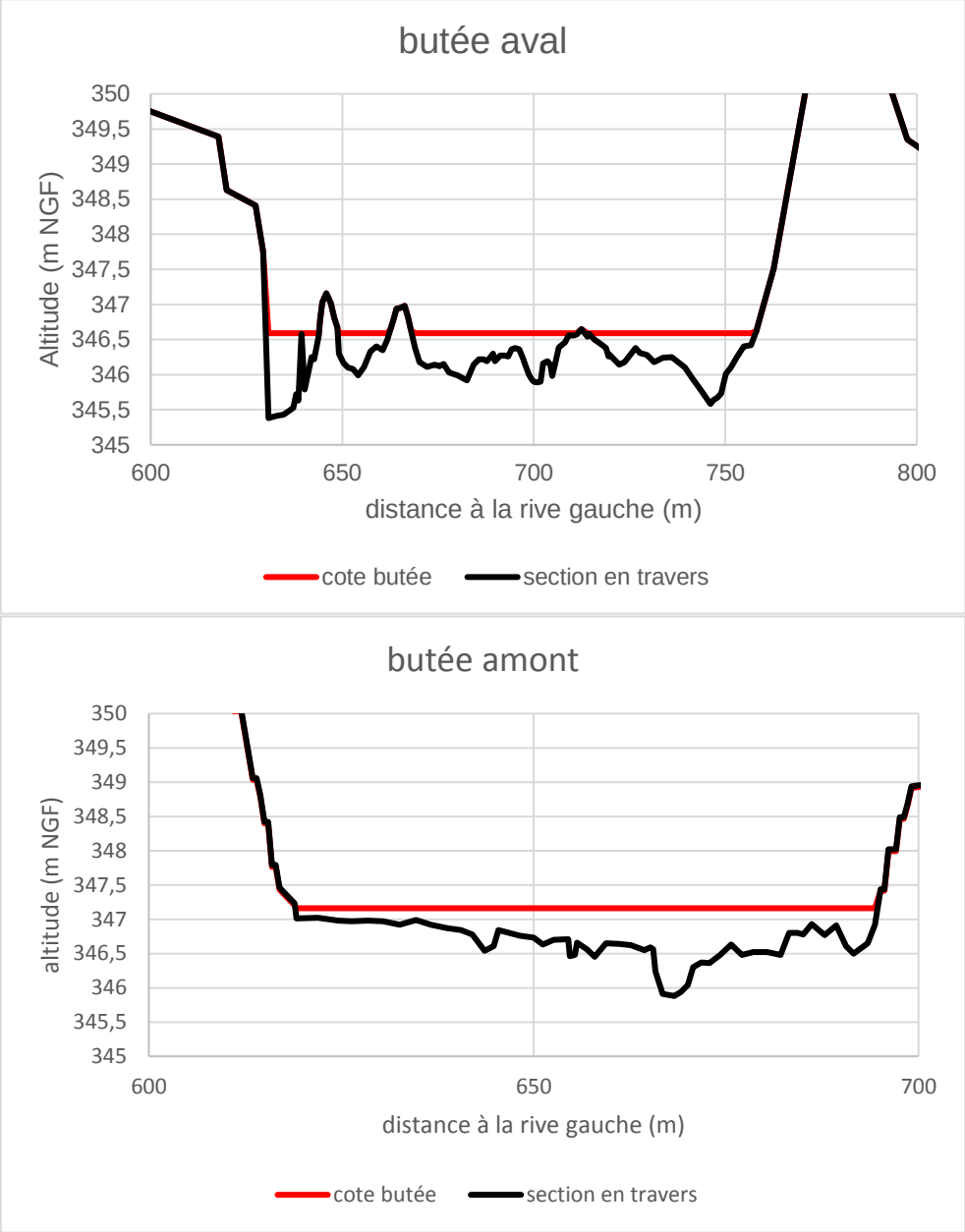


Fig. 25. Coupe en travers des deux butées

Les blocs constituant la butée sont dimensionnés à l'aide des niveaux et vitesses issues du modèle hydraulique 1D.

Des vitesses maximums comprises entre 2.5 m/s et 2.9 m/s sont obtenues par la modélisation hydraulique (Q_{Loire}=3030 m^3/s, temps de retour 50 ans) dans le lit mineur pour les butées amont et aval.

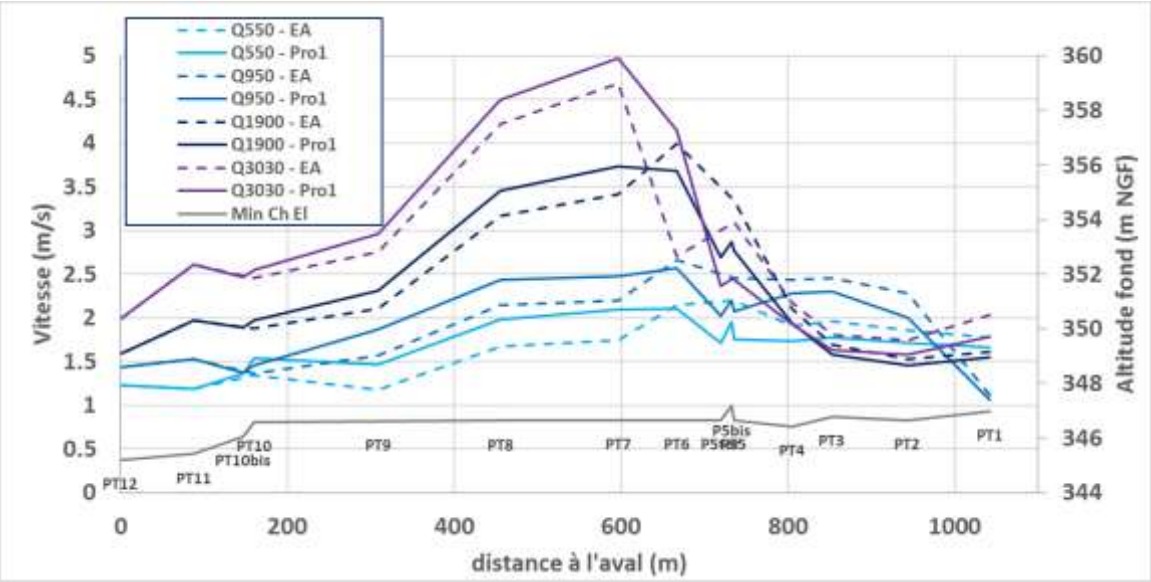


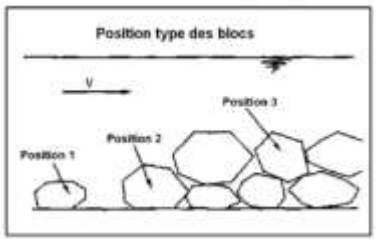
Fig. 26. Distribution des vitesses dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Pro 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 1. Modélisation en régime permanent pour des débits de 550 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

L'approche du dimensionnement des blocs constituants la butée est étudiée suivant la méthode d'Isbach :

$$D_{50} = \frac{V^2}{m^2.2g.\Delta d}$$

Avec :

- D_{50} : blocs moyen (en m)
- V= vitesse dans la section contractée
- m= coefficient fonction de la place du bloc dans la protection. Pour notre cas m=1.2 (position 2)



- g= accélération gravitationnelle (9.81m/s^{-2})
- Δd= densité déjaugée de l'enrochement (1.6 à 1.85)

En utilisant le critère d'Isbach pour des blocs en extrémité de carapace (position 2) on obtient des diamètres de blocs stables de respectivement 18 et 14 cm pour la butée amont et aval.

En conclusion :

La classe d'enrochement **LM10/60** (blocs compris entre 20 et 35cm) est retenue pour constituer les butées, une blocométrie qui devrait permettre d'assurer la pérennité de la structure dans le temps.

Afin d'assurer la stabilité des blocs du parement aval, un ancrage sur l'aval par un décaissement « à minima » dans la marne est proposé pour prévenir le départ des blocs et permettre la mise en œuvre d'un sabot en aval. A noter que sans cet ancrage, les blocs, simplement posés sur le fond du lit, risquent de rouler vers l'aval déstructurant ainsi l'ensemble de la butée. L'épaisseur d'ancrage étant limitée, les blocs pourront être « enfoncés » à l'aide des pelles mécaniques pour augmenter leur imbrication.

Les butées aval et amont ont une largeur de berge à berge de respectivement 120 m et 70 m, ce qui correspond à 1300 m^3 d'enrochements au total.

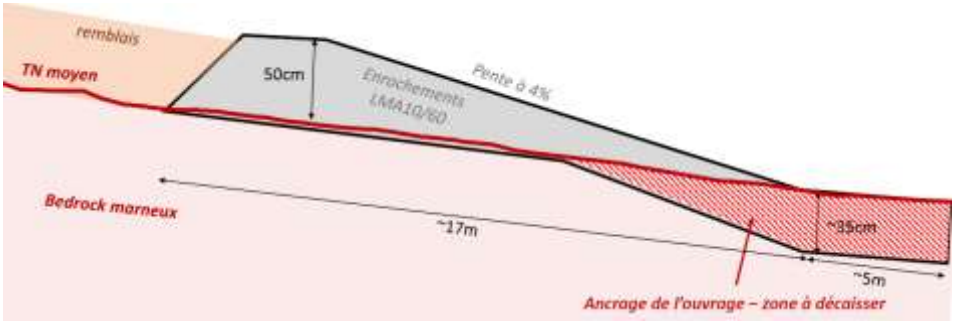


Fig. 27. Butée et matelas alluvial, schéma de principe

Concernant la provenance de ces blocs, la source suivante est envisagée :

- Utilisation de blocs provenant des opérations de désenrochement prévues dans le cadre des actions de réactivation de l'érosion latérale des terrains en bord de Loire. Pour limiter le transport, on suggère d'utiliser les blocs provenant du désenrochement du site de Montrond-les-Bains amont. Le volume disponible est estimé à 1909 m^3. La taille de ces blocs n'est pas connue à l'heure actuelle, elle sera sans doute en grande partie supérieure à la classe 10/60, soit plus stable que les matériaux recommandés.

Fig. 28. Photographie du linéaire d'enrochements qui fera l'objet d'un désenrochement, Montrond-les-Bains, photographie ARTELIA, 4 février 2020

1.4.1.3. Matelas alluvial - zone de remplissage

Concernant le remblai en amont de la butée aval, le critère de Shields est considéré (valeur critique à 0.047). Ce critère permet de définir la contrainte limite de mise en mouvement des sédiments (initiation du charriage) pour des sédiments, en fonction du diamètre des matériaux et des conditions hydrauliques de l'écoulement :

$$D = \frac{\tau}{\tau_c{}^*} \times \frac{1}{(\rho_s - \rho)g}$$

Avec :

- D : diamètre des sédiments (en m)
- τ = contrainte hydraulique (N/m²)
- ρ_s masse volumique solide (kg/m³)
- ρ masse volumique liquide (kg/m³)
- $\tau_c{}^*$ nombre de Shields critique (0.047 dans notre cas).
- g accélération de la pesanteur (m/s²)

Une contrainte de 250 N/m² est obtenue au droit du profil n°7 pour la crue maximum (Q50) indiquant des diamètres stables de l'ordre de 33cm. Pour des débits plus faibles (950 et 1900 m³/s) des diamètres de l'ordre de 10 cm à 20 cm sont stables. Pour rappel, pour les débits importants (1900 m3/s et 3030 m3/s) les contraintes max et donc les diamètres stables sont sans doute surestimés par le modèle hydraulique.

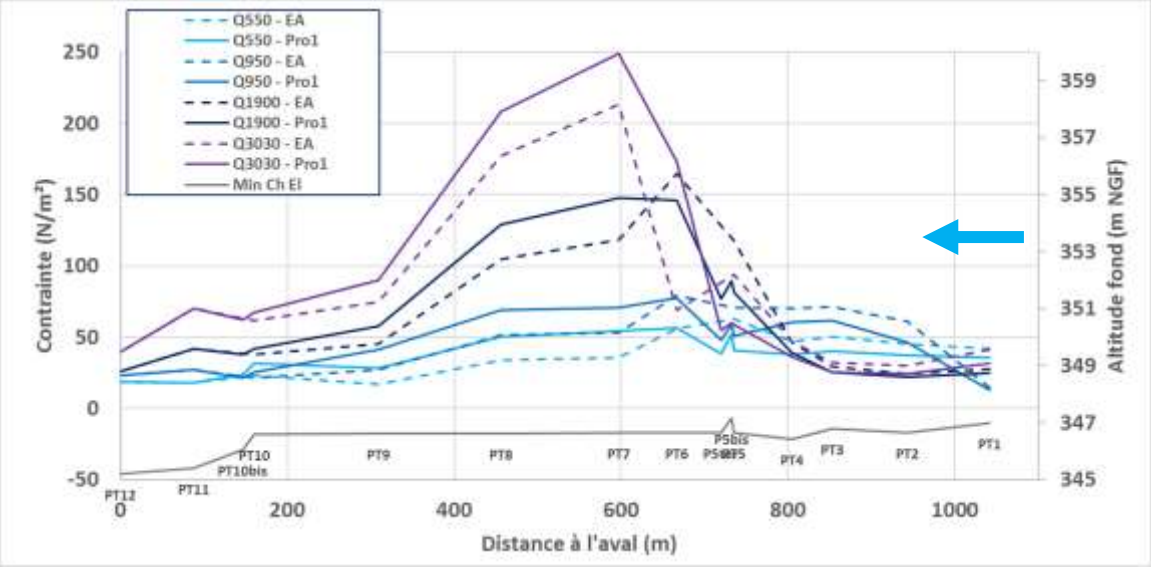


Fig. 29. Distribution des contraintes dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Pro 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 1. Modélisation en régime permanent pour des débits de 550 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

Sur l'ensemble du matelas alluvial, les matériaux les plus grossiers seront disposés en surface préférentiellement entre les profils 6 et 8 où les contraintes sont les plus élevées, tandis que les matériaux plus fins seront disposés en profondeur.

Le volume estimatif basé sur les données topographiques disponibles (calcul de la surface de remblais sur chaque section appliqué sur la distance entre les sections) est de l'ordre de **30 000 m³**.

Les sources de matériaux suivantes sont considérées :

- Arasement des bancs des sites 7, 8 et 9 (Rivas, amont et aval du pont) proposés dans l' « Etude de définition d'actions de restauration sur le Domaine Public Fluvial de la Loire (42) » d'IRH pour la DDT 42, pour un volume de 19 300 m³,
- Complément de matériaux de gravières, avec une granulométrie de type galets (4.5 – 15 cm), pour un volume de 10 700 m³. Ces matériaux plus grossiers seront disposés préférentiellement en surface, en particulier entre les profils 6 et 8 où les contraintes en crue sont les plus importantes.

La granulométrie des bancs concernés par les actions d'arasement est connue, et présentée ci-après. Le d50 est compris entre 4 et 7 cm, et le d90 se situe entre 7,2 et 11 cm. Cette granulométrie étant assez grossière (cailloux fin à grossiers, pierres fines), elle sera adaptée à cette intervention. Ces bancs étant actuellement végétalisés, il est probable qu'une fraction non négligeable du volume considéré soit constitué de matière organique et de matériaux plus fins, qui pourrait cause un relargage temporaire important de matières en suspension (MES).

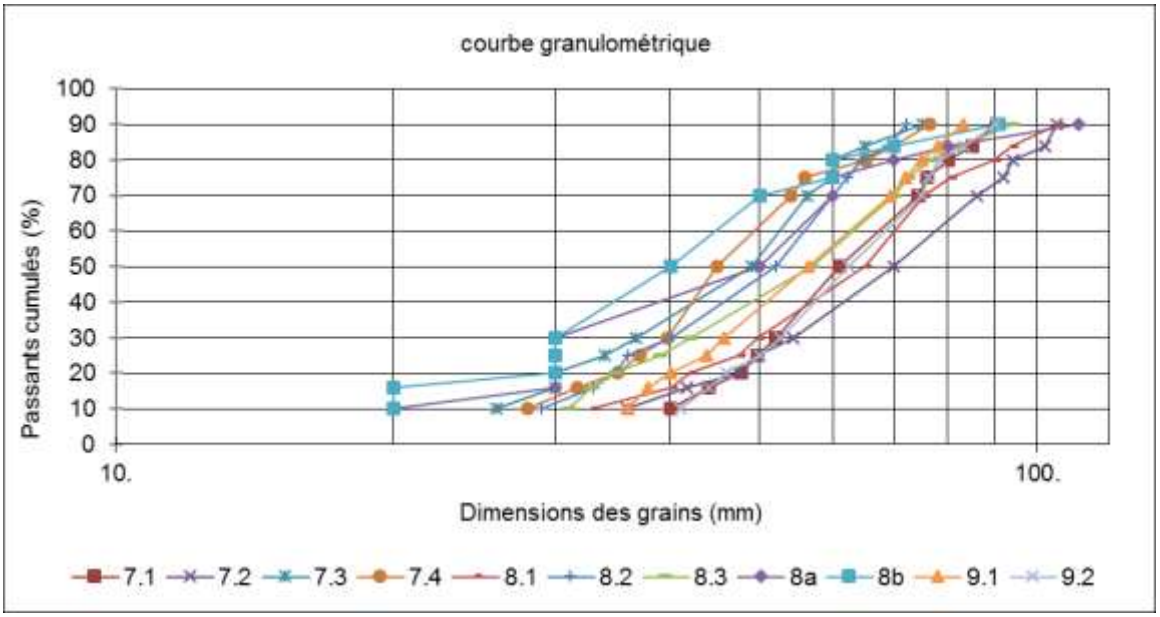


Fig. 30. Courbe granulométriques correspondant aux bancs dont l'arasement est prévu dans le secteur de Rivas/Craintilleux (haut) et carte de localisation des échantillons présentés (bas).

1.4.2. Résultats attendus et impacts

1.4.2.1. Résultats attendus et impacts morphologiques

Cet aménagement protégera les marnes situées au niveau du remblai directement après les travaux. Les marnes situées en amont du profil 5 seront moins exposées hydrauliquement directement après les travaux, et seront réellement protégées par un matelas alluvial après remplissage naturel en amont de la butée. Le remplissage en amont de la butée amont dépendra des apports solides et de l'hydrologie. La pérennité du matelas alluvial dépendra lui aussi de l'hydrologie. La charge solide pourra potentiellement passer à travers la butée pour les granulométries fines ou lors de crues importantes.

Le remblai de l'aménagement est dimensionné pour des crues de temps de retour 10 à 50 ans. Il est probable qu'il soit fortement endommagé lors de passage de crues plus exceptionnelles.

Pendant le remplissage, la butée amont présentera un obstacle temporaire au transport sédimentaire, son rôle étant de piéger les matériaux venant de l'amont. Le volume de sédiments piégés est difficile à évaluer en l'état des connaissances. On connait mal la capacité de piégeage de la butée, et on ne connaît pas non plus a priori la pente d'ajustement des matériaux piégés. En première estimation, on peut envisager un matelas d'une hauteur moyenne de 30 cm entre les profils PT3 et PT5, ce qui correspond à un volume de 4000 m^3 environ. Ce volume est assez proche du volume de transport résiduel annuel estimé à 5000 m^3/an, mais qui reste en réalité très mal connu. Il n'est par ailleurs pas possible d'estimer le taux de piégeage en amont de la butée, fortement dépendant de la granulométrie des apports.

Ainsi, il est possible que la butée amont soit un obstacle à la continuité sédimentaire sur une durée de quelques années, mais qui est fortement dépendant de l'hydrologie : la butée sera peut-être remplie au cours d'une seule crue, et inversement, elle pourrait aussi ne pas se remplir pendant plusieurs années en l'absence de crue et d'apports solides amont. Les travaux d'arasement de bancs et de réactivation de l'érosion latérale situés en amont de ce site pourront contribuer à alimenter ce secteur en matériaux et accélérer la formation du matelas alluvial. Une fois le matelas constitué, cette butée n'aura plus d'incidence sur le transport sédimentaire.

La butée aval ne présentera pas de barrière au transport sédimentaire, dans la mesure ou un matelas alluvial sera constitué au moment des travaux. Ainsi, cette butée ne piègera pas les matériaux venant de l'amont.

On s'attend néanmoins à un ajustement topographique et granulométrique du matelas alluvial.

La figure suivante présente les contraintes de cisaillement modélisées dans le tronçon concerné par l'expérimentation, dans l'état actuel et dans l'état projet, pour différentes crues. Les contraintes de cisaillement sont les contraintes hydrauliques exercées par l'écoulement sur le fond du lit du cours d'eau, qui entrainent les matériaux du lit.

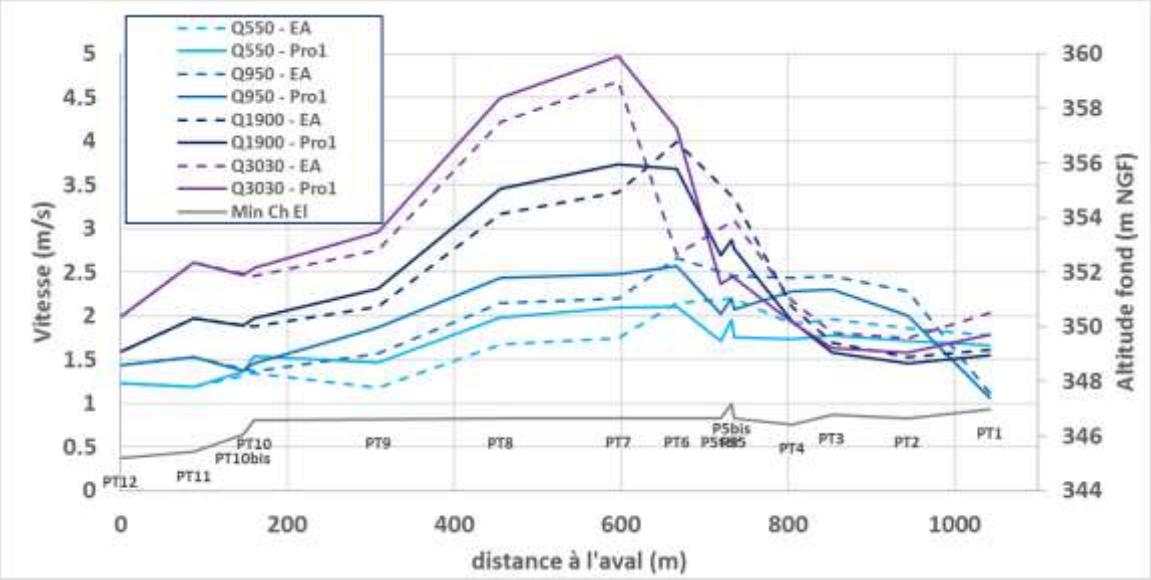


Fig. 31. ***Distribution des vitesses dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Pro 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 1. Modélisation en régime permanent pour des débits de 550 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)***

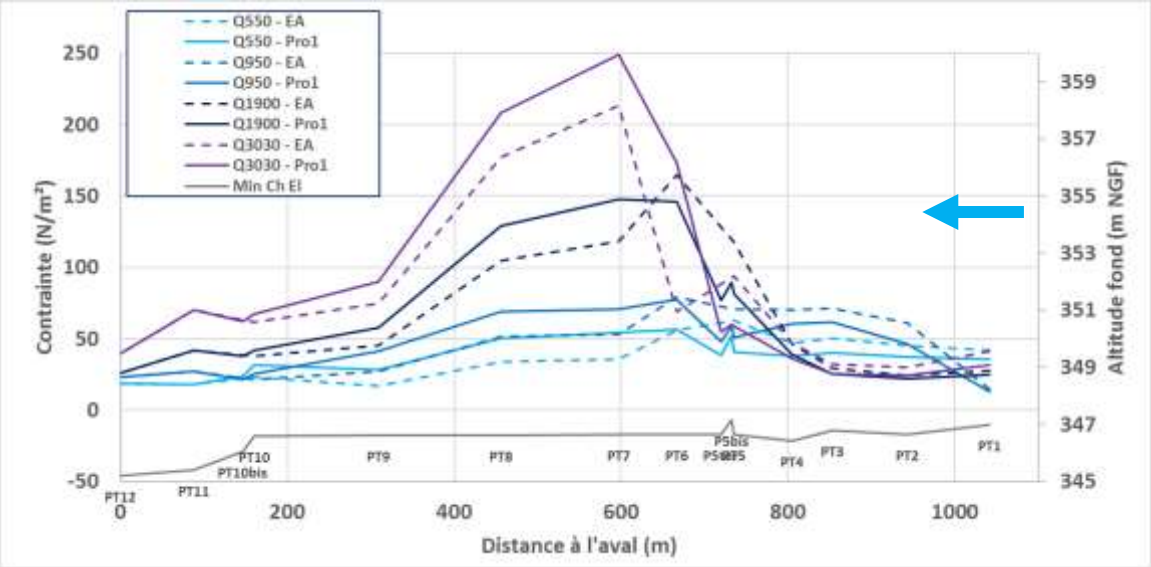


Fig. 32. ***Distribution des contraintes dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Pro 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 1. Modélisation en régime permanent pour des débits de 550 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)***

Sur ces graphiques, l'amont est à droite. On voit que les contraintes et vitesses maximales prennent place entre les profils 6 et 8 déjà à l'état actuel (EA – lignes en pointillé), et que cet effet est exacerbé par l'expérimentation. Pour un débit de 550 m³/s (temps de retour 2 ans) et de 950 m³/s (crue de 2016, temps de retour 5 à 10 ans), les contraintes sont de l'ordre de 50 à 70 N/m². Pour des débits plus importants, ces contraintes sont elles-mêmes beaucoup plus importantes, et atteignent 250 N/m² au niveau de P7 pour un débit de 3030 m³/s (Crue de 2008, temps de retour 50 ans). Pour ces débits important, le débit est moins fiable et surestime probablement les vitesses.

Un tri granulométrique au moment des travaux est préconisé pour prendre en compte la distribution de ces contraintes. Malgré tout, il est probable que ce secteur en particulier évolue au cours des premières crues : creusement et départ des sédiments les plus fins amenant une augmentation de la granulométrie moyenne. Plus à l'aval, le matelas s'ajustera aussi, mais sans doute plus progressivement et dans une moindre mesure.

L'état des connaissances sur la mobilité sédimentaire et l'outil de modélisation 1D utilisé pour le dimensionnement de cet AVP sont intrinsèquement associés à des incertitudes importantes. Le maintien du matelas alluvial dans le temps sur l'ensemble du linéaire, en particulier lors de crues extrêmes, reste incertain. Les sédiments les plus grossiers disposés en surface (couche sédimentaire appelée « armure ») auront une action de protection des matériaux plus fins. En cas de déstabilisation de cette couche de surface, par exemple au cours d'une forte crue, il est possible que l'ensemble du matelas soit rapidement déstabilisé. Ce matelas se reconstituera sans doute dans le temps. La dynamique de remplissage du matelas est mal connue à l'heure actuelle.

1.4.2.2. Résultats attendus et impacts hydrauliques et hydrogéologiques

Le rehaussement de la ligne d'eau lié à l'aménagement est présenté sur la figure ci-après pour différents débits, d'après la modélisation numérique.

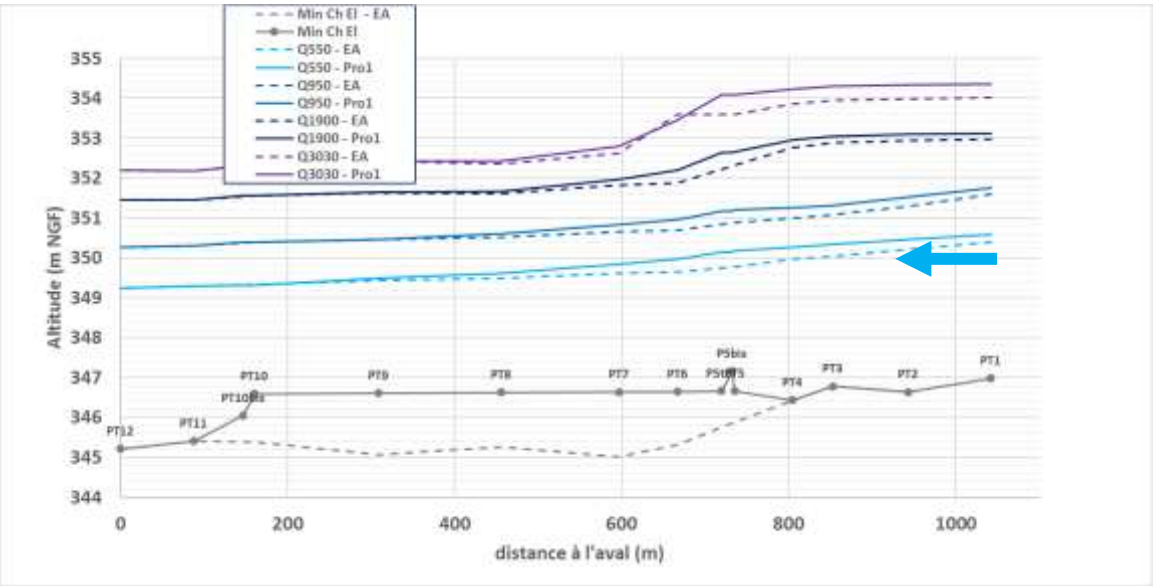


Fig. 33. Lignes d'eau actuelles et dans l'état projet dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Pro 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 1. Modélisation en régime permanent pour des débits de 550 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

En complément, le tableau suivant présente les différences de hauteur d'eau entre l'état projet et l'état actuel pour ces quatre débits.

Tabl. 1 - Différence de hauteur d'eau entre l'état actuel et l'état projet (AVP1), en m (les nombres positifs indiquent une rehausse de la ligne d'eau à l'état projet par rapport à l'état actuel)

	Q550	Q950	Q1900	Q3030
PT1	0.20	0.15	0.14	0.33
PT2	0.24	0.24	0.15	0.34
PT3	0.29	0.24	0.16	0.35
PT4	0.31	0.26	0.18	0.37
PT5	0.41	0.32	0.33	0.48
PT6	0.32	0.26	0.33	-0.13
PT7	0.23	0.17	0.14	0.17
PT8	0.13	0.09	0.05	0.06
PT9	0.05	0.00	0.01	0.01
PT10	-0.02	0.00	0.00	0.00
PT11	0.00	0.00	0.00	0.00
PT12	0.00	0.00	0.00	0.00

Pour les débits de crue, les lignes d'eau sont rehaussées des profils PT1 à PT8. Il est possible que la rehausse des lignes d'eau soit visible aussi en amont de PT1, mais les données disponibles ne permettent pas d'évaluer la longueur de l'influence amont de l'aménagement.

Pour un débit de 550 m^3/s (Q2) et pour un débit de 950 m^3/s (Q5 à 10), qui sont les débits pour lesquels la modélisation est la plus fiable, la rehausse maximale est observée au niveau de la butée amont (profil P5). Elle est de 41 et 32 cm respectivement. Au niveau de P1 en amont du secteur modélisé, elle est de 0.20 cm.

Pour un débit de 3030 m^3/s (Q50), la rehausse maximale de la ligne d'eau est de 48 cm au niveau du profil P5, et la rehausse au niveau du profil P1 est de 33 cm.

Au niveau du profil P8, la rehausse de la ligne d'eau est de 6 à 13 cm en fonction du débit, et elle diminue quand le débit augmente. Pour le profil P9, la rehausse est de 5 cm pour 550 m^3/s, et de 0 à 1 cm pour les débits plus importants. A l'aval (Profil 10 à P12), la ligne d'eau reste inchangée, voir même elle peut être légèrement abaissée (de 2 cm à P10 pour 550 m^3/s).

La butée aval a très peu d'influence sur la ligne d'eau. La pente et les vitesses y sont moins importantes qu'en amont, la largeur est plus grande, l'écoulement plus calme, et de plus cette butée est remplie de matériaux. Par ailleurs, la hauteur de la butée (50 cm) reste faible par rapport à la hauteur d'eau (3 à 7 m selon les débits). Ces facteurs peuvent expliquer le moindre impact de cette butée par rapport à l'influence du matelas alluvial lui-même et de la butée amont.

Une étude de modélisation hydraulique plus détaillée devra permettre de déterminer plus précisément l'augmentation de l'aléa au droit de la plateforme industrielle en rive droite.

La nappe d'accompagnement de la Loire sera à priori rehaussée d'une hauteur de l'ordre de 30 cm au niveau du matelas alluvial reconstitué. Cela aura pour effet un renforcement de l'alimentation des

annexes par la Loire, et ce pour tout débit. Cet effet sera cependant assez local, et concernera principalement la gravière située en rive droite au niveau du profil PT1.

1.4.2.3. Résultats attendus et impacts écologiques

1.4.2.3.1. Impact du projet

Concrètement l'opération de reconstitution d'un matelas alluvial en permettant l'accumulation de sédiments, va permettre le développement d'une zone hyporhéique qui correspond à l'ensemble des sédiments saturés en eau, situés au-dessous et à côtés d'un cours d'eau, contenant une certaine quantité d'eau de surface.

D'un point de vu de la diversité biologique, la présence de sédiments sert de frayères à certaines espèces de poissons, comme la truite (présente sur le secteur d'étude)et les poissons juvéniles se développent dans les interstices. La conception des seuils intègre la franchissabilité piscicole. Ainsi les aménagements ne constitueront pas un obstacle à la continuité écologique. La mise en place de seuils est favorable au maintien d'un niveau d'eau plus haut et donc d'une mise en eau plus efficace d'éventuelles annexes hydrauliques situées à proximité et pouvant servir de frayères.

La zone hyporhéique permet de réguler la température de l'eau en isolant une partie des écoulements. Ainsi les écoulements circulants à travers les granulats du lit ont une température moins élevée. Ce phénomène de régulation à une importance pour la vie aquatique notamment en été, en période de basses eaux. La zone hyporhéique est également colonisée par de nombreux micro-organismes.

Le développement d'une zone hyporhéique a également une incidence positive sur l'autoépuration de l'eau en constituant une zone de stockage des nutriments et associé à une activité métabolique grâce aux micro-organismes. La zone hyporhéique agit comme un filtre physique et biologique L'autoépuration est optimale avec une granulométrie intermédiaire (qui favorise un équilibre entre le temps de transite suffisamment long et un brassage des eaux évitant l'accumulation de certains composés ou avec une micro-hétérogénéité suffisante pour garantir la présence de zones oxygénées et de zones anoxiques.

La création d'un seuil peut cependant engendrer un risque de dépôt de fines et de colmatage du fond défavorable à la vie aquatique.

L'impact sur les habitats naturels des berges est faible en raison d'une emprise très limitée à nulle. L'impact sur les berges est essentiellement lié à la phase travaux pour l'accès au lit mineur.

L'incidence de la reconstitution d'un matelas alluvial est donc largement positive sur le plan environnemental. Les effets seront effectifs sur les emprises spatiales sur lesquelles le matelas va se mettre en place. La diversité granulométrique des sédiments est également un élément favorable.

1.4.2.3.2. Impact des travaux

Les principaux impacts potentiels en phase travaux sont :

- l'utilisation et/ou la création d'accès (dérangement des populations d'espèces faunistiques, destruction éventuelle d'individus, dégradation temporaire des habitats de la berge) ;
- le dérangement et la destruction éventuelle de la faune piscicole ;
- la dégradation temporaire du lit en eau et des habitats aquatiques lors des différents aménagements (création des batardeaux, dépôts de matériaux, circulation des engins…). La phase de travaux dans le lit en eau peut être à l'origine d'un relargage de

matière en suspension. Dans les zones où la marne est affleurante l'impact sera plus limité en raison de l'absence de sédiments.

1.4.3. Modalités de réalisation des travaux

1.4.3.1. Déroulement des travaux

Les travaux seront réalisés en période d'étiage pour limiter les impacts sur l'environnement et éviter les risques de crue pour le chantier. La zone de travaux est isolée des écoulements de la Loire par la mise en place d'une merlon/batardeau de chantier.

(1) Deux pistes d'accès sur chaque rive sont premièrement réalisées. A noter que la piste en rive gauche s'arrête avant la zone présentant des renouées du Japon, laquelle station sera balisée pour éviter tout risque de dissémination.

(2) Un batardeau constitué de matériaux alluviaux et blocs permettant d'isoler la rive droite est ensuite créé pour permettre la construction de la partie en rive droite des butées en amont et aval et le remplissage entre butées. Ce batardeau fait environs 3.4 m de haut, 3 m en crête et 15 m en pied sur 750 m linéaires, ce qui représente un volume de l'ordre de 23 000m^3 de matériaux. Il permet le passage d'un débit de l'ordre de 100 m^3/s une fois le remblais constitué. Cette capacité est suffisante pour supporter les éclusés quotidiens réalisés par EDF (80 m^3/s au maximum).

(3) Une fois les butées et le remplissage achevés sur la demi largeur rive droite, la partie aval et amont du batardeau sont basculées en rive gauche pour mettre à sec la rive gauche de la Loire. L'écoulement est alors en rive droite et la construction des butées et du remblai peuvent avoir lieu à sec.

(4) Une fois cette étape achevée, une partie du volume du batardeau (15 000 m^3) est utilisé pour combler la zone à remblayer en rive gauche, le reliquat (8000 m^3) est évacué.

(5) Pour finir, les pistes d'accès sont enlevées et les emprises concernées remises en état.

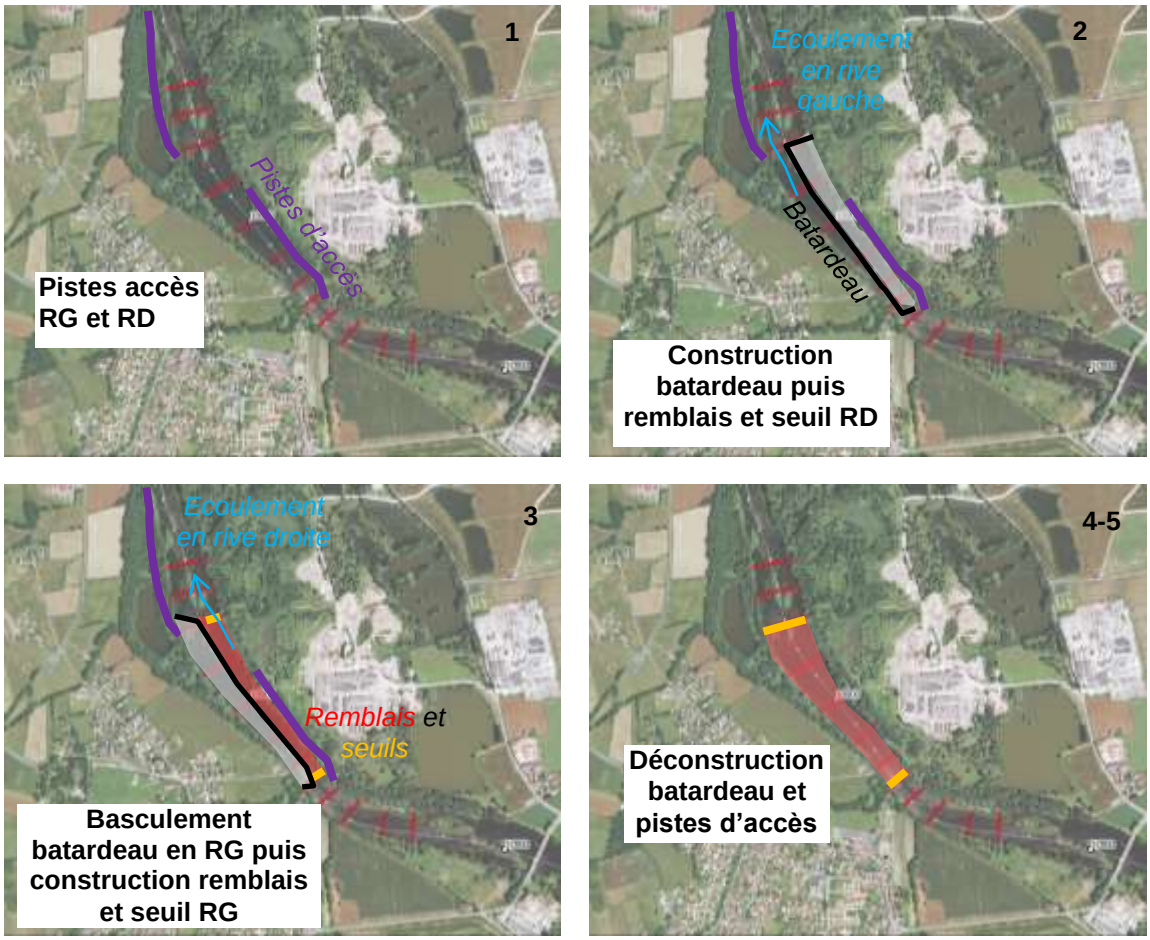


Fig. 34. Déroulement des travaux

1.4.3.2. Accès et pistes de chantier

Deux pistes et rampe d'accès sont réalisées, une depuis l'aval en rive gauche, la seconde depuis l'amont en rive droite. A noter la présence de plantes invasives (renouée du Japon) en rive gauche en amont de la piste.

En rive gauche, l'accès nécessite un passage sur les parcelles cadastrales de Craintilleux A 218, 219, 220, 221,222, parcelles privées.

En rive gauche, l'accès nécessite un passage sur les parcelles cadastrales de Rivas A 446 et A 24, dont le caractère privé ou public n'est pas connu à ce stade.

Lors de la mise en place des batardeaux mais aussi du remplissage inter butées, la portance de la marne peut amener à des difficultés de chantier en fonction de sa portance. Il sera préférable de procéder à une reconnaissance géotechnique complémentaire afin de s'en assurer.

1.4.3.3. Prise en compte des enjeux environnementaux

Aux vues des enjeux écologiques identifiés, les préconisations suivantes permettront de réduire les impacts environnementaux de la phase travaux :

- Période d'intervention adaptée à la faune piscicole (août à octobre). Cette période limitera également en partie les impacts sur la faune et la flore des berges lors de la création des accès.
- Gestion des plantes exotiques envahissantes. Une attention particulière sera portée à l'Elodée du Canada (plante aquatique) présente sur le site, ainsi qu'à la Renouée du Japon au niveau des berges. D'autres espèces invasives sont potentiellement présentes et nécessiteront de faire l'objet d'une gestion adaptée.
- Mesures de réduction intégrées aux phases de chantier (suivi environnemental du chantier, balisage préalable de l'emprise de la zone de travaux…)
- Evitements des enjeux faune flore pour la création des accès
- La réalisation du batardeau se fera d'amont vers l'aval. Lors de la mise en place du batardeau, des MES (matières en suspension) seront relarguées. Cette situation est difficilement évitable. Une pêche de sauvegarde sera mise en œuvre afin de minimiser l'impact sur la faune aquatique. Une fois le batardeau achevé, un écoulement dans l'enceinte du batardeau est toujours possible (percolation à travers les matériaux imperméables). Avant rejet au lit mineur en dehors de l'enceinte du batardeau, les eaux seront décantés au travers de barrages de matériaux de type gravette. Suivant les demandes spécifiques des services de l'état un suivi qualité peut être réalisé pendant les travaux de mise en place des batardeaux. Si la situation hydraulique au moment de sa mise en place semble trop critique vis-à-vis de la préservation des espèces, les travaux peuvent être stoppés momentanément.

1.4.3.4. Calendrier et phasage

Etant donné les enjeux environnementaux (période pour la faune propice de septembre à novembre) et les contraintes liées à l'hydrologie (crues courantes en novembre), la période de travaux la plus propice est la période aout-septembre.

On présente ci-après un calendrier prévisionnel de la réalisation des travaux.

Phase	Aout				Septembre			
Création accès - apport matériel - installation travaux								
Construction batardeau depuis RD								
Construction butée amont - RD								
Construction butée aval - RD								
Remblais - RD								
Bascule batardeau pour RG								
Construction butée amont - RG								
Construction butée aval - RG								
Remblais - RG								
Déconstruction batardeau et fin de chantier								

1.4.4. Estimation des coûts

Le chiffrage est effectué sur la base de l'expérience du bureau d'étude en maîtrise d'œuvre de travaux similaires.

Désignation de la nature des travaux	unité	Quantité	Prix unitaire HT (€)	Montant HT (€)
Etudes préliminaires				***55 000 €***
Mesures topographiques complémentaires (modélisation + projet)	F	1	15 000 €	15 000 €
Modélisation hydraulique 1D/2D	F	1	20 000 €	20 000 €
Investigations géotechniques	F	1	8 000 €	8 000 €
Etude projet	F	1	12 000 €	12 000 €
Maîtrise d'œuvre	F	1	48 562.20 €	***48 562 €***
Installation chantier/frais généraux/divers	F	1	52 785 €	***52 785 €***
Batardeaux chantier (RG et RD)	F	1	174 500 €	***174 500 €***
Pêche électrique	F	1	2 500 €	2 500 €
Remblais apport et mise en batardeau, pour phasage 1	m3	23000	5 €	115 000 €
Reprise et mise en remblai des déblais (batardeau) pour phasage 2	m3	3000	1 €	3 000 €
Régalage sur site des déblais de rivière	m3	15000	2 €	30 000 €
Evacuation du reliquat	m3	8000	3 €	24 000 €
Travaux préparatoires				***6 000 €***
Débroussaillage	m²	2500	2 €	5 000 €
Déboisement	u	10	100 €	1 000 €
Remblais				***57 800 €***
Remblais en grande masse - Loire 2km	m3	4300	1 €	4 300 €
Remblais en grande masse - Carrière	m3	10700	5 €	53 500 €
Enrochements				***104 000 €***
Amenée et pose des enrochements sur les seuils	m3	1300	80 €	104 000 €
Reprise berges				***600 €***
Reprofilage berges 1/1	ml	100	6 €	600 €
Voirie				***9 000 €***
Piste circulation engins : fourniture et mise en œuvre des matériaux	ml	500	18 €	9 000 €

Sous-total HT	**508 247 €**
Imprévus (20%)	101 649 €
Total HT	**609 897 €**

Note : le prix des matériaux issus des gravières ou carrière est fortement dépendant des fluctuations du marché local.

1.4.5. Etudes complémentaires

Les études suivantes (AVP / Projet) devront inclure les points suivants :

- Afin d'affiner le chiffrage des travaux un levé topographique sera nécessaire à la réalisation des étapes suivantes. La butée fera l'objet d'un relevé au 1/100 sur son emprise, afin de réaliser des profils en travers précis. La zone de remplissage entre butée fera l'objet d'un relevé au 1/500. En complément, pour la réalisation du modèle hydraulique (cf. ci-après), la réalisation de profils bathymétriques additionnels sera nécessaire (10 profils),
- Une étude de modélisation de l'inondation du lit majeur : modélisation 1D en lit mineur, et 2D en lit majeur. L'emprise doit s'étendre environ 3 km en amont et autant en aval du site de l'intervention, pour bien représenter les débordements et les mouvements dans le lit majeur.

- Faire un essai pour vérifier la portance de la marne vis-à-vis de la circulation des engins de chantier :
  - Soit par la réalisation de sondages à la pelle depuis la berge pour, de visu, attester de la compacité ou non de la marne
  - Soit réaliser des sondages carottés en haut de berge et prélever à la hauteur correspondant à la marne un échantillon intact pour essai labo de compacité.
- Etude AVP détaillé / projet (ces deux études peuvent être combinées)

1.4.6. Approche réglementaire

Les démarches administratives à réalisation du projet sont présentées ci-après. La réalisation du projet nécessitera un dossier d'autorisation au titre de la loi sur l'eau. Un dossier de Demande d'Autorisation Environnementale devra donc être établi.

La nécessité d'une étude d'impact (évaluation environnementale) n'est pas à écarter étant donné la nature des travaux, mais reste à l'appréciation de l'administration. Dans ce sens un travail de concertation et d'échange en amont paraît indispensable afin de bien cadrer le contexte réglementaire du projet, notamment vis-à-vis de la nécessité de réaliser un dossier de dérogation espèces protégées. Une étude naturaliste complémentaire sera nécessaire pour la réalisation des dossiers règlementaires à adapter au site et selon le cadrage avec la DREAL.

Nomenclature IOTA	Demande d'Autorisation au titre de Rubrique 3.1.2.0 : Modification du profil en long et en travers sur une longueur supérieur à 100 m. Rubrique 3.1.1.0 Installations, ouvrages, remblais et épis, dans le lit mineur d'un cours d'eau Possible concernant la rubrique 3.1.5.0 : Destruction de frayères, sur une surface de plus de 200m²
Evaluation environnementale	Examen au cas par cas au titre de Catégorie 10. Canalisation et régularisation des cours d'eau
Evaluation des incidences Natura 2000	Oui Site Natura 2000 directive habitats (ZSC) : Milieux alluviaux et aquatiques de la Loire - FR8201765 Site Natura 2000 directive oiseaux (ZPS) : Plaine du Forez FR8212024
Dérogation espèces protégées	Possible Nécessite un cadrage avec la DREAL
Demande de défrichement	Non

1.5. AVP 2 – COUVERTURE DU SEUIL PAR DES BLOCS

1.5.1. Présentation de l'aménagement

1.5.1.1. Principe

Des blocs sur toute la surface du seuil et sur toute la largeur du chenal sont positionnés sur le seuil de marnes (P3 à P8). Ce tapis se termine par des enrochements en aval, encrés dans la marne. Ce tapis reprend le principe général décrit au *1.2 Choix des scenarios d'aménagement.*

Ce tapis présente les caractéristiques suivantes :

- tapis réparti sur toute la largeur du chenal (épaisseur plus importante dans les zones les plus profondes);
- taille des blocs de 10 - 15 cm ;
- rehausse des fonds de 20 cm en moyenne ;
- butée de faible hauteur en enrochements ancrés dans la marne en aval afin d'assurer la stabilité de l'ouvrage et la franchissabilité piscicole.

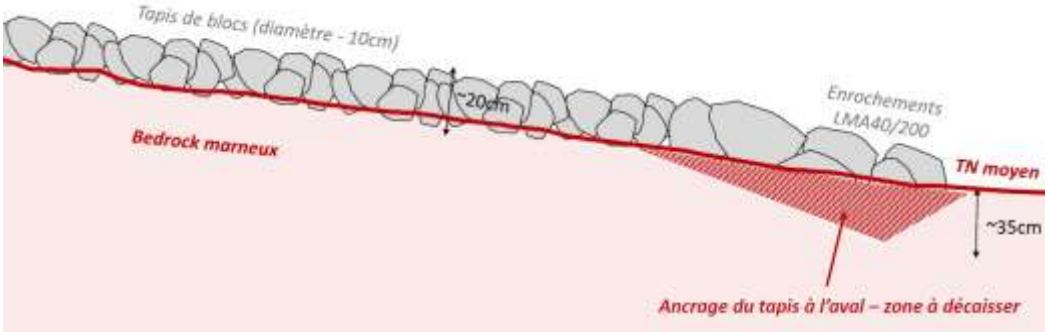


Fig. 35. Schéma de principe

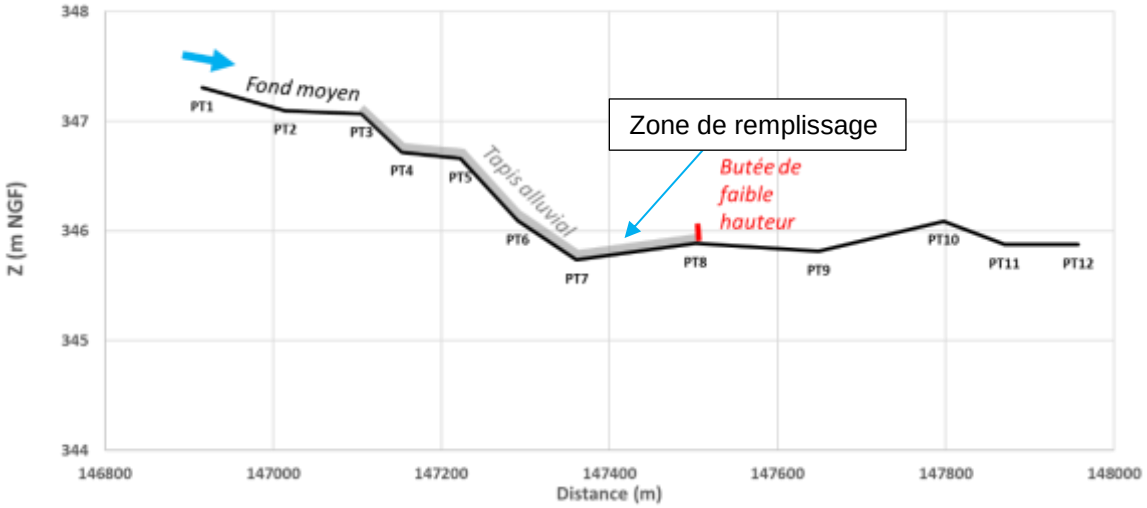


Fig. 36. Vue du Scenario sur le profil en long

Fig. 37. Vue en plan de l'aménagement

1.5.1.2. Ancrage du matelas alluvial

Le tapis de blocs protégeant le seuil de marne est positionné entre les profils n° 3 et 7. Un ancrage est réalisé à l'aval au droit du profil n° 7. Les simulations hydrauliques 1D donnent des vitesses de l'ordre de 4.7 m/s et 3.4 m/s pour des débits de respectivement 3030 m³/s et 1900 m³/s.

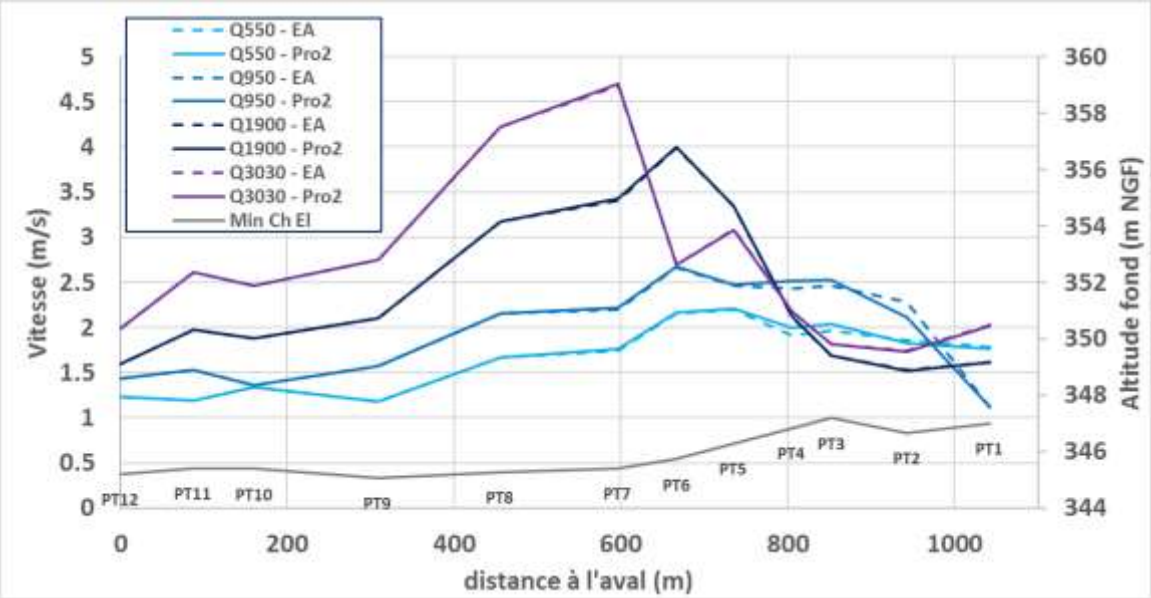


Fig. 38. Distribution des vitesses dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Pro 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 2. Modélisation en régime permanent pour des débits de 550 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

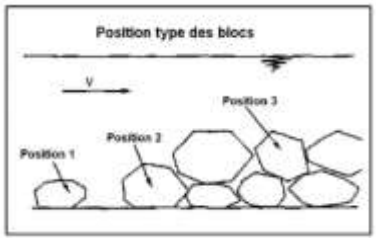
L'approche du dimensionnement des blocs constituants la butée est étudiée suivant la méthode d'Isbach.

La formule utilisée est la suivante :

$$D_{50} = \frac{V^2}{m^2 . 2g . \Delta d}$$

Avec :

- D_{50} : blocs moyen (en m)
- V= vitesse dans la section contractée
- m= coefficient fonction de la place du bloc dans la protection. Pour notre cas m=1.2 (position 2)



- g= accélération gravitationnelle (9.81m/s^{-2})
- Δd= densité déjaugée de l'enrochement (1.6 à 1.85)

Les diamètres stables correspondant, considérant le critère d'Isbach (blocs en extrémité de carapace), sont de 49cm et 26cm ce qui correspond à la classe d'enrochements **LMA40/200** (diamètres de blocs compris entre 31 et 53cm). Un ancrage sur l'aval par un décaissement « à minima » dans la marne est proposé pour prévenir le départ des blocs. A noter que sans cet ancrage, les blocs risquent de rouler vers l'aval déstructurant ainsi l'ensemble de la structure. L'épaisseur d'ancrage étant limitée, les blocs pourront être « enfoncés » à l'aide du godet des pelles mécaniques pour augmenter leur imbrication.

Le volume de bloc estimé est de **200 m3**.

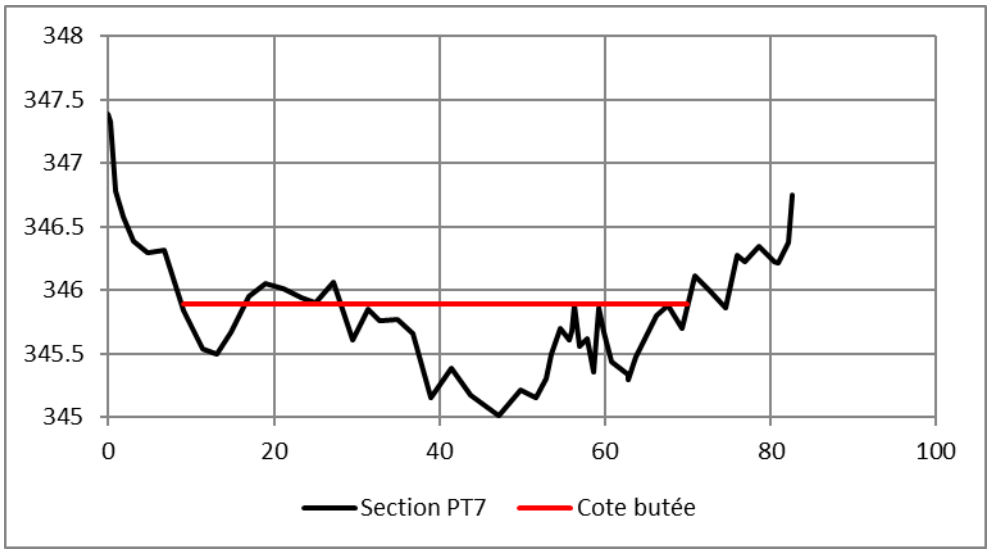


Fig. 39. Coupe en travers de la butée

1.5.1.3. Blocs du matelas alluvial - zone de remplissage

Concernant le matelas de blocs protégeant le seuil de marne, le critère de Shields est considéré (valeur critique à 0.047).

$$D = \frac{\tau}{\tau_c{}^*} \times \frac{1}{(\rho_s - \rho)g}$$

Avec :

- D : diamètre des sédiments (en m)

- τ = contrainte hydraulique (N/m²)
- ρ_s masse volumique solide (kg/m³)
- ρ masse volumique liquide (kg/m³)
- τ_c^* nombre de Shields critique (0.047 dans notre cas).
- g accélération de la pesanteur (m/s²)

Une contrainte de 215 N/m² est obtenue au droit du profil n°7 pour la crue maximum indiquant des diamètres stables de l'ordre de 28 cm. Pour des débits plus faibles (950 et 1900m³/s) des diamètres de l'ordre de 10 cm à 20 cm sont stables.

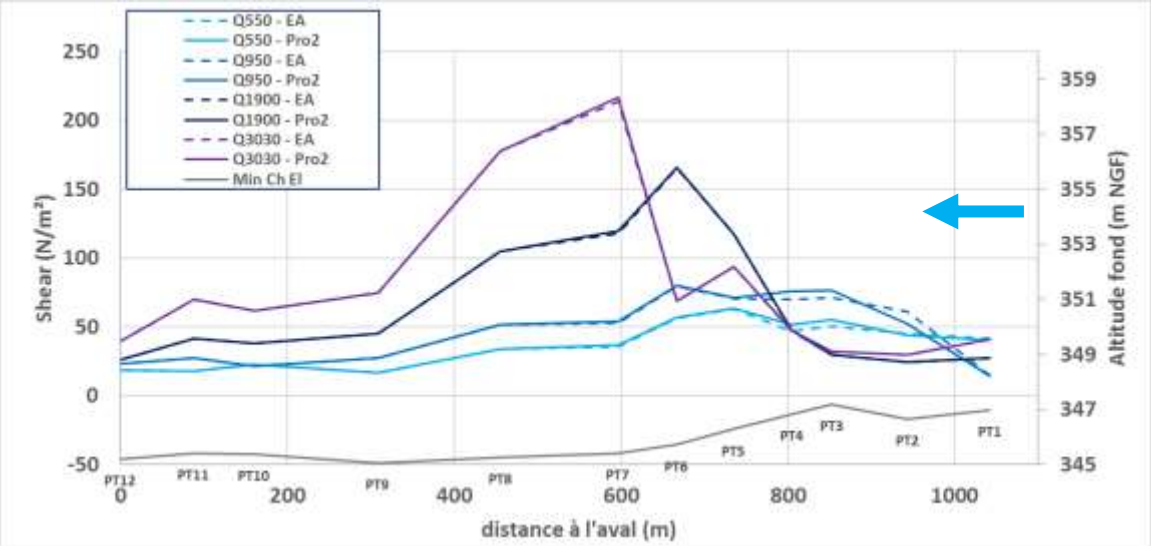


Fig. 40. Distribution des contraintes dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Pro 2 = état projet pour le Scénario de l'AVP 2. Modélisation en régime permanent pour des débits de 550 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

Pour la réalisation du tapis alluvial, on retient une granulométrie de 10 à 15 cm, pour les raisons suivantes :

- Cette granulométrie peut être obtenue de sources alluviales proches (gravières du Forez). Une granulométrie supérieure viendrait soit de carrières proches et seraient des particules anguleuses, très éloignées des matériaux naturels de la Loire, soit elle devrait être importée d'une autre vallée alluviale, ce qui augmenterait considérablement les coûts.
- Il a été identifié une surestimation probable des vitesses et contraintes pour les crues de temps de retour 20 et 50 ans, de telle sorte que le diamètre stable de 28 cm est lui-même probablement surestimé. Il est possible que des diamètres de 10-15 cm soient stables pour des crues plus rares que ce que les résultats du présent modèle indiquent. Ce point sera à confirmer au cours des études complémentaires.

Des blocs de plus grande taille (jusqu'à 30 cm) seront disposés de façon éparse dans la zone de matelas alluvial. Ils pourront servir d'abris aux sédiments plus petits (phénomène de masquage).

Le volume estimatif est de l'ordre de **5 200 m³** (couche uniforme de 20 cm avec blocs de 10-15 cm sur toute la surface). Compte-tenue de la topographie des profils, la répartition ne sera pas homogène sur l'ensemble de la largeur : l'épaisseur du remblai sera plus importante dans les zones les plus profondes, et notamment dans les « canyon » surcreusés dans la marne.

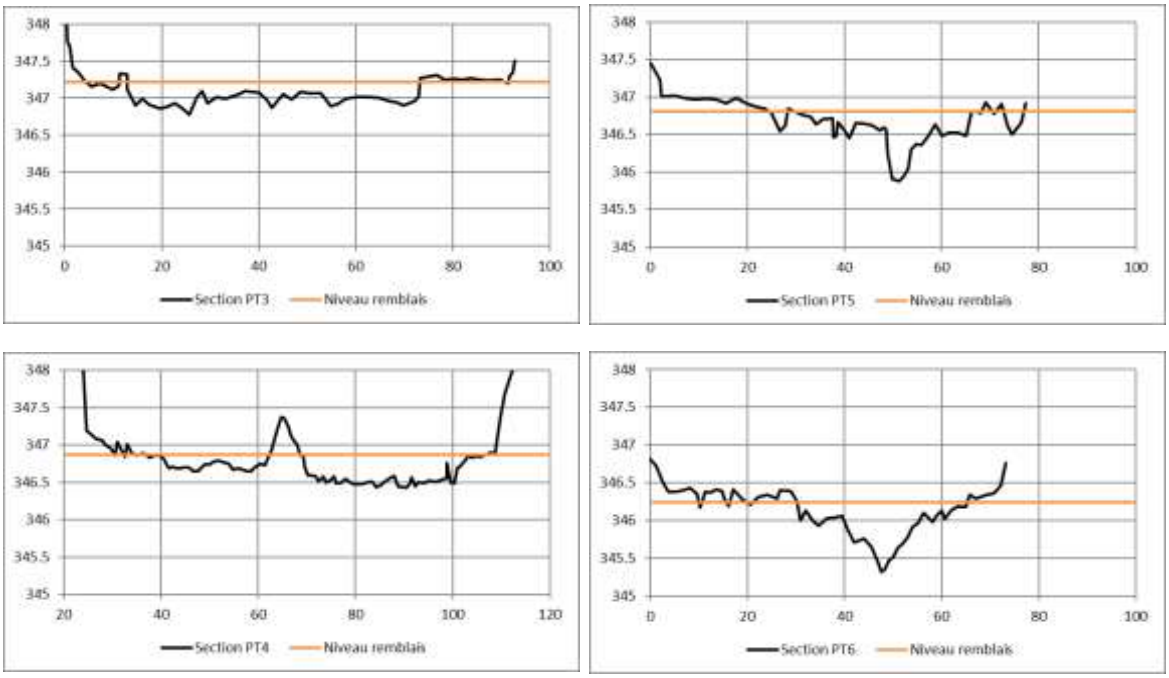


Fig. 41. Vue de la hauteur du remblai sur les profils en travers

Concernant la provenance de ces matériaux, on propose plusieurs sources :

- Utilisation des blocs provenant des opérations de désenrochement prévues dans le cadre des actions de réactivation de l'érosion latérale des terrains en bord de Loire. Pour limiter le transport, on suggère d'utiliser les blocs provenant du désenrochement du site de Montrond-les-Bains amont, volume estimé à 1909 m³ (granulométrie non connue). Ils pourront être utilisés pour l'ancrage aval (200 m³). Les blocs restants pourront être répartis sur l'ensemble du matelas, et serviront d'abris aux sédiments plus petits (phénomène de masquage).

Fig. 42. Photographie du linéaire d'enrochements qui fera l'objet d'un désenrochement, Montrond-les-Bains, photographie ARTELIA, 4 février 2020

- Matériaux de gravières, avec une granulométrie de 10-15 cm, pour un volume de 5 200 m^3.

L'utilisation des matériaux issus de la Loire est possible en complément (jusqu'à 3000 m^3) moyennant un criblage des matériaux. Cette solution n'est pas retenue car le surcout associé au criblage est très conséquent (le coût de l'opération double).

1.5.2. Résultats attendus et impacts

1.5.2.1. Résultats attendus et impacts morphologiques

Cette solution permet de protéger l'ensemble de la zone de forte pente directement à l'issue des travaux par la mise en place d'un tapis d'éléments grossiers stables.

Les blocs disposés en aval et répartis sur l'étendue du matelas ne devraient pas être mobilisés sur de longues distances même lors de crues importantes (temps de retour 50 ans et plus).

La figure suivante présente les contraintes de cisaillement modélisées dans le tronçon concerné par l'expérimentation, dans l'état actuel et dans l'état projet, pour différentes crues. Les contraintes de cisaillement sont les contraintes hydrauliques exercées par l'écoulement sur le fond du lit du cours d'eau, qui entrainent les matériaux du lit.

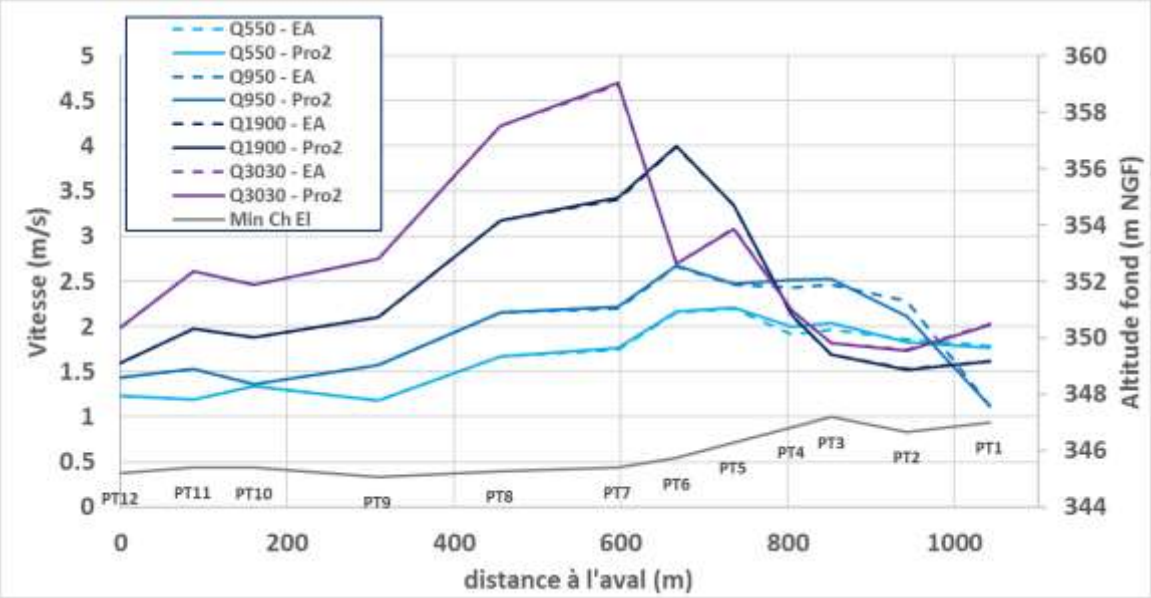


Fig. 43. Distribution des vitesses dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Pro 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 2. Modélisation en régime permanent pour des débits de 550 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

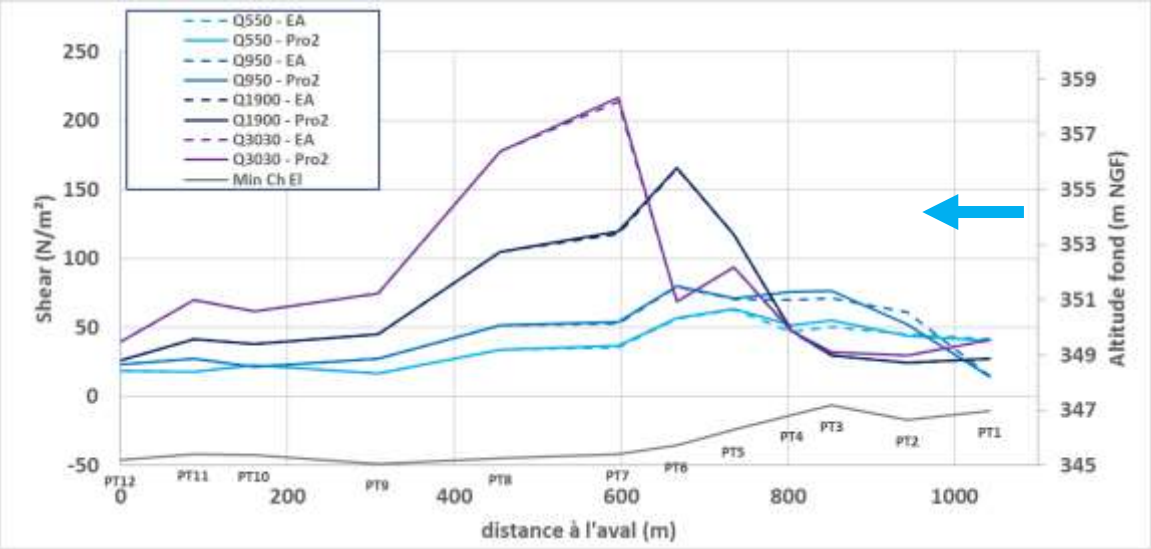


Fig. 44. Distribution des contraintes dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Pro 2 = état projet pour le Scénario de l'AVP 2. Modélisation en régime permanent pour des débits de 550 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

On voit que pour les crues de temps de retour 20 ans (1900 m³/s) et 50 ans (3030 m³/s) les contraintes de cisaillement sont beaucoup plus importantes que pour les crues de temps de retour 2 à 10 ans (550 m³/s et 950 m³/s). Le secteur où les contraintes sont les plus importantes évolue aussi en fonction du débit, se décalant vers l'aval.

Comme précisé plus haut, les sédiments de diamètre 10 cm sont stables d'après le critère de Shields pour les débits 550 et 950 m³/s, alors que pour 1900 m³/s ils peuvent être mobilisés. Il est possible que le matelas alluvial ainsi constitué se déstructure complétement lors d'une crue importante.

Ainsi, pour de fortes crues, une partie des sédiments constituant ce tapis alluvial pourraient être mobilisés.

Compte-tenu des limites du modèle pour la représentation des débits débordants (1900 m³/s et 3030 m³/s), ces résultats seraient à consolider dans le cadre d'une modélisation plus adaptée à la représentation de l'écoulement en lit majeur. Il est possible que la granulométrie proposée pour cet aménagement soit stable pour des débits plus importants.

Suite à une déstructuration du matelas alluvial, peut-être que le matelas se reconstituera au cours du temps, mais cela dépendra d'une part de l'hydrologie et des apports amont, et d'autre part de la capacité de piégeage de cette structure, qui est très difficile à appréhender, mais qui risque de demeurer faible du fait de la faible hauteur de la structure.

Cet aménagement ne présentera pas d'obstacle à la continuité sédimentaire.

1.5.2.2. Résultats attendus et impacts hydrauliques et hydrogéologiques

Le rehaussement de la ligne d'eau lié à l'aménagement est présenté sur la figure ci-après pour différents débits, d'après la modélisation numérique.

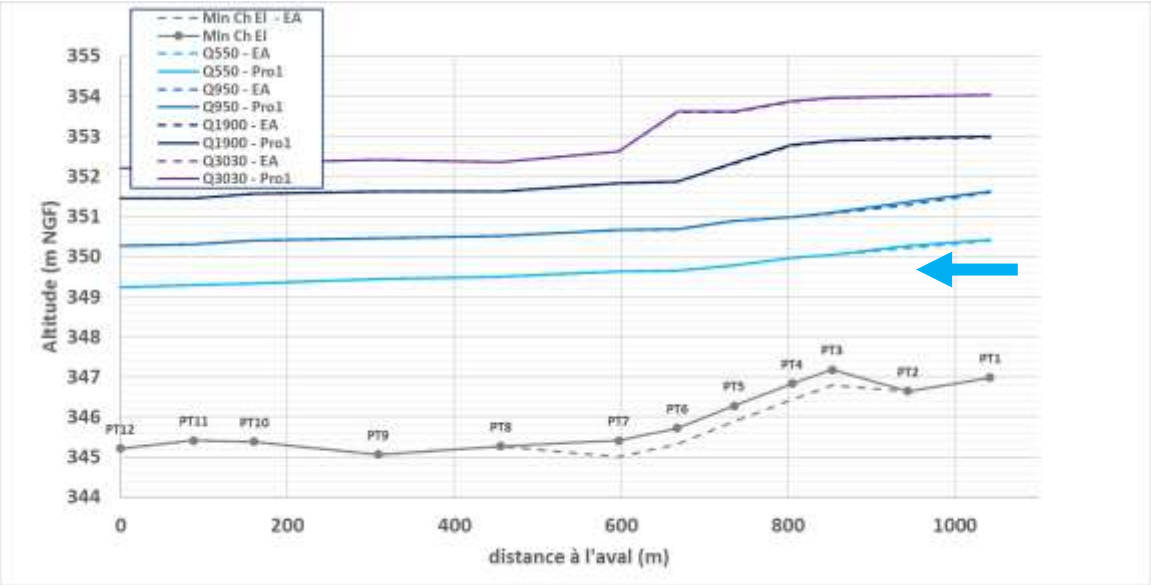


Fig. 45. Lignes d'eau actuelles et dans l'état projet dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Pro 2 = état projet pour le Scénario de l'AVP 2. Modélisation en régime permanent pour des débits de 550 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

En complément, le tableau suivant présente les différences de hauteur d'eau entre l'état projet et l'état actuel pour ces quatre débits.

Tabl. 2 - Différence de hauteur d'eau entre l'état actuel et l'état projet (AVP2), en m (les nombres positifs indiquent une rehausse de la ligne d'eau à l'état projet par rapport à l'état actuel)

	Q550	Q950	Q1900	Q3030
PT1	0.03	0.02	0.01	0.01
PT2	0.04	0.07	0.01	0.01
PT3	0.01	0.01	0.01	0.01
PT4	0.00	0.00	0.01	0.01
PT5	0.00	0.00	0.01	0.01
PT6	0.00	0.00	0.00	0.02
PT7	0.00	0.00	0.00	-0.01
PT8	0.00	0.00	0.00	0.00
PT9	0.00	0.00	0.00	0.00
PT10	0.00	0.00	0.00	0.00
PT11	0.00	0.00	0.00	0.00
PT12	0.00	0.00	0.00	0.00

On voit sur ce graphique que l'impact hydraulique de l'aménagement est très faible. La rehausse maximale est de 7 cm en amont de l'aménagement (PT2, 950 m^3/s). Pour tous les autres profils et pour toutes les conditions de débits, la rehausse est inférieure à 3 cm. La ligne d'eau reste inchangée à l'aval du profil P7 pour toutes les conditions de débit.

De même, l'impact hydrogéologique sera très faible.

1.5.2.3. Résultats attendus et impacts environnementaux

1.5.2.3.1. Impact du projet

Concrètement l'opération de reconstitution d'un matelas alluvial en permettant l'accumulation de sédiments, va permettre le développement d'une zone hyporhéique qui correspond à l'ensemble des sédiments saturés en eau, situés au-dessous et à côtés d'un cours d'eau, contenant une certaine quantité d'eau de surface. Dans cette solution, cette l'épaisseur de cette zone reste modeste.

D'un point de vu de la diversité biologique, la présence de sédiments sert de frayères à certaines espèces de poissons, comme la truite (présente sur le secteur d'étude) et les poissons juvéniles se développent dans les interstices. La conception des seuils intègre la franchissabilité piscicole. Ainsi les aménagements ne constitueront pas un obstacle à la continuité écologique. La mise en place de seuils est favorable au maintien d'un niveau d'eau plus haut et donc d'une mise en eau plus efficace d'éventuelles annexes hydrauliques situées à proximité et pouvant servir de frayères. La zone hyporhéique est également colonisée par de nombreux micro-organismes.

La zone hyporhéique permet de réguler la température de l'eau en isolant une partie des écoulements. Ainsi les écoulements circulants à travers les granulats du lit ont une température moins élevée. Ce phénomène de régulation à une importance pour la vie aquatique notamment en été, en période de basses eaux.

Le développement d'une zone hyporhéique a également une incidence positive sur l'autoépuration de l'eau en constituant une zone de stockage des nutriments et associé à une activité métabolique

grâce aux micro-organismes. La zone hyporhéique agit comme un filtre physique et biologique L'autoépuration est optimale avec une granulométrie intermédiaire (qui favorise un équilibre entre le temps de transite suffisamment long et un brassage des eaux évitant l'accumulation de certains composés ou avec une micro-hétérogénéité suffisante pour garantir la présence de zones oxygénées et de zones anoxiques.

La création d'un seuil peut cependant engendrer un risque de dépôt de fines et de colmatage du fond défavorable à la vie aquatique.

L'impact sur les habitats naturels des berges est faible en raison d'une emprise très limitée à nulle. L'impact sur les berges est essentiellement lié à la phase travaux pour l'accès au lit mineur.

L'incidence de la reconstitution d'un matelas alluvial est donc largement positive sur le plan environnemental. Les effets seront effectifs sur les emprises spatiales sur lesquelles le matelas va se mettre en place. La présence de blocs de grosse taille uniquement, ainsi que l'épaisseur moindre du matelas ainsi constitué sont moins favorables par rapport à l'avant-projet précédent pour lequel la granulométrie est diversifiée. Avec l'apport progressif d'éléments fin la situation sera néanmoins de plus en plus favorable sur le plan environnemental

1.5.2.3.2. Impact des travaux

Les principaux impacts potentiels en phase travaux sont :

- l'utilisation et/ou la création d'accès (dérangement des populations d'espèces faunistiques, destruction éventuelle d'individus, dégradation temporaire des habitats de la berge) ;
- le dérangement et la destruction éventuelle de la faune piscicole ;
- la dégradation temporaire du lit en eau et des habitats aquatiques lors des différents aménagements (création des batardeaux, dépôts de matériaux, circulation des engins…). La phase de travaux dans le lit en eau peut être à l'origine d'un relargage de matières en suspension. Dans les zones où la marne est affleurante l'impact sera plus limité en raison de l'absence de sédiments.

1.5.3. Modalités de réalisation des travaux

1.5.3.1. Déroulement des travaux

Les travaux seront réalisés à sec et à l'étiage pour limiter les impacts sur l'environnement et éviter les risques de crue pour le chantier.

(1) Deux pistes d'accès sur chaque rive sont premièrement réalisées. A noter que la piste en rive gauche chemine dans une zone présentant des renouées du Japon. Un traitement de cette espèce invasive est donc nécessaire. Une incertitude demeure sur les coûts associés à ce traitement, très dépendant de la nature des matériaux et de la faisabilité du criblage (les coûts associés à l'évacuation en décharge sont supérieurs de l'ordre de 75€/T).

(2) Un batardeau constitué de matériaux alluviaux (90% des matériaux criblés les plus fins) et blocs permettant d'isoler la rive droite est ensuite créé pour permettre la construction de la partie en rive droite du tapis de bloc et de son ancrage en aval. Ce batardeau fait environs 2.5 m de haut sur la partie amont, 3 m en crête et 15 m en pied sur 470 m linéaires, ce qui représente un volume de

l'ordre de 10 500 m³ de matériaux. Il permet le passage d'un débit de l'ordre de 100m³/s. Cette capacité est suffisante pour supporter les éclusés quotidiens réalisés par EDF (80 m3/S au maximum).

(3) Une fois ces étapes terminées, la partie aval et amont du batardeau centrale est basculée en rive gauche pour mettre à sec la river gauche de la Loire. L'écoulement est alors en rive droite et la construction du tapis de bloc et de son ancrage en aval peut avoir lieu à sec.

(4) Une fois cette étape achevée, le volume de matériaux constituant le batardeau est évacué.

(5) Pour finir, les pistes d'accès sont enlevées et les emprises concernées remises en état.

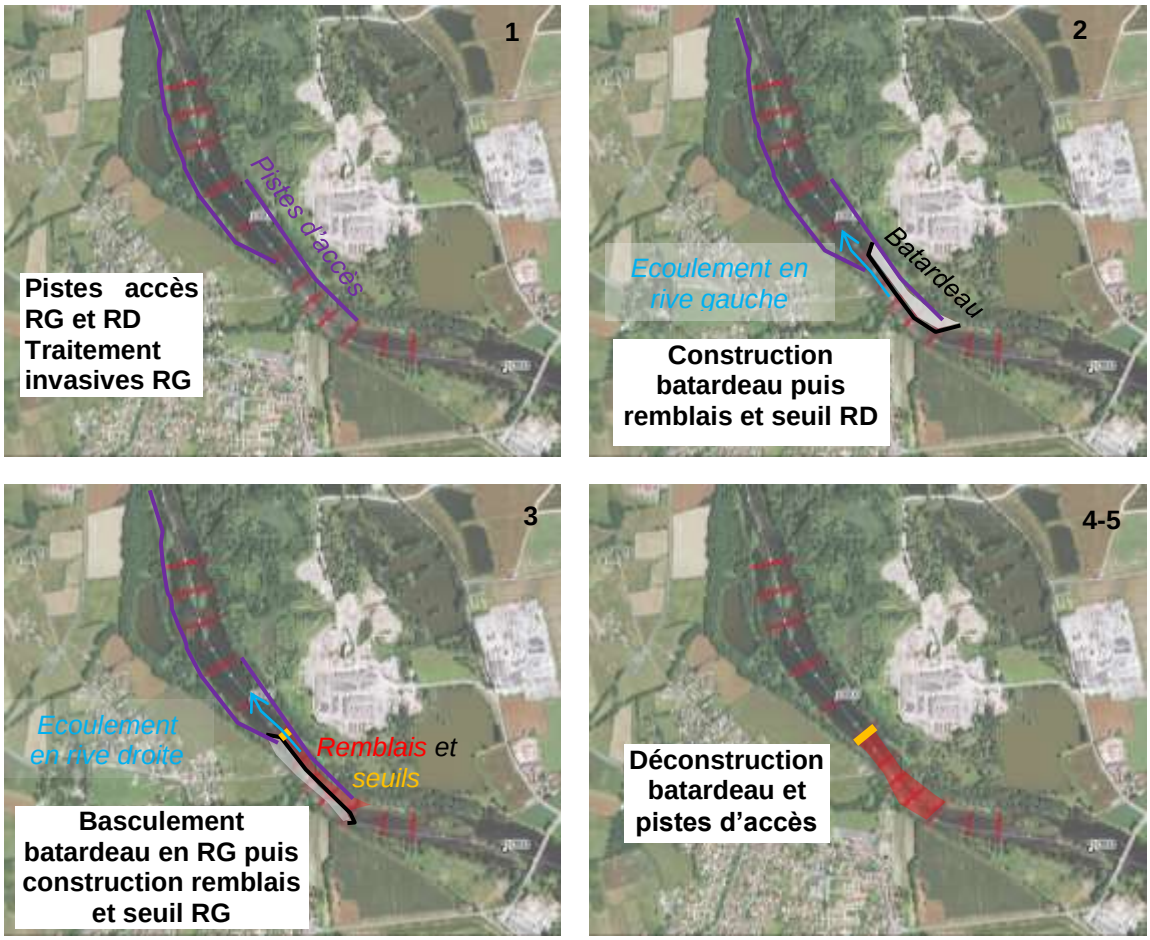


Fig. 46. Déroulement des travaux

1.5.3.2. Accès et piste de chantier

Deux pistes et rampe d'accès sont réalisées, une depuis l'aval en rive gauche, la seconde depuis l'amont en rive droite. A noter la présence d'invasives en rive gauche au droit de la piste. Le traitement de ces invasives est considéré ici par un criblage sur 50cm de profondeur après la fauche. Si les matériaux sont trop fins et humides, cette technique pourra présenter des difficultés techniques, de telle sorte qu'une mise en décharge serait nécessaire pour des coûts bien supérieurs. A l'inverse, un fauchage régulier pourrait s'avérer suffisant pour éviter tout risque de dissémination sans traiter la zone de façon définitive.

En rive gauche, l'accès nécessite un passage sur les parcelles cadastrales de Craintilleux A 218, 219, 220, 221,222, parcelles privées.

En rive gauche, l'accès nécessite un passage sur les parcelles cadastrales de Rivas A 446 et A 24, dont le caractère privé ou public n'est pas connu à ce stade.

Lors de la mise en place des batardeaux et du tapis de blocs, la portance de la marne peut amener à des difficultés de chantier, en fonction de sa portance. Il sera préférable de procéder à une reconnaissance géotechnique complémentaire afin de s'en assurer.

1.5.3.3. Prise en compte des enjeux environnementaux

Aux vues des enjeux écologiques identifiés, les préconisations suivantes permettront de réduire les impacts environnementaux de la phase travaux :

- Période d'intervention adaptée à la faune piscicole (août à octobre). Cette période limitera également en partie les impacts sur la faune et la flore des berges lors de la création des accès.
- Gestion des plantes exotiques envahissantes. Une attention particulière sera portée à l'Elodée du Canada (plante aquatique) présente sur le site, ainsi qu'à la Renouée du Japon au niveau des berges. D'autres espèces invasives sont potentiellement présentes et nécessiteront de faire l'objet d'une gestion adaptée.
- Mesures de réduction intégrées aux phases de chantier (suivi environnemental du chantier, balisage préalable de l'emprise de la zone de travaux…)

La réalisation du batardeau se fera d'amont vers l'aval. Lors de la mise en place du batardeau, des MES (matières en suspension) seront relarguées. Cette situation est difficilement évitable. Une pêche de sauvegarde sera mise en œuvre afin de minimiser l'impact sur la faune aquatique. Une fois le batardeau achevé, un écoulement dans l'enceinte du batardeau est toujours possible (percolation à travers les matériaux imperméables). Avant rejet au lit mineur en dehors de l'enceinte du batardeau, les eaux seront décantés au travers de barrages de matériaux de type gravette. Suivant les demandes spécifiques des services de l'état un suivi peut être réalisé pendant les travaux de mise en place des batardeaux. Si la situation hydraulique au moment semble trop critique vis-à-vis de la préservation des espèces, les travaux peuvent être stoppés momentanément.

1.5.3.4. Calendrier et phasage

Etant donné les enjeux environnementaux (période pour la faune propice de septembre à novembre) et les contraintes liées à l'hydrologie (crues en courantes novembre), la période de travaux la plus propice est la période aout-septembre.

On présente ci-après un calendrier prévisionnel de la réalisation des travaux.

Phase	Aout				Septembre			
Création accès - apport matériel - installation travaux								
Construction batardeau depuis RD								
Construction encrage aval - RD								
Tapis de blocs - RD								
Bascule batardeau pour RG								
Construction encrage aval - RG								
Tapis de blocs - RG								
Déconstruction batardeau et fin de chantier								

1.5.4. Estimation des coûts

Le chiffrage est effectué sur la base de l'expérience du bureau d'étude en maîtrise d'œuvre de travaux similaires.

Désignation de la nature des travaux	unité	Quantité	Prix unitaire HT (€)	Montant HT (€)
Etudes préliminaires				***55 000 €***
Mesures topographiques complémentaires (modélisation + projet)	F	1	15 000 €	15 000 €
Modélisation hydraulique 1D/2D	F	1	20 000 €	20 000 €
Investigations géotechniques	F	1	8 000 €	8 000 €
Etude projet	F	1	12 000 €	12 000 €
Maîtrise d'œuvre	F	1	31 864.20 €	***31 864 €***
Installation chantier/frais généraux/divers	F	1	34 635 €	***34 635 €***
Batardeaux chantier (RG et RD)	F	1	88 300 €	***88 300 €***
Pêche électrique	F	1	2 500 €	2 500 €
Remblais apport et mise en batardeau, pour phasage 1	m^3	10500	5 €	52 500 €
Reprise et mise en remblai des déblais (batardeau) pour phasage 2	m^3	1800	1 €	1 800 €
Evacuation du reliquat	m^3	10500	3 €	31 500 €
Travaux préparatoires				***63 000 €***
Débroussaillage	m^2	2500	2 €	5 000 €
Déboisement	u	10	100 €	1 000 €
Traitement invasives piste accès RG	m^2	3800	15 €	57 000 €
Remblais				***26 000 €***
Remblais en grande masse - gravière ou carrière	m^3	5 200	5.0 €	26 000 €
Enrochements				***44 000 €***
Amenée et pose des enrochements sur les seuils	m^3	550	80.0 €	44 000 €
Reprise berges	ml			***600 €***
reprofilage berges 1/1	ml	100	6 €	600 €
Voirie				***9 000 €***
Piste circulation engins : fourniture et mise en œuvre des matériaux	ml	500	18 €	9 000 €

Sous-total HT	**352 399 €**
Imprévus (20%)	70 479.8 €
Total HT	**422 879.0 €**

Note : le prix des matériaux issus des gravières ou carrière est fortement dépendant des fluctuations du marché local.

1.5.5. Etudes complémentaires

Les études suivantes (AVP / Projet) devront inclure les points suivants :

- Afin d'affiner le chiffrage des travaux un levé topographique sera nécessaire à la réalisation des étapes suivantes. La butée fera l'objet d'un relevé au 1/100 sur son emprise, afin de réaliser des profils en travers précis. La zone de remplissage entre butée fera l'objet d'un relevé au 1/500. En complément, pour la réalisation du modèle hydraulique (cf. ci-après), la réalisation de profils bathymétriques additionnels sera nécessaire (10 profils),
- Une étude de modélisation de l'inondation du lit majeur : modélisation 1D en lit mineur, et 2D en lit majeur. L'emprise doit s'étendre environ 3 km en amont et autant en aval du site de l'intervention, pour bien représenter les débordements et les mouvements dans le lit majeur. Faire un essai pour vérifier la portance de la marne vis-à-vis de la circulation des engins de chantier :
    - Soit par la réalisation de sondages à la pelle depuis la berge pour, de visu, attester de la compacité ou non de la marne
    - Soit réaliser des sondages carottés en haut de berge et prélever à la hauteur correspondant à la marne un échantillon intact pour essai labo de compacité.
- Etude AVP détaillé / projet (ces deux études peuvent être combinées)

1.5.6. Approche réglementaire

Les démarches administratives à réalisation du projet sont présentées ci-après. La réalisation du projet nécessitera un dossier d'autorisation au titre de la loi sur l'eau. Un dossier de Demande d'Autorisation Environnementale devra donc être établi.

La nécessité d'une étude d'impact (évaluation environnementale) n'est pas à écarter étant donné la nature des travaux, mais reste à l'appréciation de l'administration. Dans ce sens un travail de concertation et d'échange en amont paraît indispensable afin de bien cadrer le contexte réglementaire du projet, notamment vis-à-vis de la nécessité de réaliser un dossier de dérogation espèces protégées. Une étude naturaliste complémentaire sera nécessaire pour la réalisation des dossiers règlementaires à adapter au site et selon le cadrage avec la DREAL.

Nomenclature IOTA	Demande d'Autorisation au titre de Rubrique 3.1.2.0 : Modification du profil en long et en travers sur une longueur supérieur à 100 m. Rubrique 3.1.1.0 Installations, ouvrages, remblais et épis, dans le lit mineur d'un cours d'eau Possible concernant la rubrique 3.1.5.0 : Destruction de frayères, sur une surface de plus de 200m²
Evaluation environnementale	Examen au cas par cas au titre de Catégorie 10. Canalisation et régularisation des cours d'eau
Evaluation des incidences Natura 2000	Oui Site Natura 2000 directive habitats (ZSC) : Milieux alluviaux et aquatiques de la Loire - FR8201765 Site Natura 2000 directive oiseaux (ZPS) : Plaine du Forez FR8212024
Dérogation espèces protégées	Possible Nécessite un cadrage avec la DREAL
Demande de défrichement	Non

1.6. AVP 3 – SIMPLE BUTEE

1.6.1. Présentation de l'aménagement

1.6.1.1. Principe

Une butée en enrochements libres est disposée à l'aval du seuil de marnes. Cette butée est ancrée dans les marnes. Elle reprend le principe général décrit au *1.2 Choix des scenarios d'aménagement.*

Ses caractéristiques sont les suivantes :

- hauteur par rapport au fond moyen de 50 cm,
- crête de 90m de large berge à berge,
- pente du parement aval de 4%, avec une forte rugosité pour créer des abris et ainsi assurer la franchissabilité piscicole.

L'amont de la butée est rempli de matériaux (entre P8 et P3). On dispose ainsi de matériaux de toute taille pour le remplissage, et de matériaux plus grossiers en surface pour constituer le pavage et ainsi assurer la stabilité de l'aménagement. La pente de cette zone de remplissage est de l'ordre 1.4‰ et permet de relier la crête de la butée au fond moyen du profil n°3, comme indiqué sur la figure en dessous :

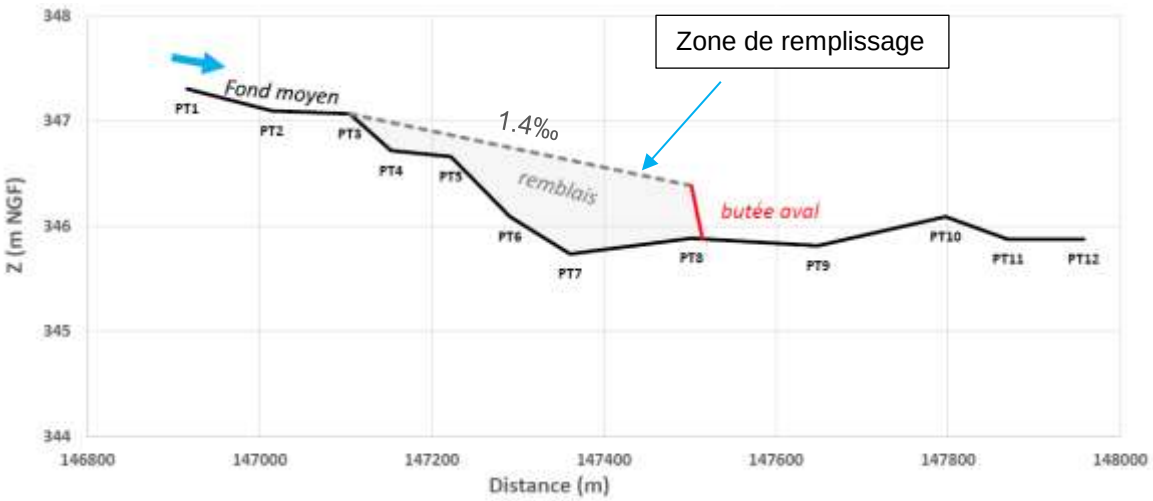


Fig. 47. Schéma sur le profil en long (simple butée)

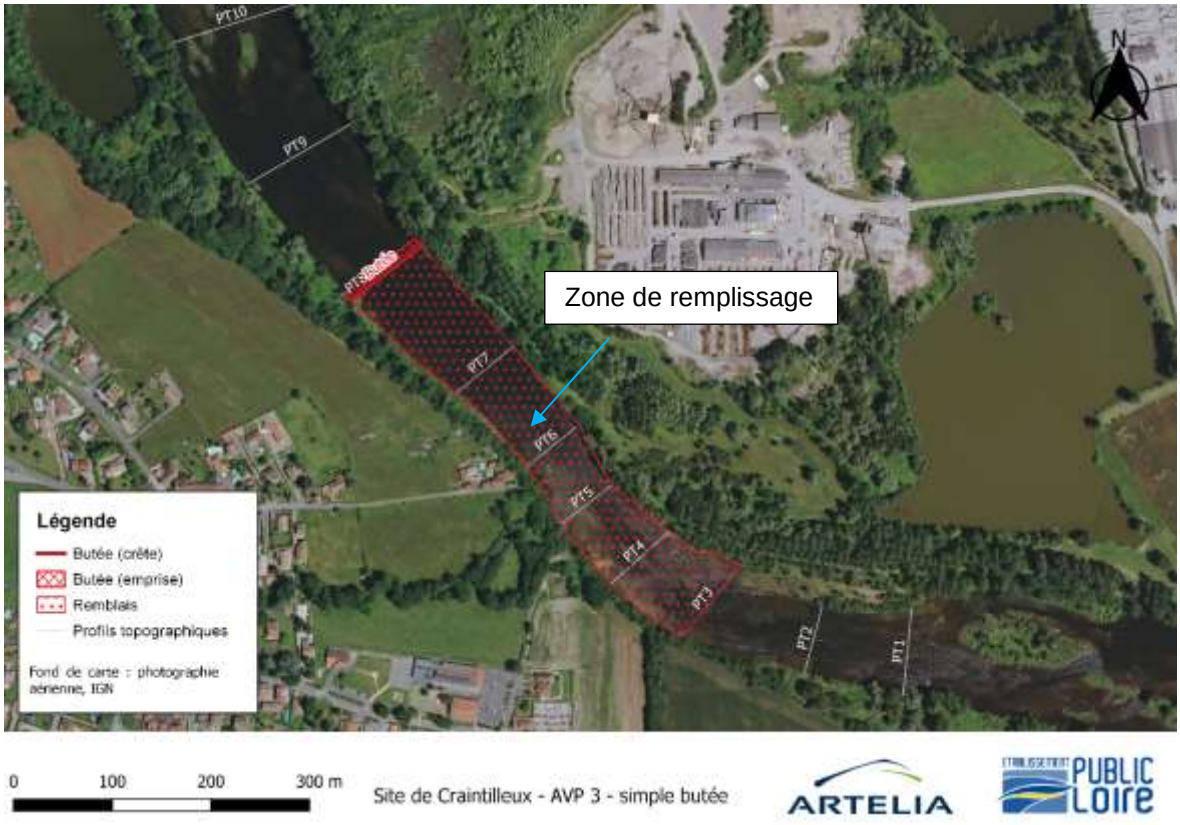


Fig. 48. Vue en plan de l'aménagement (simple butée)

1.6.1.2. Butée

La crête de la butée est positionnée au droit du profil n° 8, 50cm au-dessus de la cote moyenne :

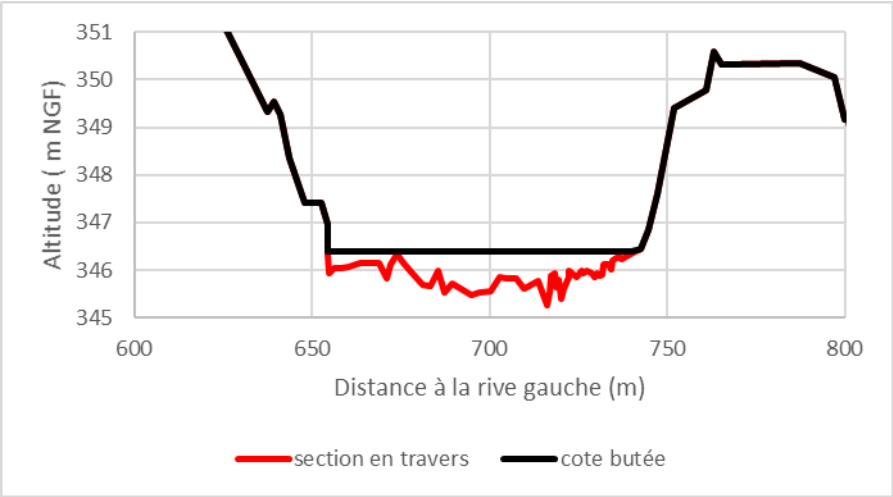


Fig. 49. Coupe en travers de la butée

A l'aide des niveaux et vitesses issues du modèle hydraulique 1D, les blocs constituant la butée sont dimensionnés.

Des vitesses maximales dans le lit mineur pour les butées comprises entre 3.4 m/s et 4.52 m/s sont obtenues par la modélisation hydraulique pour respectivement Q_{Loire}=1900 m³/s et Q_{Loire}=3030 m³/s (temps de retour de 20 et 50 ans).

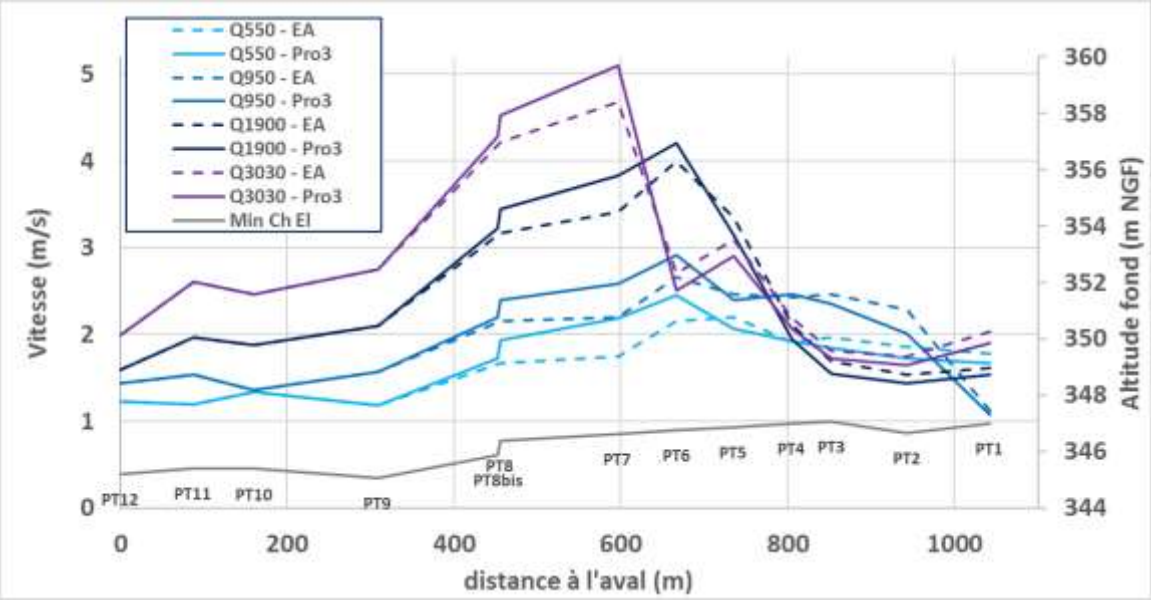


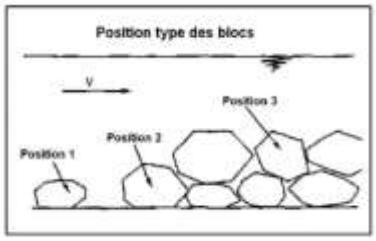
Fig. 50. Distribution des vitesses dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Pro 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 3. Modélisation en régime permanent pour des débits de 550 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

L'approche du dimensionnement des blocs constituants la butée est étudiée suivant la formule d'Isbach :

$$D_{50} = \frac{V^2}{m^2.2g.\Delta d}$$

Avec :

- D_{50} : blocs moyen (en m)
- V= vitesse dans la section contractée
- m= coefficient fonction de la place du bloc dans la protection. Pour notre cas m=1.2 (position 2)



- g= accélération gravitationnelle (9.81m/s^{-2})
- Δd= densité déjaugée de l'enrochement (1.6 à 1.85)

En utilisant le critère d'Isbach pour des blocs en extrémité de carapace (position 2) on obtient des diamètres de blocs stables de respectivement 26 et 45 cm pour la butée pour Q_{Loire}=1900 m^3/s et Q_{Loire}=3030 m^3/s.

En conclusion :

La classe d'enrochement **LM40/200** (blocs compris entre 31 et 53 cm) est retenue pour constituer la butée, une blocométrie qui devrait permettre d'assurer la pérennité de la structure dans le temps. A noter que pour limiter la hauteur et l'impact sur le franchissement piscicole, la taille des blocs est limitée et la stabilité de la structure n'est pas assurée pour des crues avec Q_{Loire} supérieure à 3030m^3/s.

Afin d'assurer la stabilité des blocs du parement aval, un ancrage sur l'aval par un décaissement « à minima » dans la marne est proposé pour prévenir le départ des blocs et permettre la mise en œuvre d'un sabot en aval. A noter que sans cet ancrage, les blocs, simplement posés sur le fond du lit, risquent de rouler vers l'aval déstructurant ainsi l'ensemble de la butée. L'épaisseur d'ancrage étant limitée, les blocs pourront être « enfoncés » à l'aide des pelles mécaniques pour augmenter leur imbrication.

La butée présente une largeur de berge à berge de 90 m et une longueur de 22 m (sabot inclus). Le volume de la buté est ainsi de 630 m^3 d'enrochements au total.

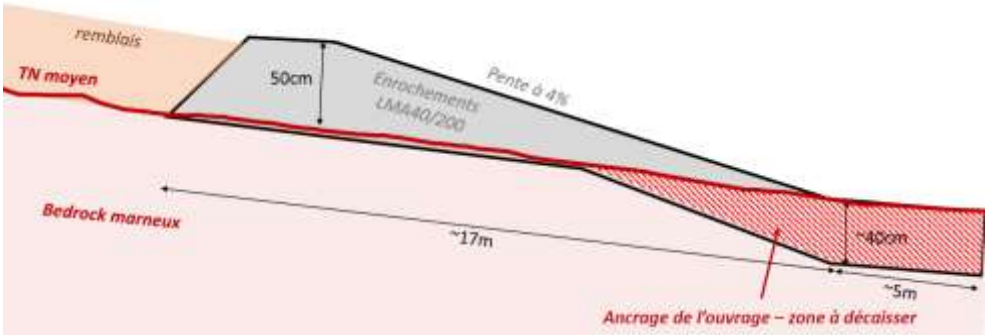


Fig. 51. Butée et matelas alluvial, schéma de principe

Concernant la provenance de ces blocs, la source suivante est envisagée :

- Utilisation de blocs provenant des opérations de désenrochement prévues dans le cadre des actions de réactivation de l'érosion latérale des terrains en bord de Loire. Pour limiter le transport, on suggère d'utiliser les blocs provenant du désenrochement du site de Montrond-

les-Bains amont avec un volume estimé à 1909 m³. La taille de ces blocs n'est pas connue à l'heure actuelle ; elle sera sans doute en grande partie supérieure à la classe 10/60 et devrait permettre de constituer une partie importante de la butée.

Fig. 52. Photographie du linéaire d'enrochements qui fera l'objet d'un désenrochement, Montrond-les-Bains, photographie ARTELIA, 4 février 2020

1.6.1.3. Matelas alluvial - zone de remplissage

Concernant le remblai en amont de la butée, le critère de Shields est considéré (valeur critique à 0.047). Ce critère permet de définir la contrainte limite de mise en mouvement des sédiments (initiation du charriage) pour des sédiments, en fonction du diamètre des matériaux et des conditions hydrauliques de l'écoulement :

$$D = \frac{\tau}{\tau_c{}^*} \times \frac{1}{(\rho_s - \rho)g}$$

Avec :

- D : diamètre des sédiments (en m)
- τ = contrainte hydraulique (N/m²)
- ρ_s masse volumique solide (kg/m³)
- ρ masse volumique liquide (kg/m³)
- $\tau_c{}^*$ nombre de Shields critique (0.047 dans notre cas).
- g accélération de la pesanteur (m/s²)

Une contrainte de 265 N/m² est obtenue au droit du profil n°7 pour la crue maximum (Q50) indiquant des diamètres stables de l'ordre de 35 cm. Pour des débits plus faibles (950 et 1900 m³/s) des diamètres de l'ordre de 13 cm, 25 cm sont stables. Pour rappel, pour les débits importants (1900 m3/s et 3030 m3/s) les contraintes max et donc les diamètres stables sont sans doute surestimés par le modèle hydraulique.

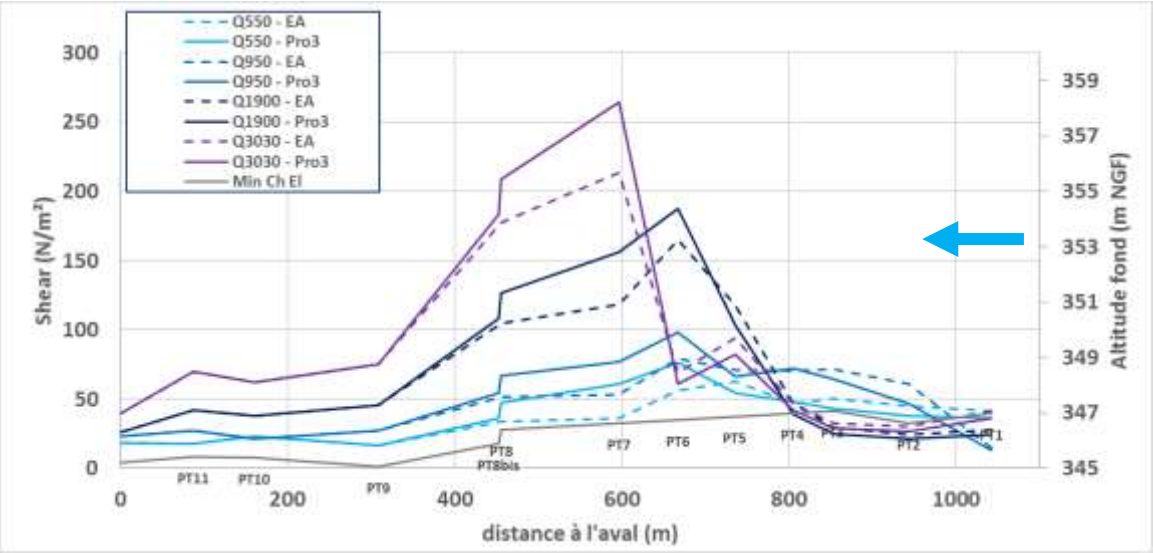


Fig. 53. Distribution des contraintes dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Pro 3 = état projet pour le Scénario de l'AVP 3. Modélisation en régime permanent pour des débits de 550 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

Les matériaux les plus grossiers constituant les remblais doivent être placés en surface et préférentiellement entre les profils 6 et 8 où les contraintes sont les plus élevées.

Sur l'ensemble du matelas alluvial, des matériaux plus grossiers seront disposés en surface.

Le volume estimatif, basé sur les données topographiques disponibles (calcul de la surface de remblais sur chaque section appliqué sur la distance entre les sections), est de l'ordre de **16 000 m³**.

Les sources de matériaux suivantes sont considérées :

- Arasement des bancs du site 7 (Rivas, amont du pont) proposés dans l'« Etude de définition d'actions de restauration sur le Domaine Public Fluvial de la Loire (42) » d'IRH pour la DDT 42. Cette opération apporte un déblai de 14 000 m³, dont seuls 7000 m³ seraient nécessaires pour cette intervention. Ces matériaux ont un d50 de 4,5 à 6,1 cm, et un d90 de 7,5 à 10,5 cm (courbes granulométriques présentées plus bas). Ces bancs étant actuellement végétalisés, il est probable qu'une fraction non négligeable du volume considéré soit constituée de matière organique et de matériaux plus fins, qui pourraient causer un relargage temporaire important de matières en suspension (MES).
- Complément de matériaux de gravières alluvionnaires, avec une granulométrie de type galets (4.5 – 15 cm), pour 9 000 m³. Ces matériaux seront disposés préférentiellement en surface, en particulier entre les profils 6 et 8 où les contraintes en crue sont les plus importantes.

Ces matériaux, dont les particules grossières mesureront 10 à 15 cm, ne permettent pas une stabilité à tous les débits modélisés. Le choix est fait cependant de ne pas importer de sédiments plus grossiers, afin d'amener des matériaux de type alluvionnaires, naturels pour la Loire, plutôt que des matériaux plus grossiers issus de carrières de pierres.

La figure ci-après présente les courbes granulométriques des bancs de Rivas.

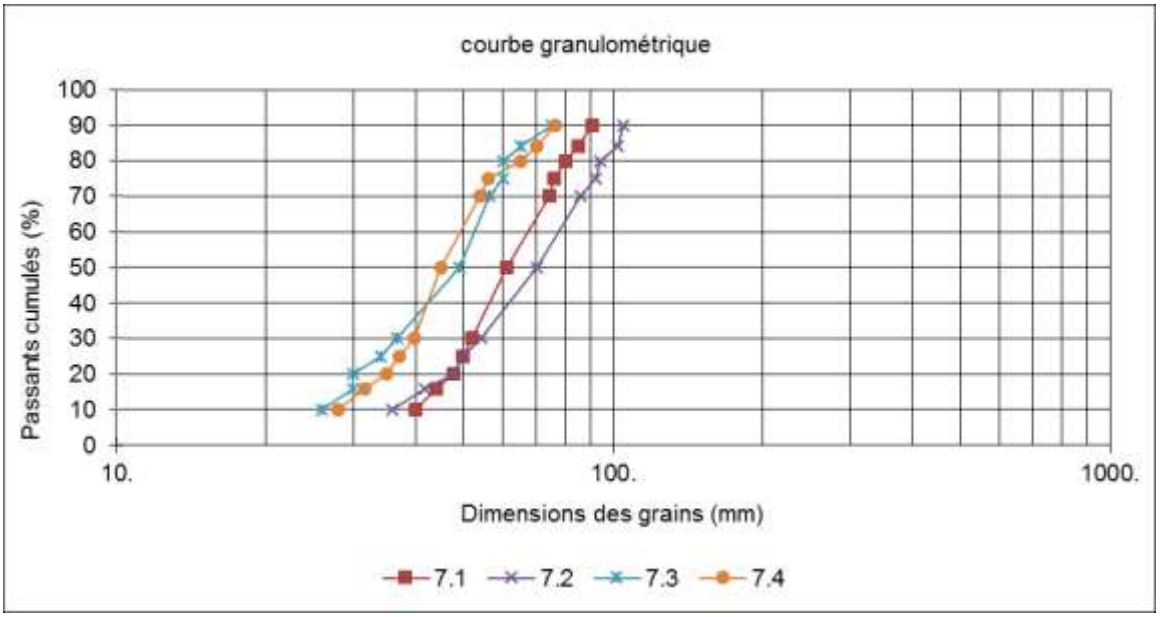


Fig. 54. Courbe granulométriques correspondant aux bancs dont l'arasement est prévu dans le secteur de Rivas/Craintilleux (haut) et carte de localisation des échantillons présentés (bas)

1.6.2. Résultats attendus et impacts

1.6.2.1. Résultats attendus et impacts morphologiques

Cet aménagement protégera les marnes entre le profil 3 et le profil 8 (zone de plus forte pente) directement après les travaux. La pérennité du matelas alluvial dépendra de l'hydrologie. La charge solide pourra potentiellement passer à travers la butée pour les granulométries fines ou lors de crues importantes.

Après les travaux, la butée ne présentera pas de barrière au transport sédimentaire, dans la mesure où un matelas alluvial sera constitué au moment des travaux. Ainsi, cette butée ne piègera pas ou peu les matériaux venant de l'amont.

On s'attend néanmoins à un ajustement topographique et granulométrique du matelas alluvial.

La figure suivante présente les contraintes de cisaillement modélisées dans le tronçon concerné par l'expérimentation, dans l'état actuel et dans l'état projet, pour différentes crues. Les contraintes de cisaillement sont les contraintes hydrauliques exercées par l'écoulement sur le fond du lit du cours d'eau, qui entrainent les matériaux du lit.

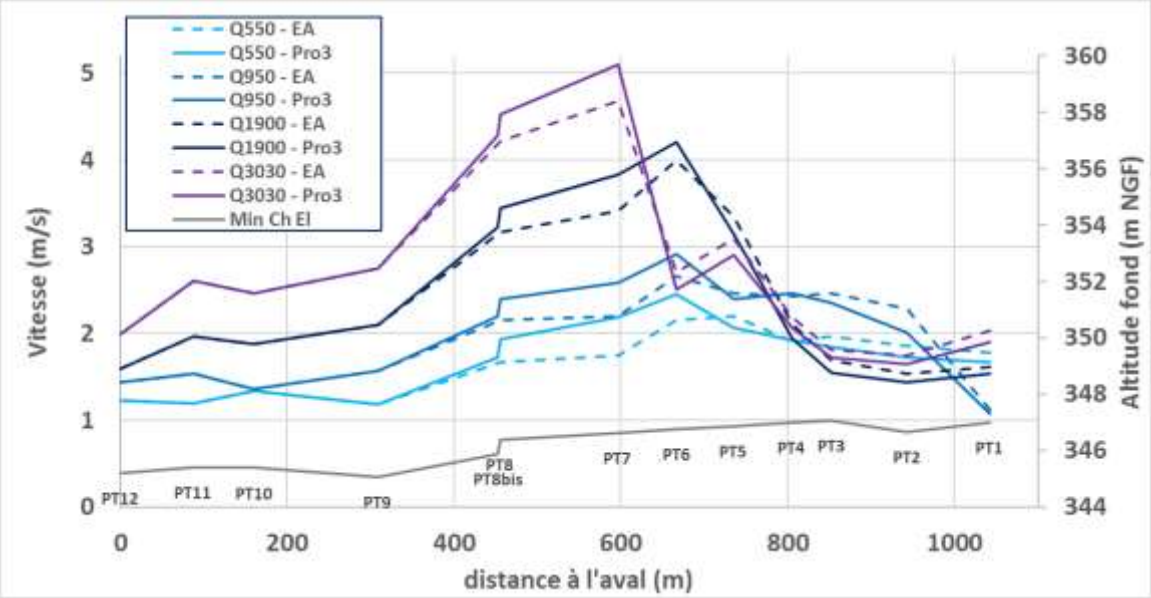


Fig. 55. Distribution des vitesses dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Pro 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 3. Modélisation en régime permanent pour des débits de 550 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

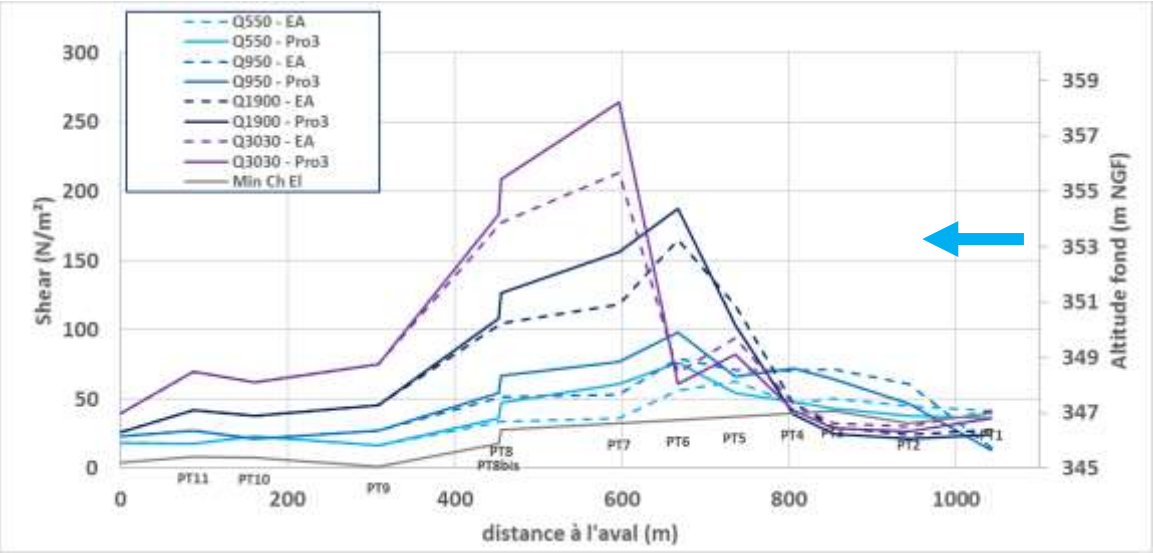


Fig. 56. Distribution des contraintes dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Pro 3 = état projet pour le Scénario de l'AVP 3. Modélisation en régime permanent pour des débits de 550 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

Sur ce graphique, l'amont est à droite. On voit que les contraintes maximales prennent place entre les profils 6 et 8 déjà à l'état actuel (EA – lignes en pointillé), et que cet effet est exacerbé par l'expérimentation. Pour un débit de 550 m³/s (temps de retour 2 ans) et de 950 m³/s (crue de 2016, temps de retour 5 à 10 ans), les contraintes sont de l'ordre de 70 à 100 N/m². Pour des débits plus importants, ces contraintes sont elles-mêmes beaucoup plus importantes, et dépassent 250 N/m² au niveau de P7 pour un débit de 3030 m³/s (Crue de 2008, temps de retour 50 ans). Pour ces débits important, le débit est moins fiable et surestime probablement les vitesses.

Comme précisé plus haut, le diamètre permettant au matelas alluvial d'être stable dans toutes ces situations est un diamètre de 35 cm. Le choix a été fait dans ce scénario de ne pas importer de matériaux de cette taille, qui ne correspond pas à la granulométrie naturelle de la Loire. Les sédiments les plus grossiers qui seront disposés dans le chenal seront de l'ordre de 10 à 15 cm, diamètre stable pour une crue de retour 5 à 10 ans.

En cas de crue de temps de retour 2 à 10 ans, on s'attend à un réajustement morphologique de ce matelas, avec un surcreusement dans les zones où les contraintes sont les plus fortes, et un tri granulométrique : les particules les plus fines présentes en surface seront emportées, et les plus grossières resteront et formeront une armure. Il est possible qu'une petite portion des sédiments du matelas alluvial soit exportée vers l'aval.

En cas de crue plus importante, il est possible que le matelas soit plus fondamentalement déstructuré, avec un export d'une partie importante des matériaux vers l'aval.

L'état des connaissances sur la mobilité sédimentaire et l'outil de modélisation 1D utilisé pour le dimensionnement de cet AVP sont intrinsèquement associés à des incertitudes importantes. Le maintien du matelas alluvial dans le temps sur l'ensemble du linéaire, en particulier lors de crues extrêmes, reste incertain. Les sédiments les plus grossiers disposés en surface (couche sédimentaire appelée « armure ») auront une action de protection des matériaux plus fins. En cas de déstabilisation de cette couche de surface, par exemple au cours d'une forte crue, il est possible

que l'ensemble du matelas soit rapidement déstabilisé. Ce matelas se reconstituera sans doute dans le temps. La dynamique de remplissage du matelas est mal connue à l'heure actuelle.

1.6.2.2. Résultats attendus et impact hydrauliques et hydrogéologiques

Le rehaussement de la ligne d'eau lié à l'aménagement est présenté sur la figure ci-après pour différents débits, d'après la modélisation numérique.

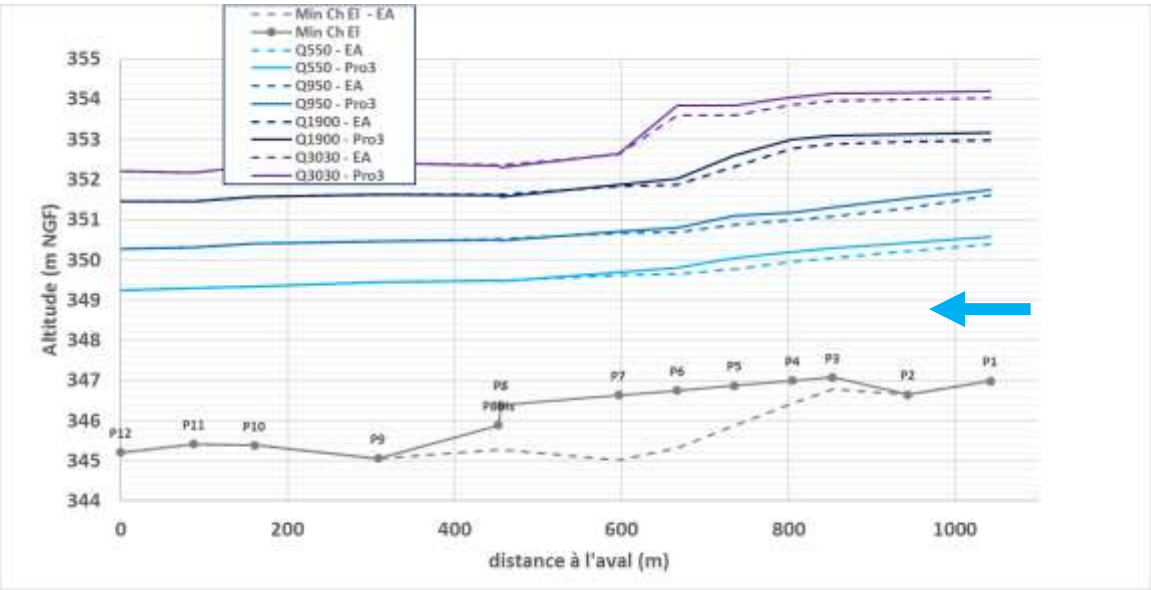


Fig. 57. Lignes d'eau actuelles et dans l'état projet dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Pro 3 = état projet pour le Scénario de l'AVP 3. Modélisation en régime permanent pour des débits de 550 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

En complément, le tableau suivant présente les différences de hauteur d'eau entre l'état projet et l'état actuel pour ces quatre débits.

Tabl. 3 - Différence de hauteur d'eau entre l'état actuel et l'état projet (AVP1), en m (les nombres positifs indiquent une rehausse de la ligne d'eau à l'état projet par rapport à l'état actuel)

	Q550	Q950	Q1900	Q3030
PT1	0.18	0.14	0.18	0.17
PT2	0.21	0.23	0.18	0.17
PT3	0.24	0.22	0.2	0.18
PT4	0.23	0.19	0.22	0.19
PT5	0.28	0.21	0.28	0.23
PT6	0.15	0.11	0.15	0.24
PT7	0.06	0.04	0.03	0.02
PT8	-0.03	-0.03	-0.05	-0.06
PT9	0	0	0	0
PT10	0	0	0	0
PT11	0	0	0	0
PT12	0	0	0	0

Pour les débits de crue, les lignes d'eau sont rehaussées des profils PT1 à PT7. Il est possible que la rehausse des lignes d'eau soit visible aussi en amont de PT1, mais les données disponibles ne permettent pas d'évaluer la longueur de l'influence amont de l'aménagement. En amont du PT1, cette influence sera néanmoins très faible, de l'ordre de quelques centimètres.

Pour un débit de 550 m^3/s (Q2) et pour un débit de 950 m^3/s (Q5 à 10), qui sont les débits pour lesquels la modélisation est la plus fiable, la rehausse maximale est observée à l'amont du remblai, au niveau du profil P3. Elle est de 24 et 22 cm respectivement. Au niveau de P1 en amont du secteur modélisé, elle est de 0.18 et 14 cm respectivement.

Pour un débit de 3030 m^3/s (Q50), la rehausse maximale de la ligne d'eau est de 24 cm au niveau du profil P6, et la rehausse au niveau du profil P1 est de 17 cm.

Au niveau du profil P8 (butée), la ligne d'eau n'est pas rehaussée mais au contraire elle est abaissée de quelques centimètres. A l'aval (Profil 9 à P12), la ligne d'eau reste inchangée.

Ce rehaussement de la ligne d'eau aura pour effet une inondabilité accrue du secteur situé en rive droite. La connexion hydraulique avec la gravière sera renforcée.

Une étude de modélisation hydraulique plus détaillée devra permettre de déterminer plus précisément l'augmentation de l'aléa au droit de la plateforme industrielle en rive droite

La nappe d'accompagnement de la Loire sera à priori rehaussée d'une hauteur de l'ordre de 20 cm au niveau du matelas alluvial reconstitué. Cela aura pour effet un renforcement de l'alimentation des annexes par la Loire, et ce pour tout débit. Cet effet sera cependant assez local, et concernera principalement la gravière située en rive droite au niveau du profil PT1.

1.6.2.3. Résultats attendus et impacts environnementaux

1.6.2.3.1. Impact du projet

Concrètement l'opération de reconstitution d'un matelas alluvial en permettant l'accumulation de sédiments, va permettre le développement d'une zone hyporhéique qui correspond à l'ensemble des sédiments saturés en eau, situés au-dessous et à côtés d'un cours d'eau, contenant une certaine quantité d'eau de surface.

D'un point de vu de la diversité biologique, la présence de sédiments sert de frayères à certaines espèces de poissons, comme la truite (présente sur le secteur d'étude) et les poissons juvéniles se développent dans les interstices. La conception du seuil intègre la franchissabilité piscicole. Ainsi les aménagements ne constitueront pas un obstacle à la continuité écologique. La mise en place d'un seuil est favorable au maintien d'un niveau d'eau plus haut et donc d'une mise en eau plus efficace d'éventuelles annexes hydrauliques situées à proximité et pouvant servir de frayères.

La zone hyporhéique permet de réguler la température de l'eau en isolant une partie des écoulements. Ainsi les écoulements circulants à travers les granulats du lit ont une température moins élevée. Ce phénomène de régulation à une importance pour la vie aquatique notamment en été, en période de basses eaux. La zone hyporhéique est également colonisée par de nombreux micro-organismes.

Le développement d'une zone hyporhéique a également une incidence positive sur l'autoépuration de l'eau en constituant une zone de stockage des nutriments et associé à une activité métabolique grâce aux micro-organismes. Elle agit comme un filtre physique et biologique L'autoépuration est optimale avec une granulométrie intermédiaire (qui favorise un équilibre entre le temps de transit suffisamment long et un brassage des eaux évitant l'accumulation de certains composés ou avec une micro-hétérogénéité suffisante pour garantir la présence de zones oxygénées et de zones anoxiques.

La création d'un seuil peut cependant engendrer un risque de dépôt de fines et de colmatage du fond défavorable à la vie aquatique.

L'impact sur les habitats naturels des berges est faible en raison d'une emprise très limitée à nulle. L'impact sur les berges est essentiellement lié à la phase travaux pour l'accès au lit mineur.

L'incidence de la reconstitution d'un matelas alluvial est donc largement positive sur le plan environnemental. Les effets seront effectifs sur les emprises spatiales sur lesquelles le matelas va se mettre en place. La diversité granulométrique des sédiments est également un élément favorable.

1.6.2.3.2. Impact des travaux

Les principaux impacts potentiels en phase travaux sont :

- l'utilisation et/ou la création d'accès (dérangement des populations d'espèces faunistiques, destruction éventuelle d'individus, dégradation temporaire des habitats de la berge) ;
- le dérangement et la destruction éventuelle de la faune piscicole ;
- la dégradation temporaire du lit en eau et des habitats aquatiques lors des différents aménagements (création des batardeaux, dépôts de matériaux, circulation des engins…). La phase de travaux dans le lit en eau peut être à l'origine d'un relargage de matière en suspension. Dans les zones ou la marne est affleurante l'impact sera plus limité en raison de l'absence de sédiments.

1.6.3. Modalités de réalisation des travaux

1.6.3.1. Déroulement des travaux

Les travaux seront réalisés à sec et à l'étiage pour limiter les impacts sur l'environnement et éviter les risques de crue pour le chantier.

(1) Deux pistes d'accès sur chaque rive sont réalisées dans un premier temps. A noter que la piste en rive gauche chemine dans une zone présentant de la renouée du Japon. Un traitement de cette espèce invasive est donc nécessaire. Une incertitude demeure sur les coûts associés à ce traitement, très dépendant de la nature des matériaux et de la faisabilité du criblage (les coûts associés à l'évacuation en décharge sont supérieurs de l'ordre de 75€/T).

(2) Un batardeau constitué de matériaux alluviaux et blocs permettant d'isoler la rive droite est ensuite créé pour permettre la construction de la partie en rive droite du tapis de bloc et de son ancrage en aval. Ce batardeau fait environs 2.5 m de haut sur la partie amont et 4 m sur la partie aval, 3 m de large en crête et 15 m en pied sur 520 m linéaires, ce qui représente un volume de l'ordre de 15 500 m^3 de matériaux. Il permet le passage d'un débit de l'ordre de 100 m^3/s dans le lit de la Loire, une fois le remblai constitué. Cette capacité est suffisante pour supporter les éclusés quotidiens réalisés par EDF (80 m3/S au maximum).

(3) Une fois ces étapes terminées, la partie aval et amont du batardeau centrale est basculée en rive gauche pour mettre à sec la rive gauche de la Loire. L'écoulement est alors en rive droite et la construction du tapis de bloc et de son ancrage en aval peut avoir lieu à sec.

(4) Une fois cette étape achevée, le batardeau est retiré et le reliquat est évacué.

(5) Finalement, les pistes d'accès sont retirées et les emprises des pistes remises en état.

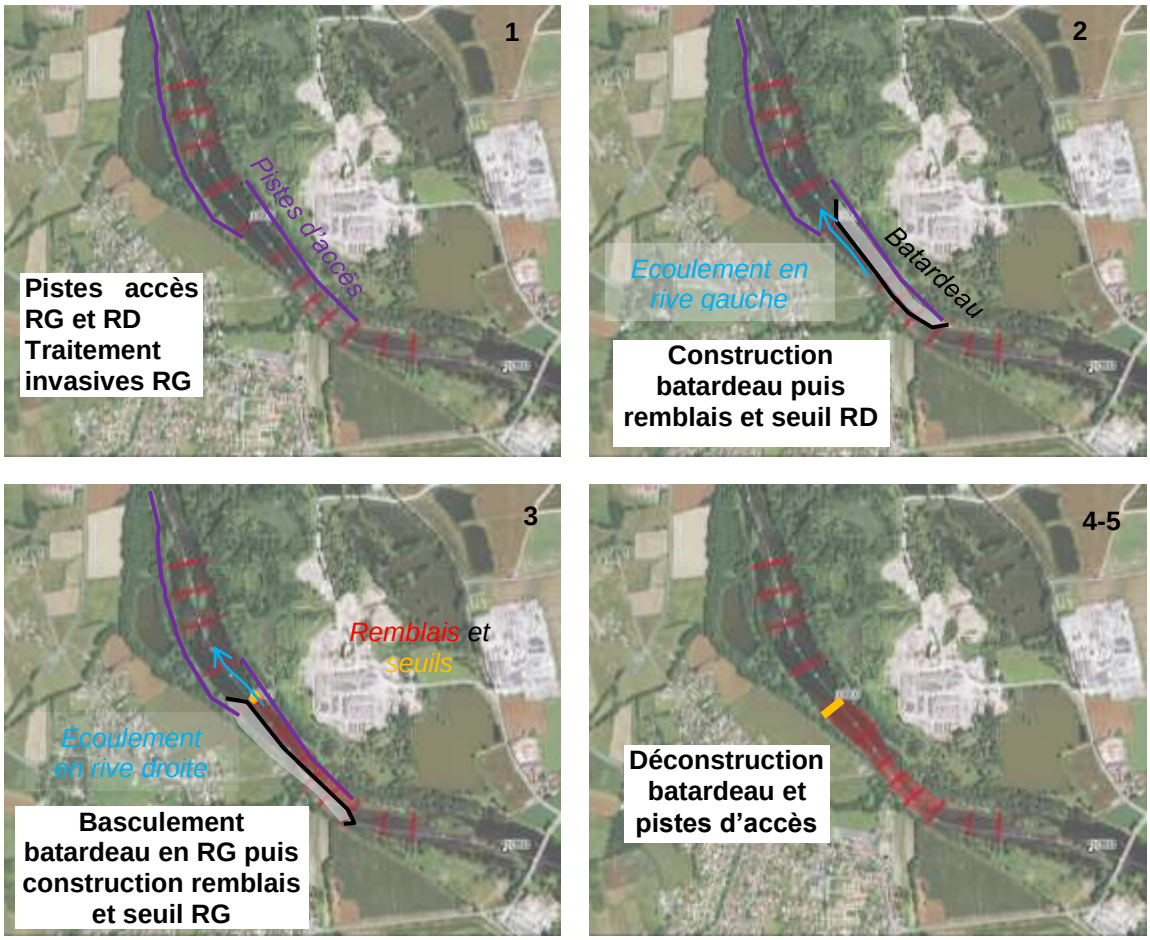


Fig. 58. Déroulement des travaux

1.6.3.2. Accès et piste de chantier

Deux pistes et rampes d'accès sont réalisées, une depuis l'aval en rive gauche, la seconde depuis l'amont en rive droite. A noter la présence d'invasives en rive gauche au droit de la piste. Le traitement de ces invasives est considéré par un criblage sur 50cm de profondeur après la fauche.

En rive gauche, l'accès nécessite un passage sur les parcelles cadastrales de Craintilleux A 218, 219, 220, 221,222, parcelles privées.

En rive gauche, l'accès nécessite un passage sur les parcelles cadastrales de Rivas A 446 et A 24, dont le caractère privé ou public n'est pas connu à ce stade.

Lors de la mise en place des batardeaux et du tapis de blocs, la portance de la marne peut amener à des difficultés de chantier, en cas de portance trop faible de la marne. Il sera préférable de procéder à une reconnaissance géotechnique complémentaire afin de s'en assurer.

1.6.3.3. Prise en compte des enjeux environnementaux

Aux vues des enjeux écologiques identifiés, les préconisations suivantes permettront de réduire les impacts environnementaux de la phase travaux :

- Période d'intervention adaptée à la faune piscicole (août à octobre). Cette période limitera également en partie les impacts sur la faune et la flore des berges lors de la création des accès.
- Gestion des plantes exotiques envahissantes. Une attention particulière sera portée à l'Elodée du Canada (plante aquatique) présente sur le site, ainsi qu'à la Renouée du Japon au niveau des berges. D'autres espèces invasives sont potentiellement présentes et nécessiteront de faire l'objet d'une gestion adaptée.
- Mesures de réduction intégrées aux phases de chantier (suivi environnemental du chantier, balisage préalable de l'emprise de la zone de travaux…)
- La réalisation du batardeau se fera d'amont vers l'aval. Lors de la mise en place du batardeau, des MES (matières en suspension) seront relarguées. Cette situation est difficilement évitable. Une pêche de sauvegarde sera mise en œuvre afin de minimiser l'impact sur la faune aquatique. Une fois le batardeau achevé, un écoulement dans l'enceinte du batardeau est toujours possible (percolation à travers les matériaux imperméables). Avant rejet au lit mineur en dehors de l'enceinte du batardeau, les eaux seront décantés au travers de barrages de matériaux de type gravette. Suivant les demandes spécifiques des services de l'état un suivi peut être réalisé pendant les travaux de mise en place des batardeaux. Si la situation hydraulique au moment semble trop critique vis-à-vis de la préservation des espèces, les travaux peuvent être stoppés momentanément.

1.6.3.4. Calendrier et phasage

Etant donné les enjeux environnementaux (période pour la faune propice de septembre à novembre) et les contraintes liées à l'hydrologie (crues courantes en novembre), la période de travaux la plus propice est la période aout-septembre.

On présente ci-après un calendrier prévisionnel de la réalisation des travaux.

Phase	Aout				Septembre			
Création accès - apport matériel - installation travaux								
Construction batardeau depuis RD								
Construction encrage aval - RD								
Butée - RD								
Remblais - RD								
Bascule batardeau pour RG								
Construction batardeau depuis RG								
Construction encrage aval - RG								
Butée - RG								
Remblais - RG								
Déconstruction batardeau et fin de chantier								

1.6.4. Estimation des coûts

Le chiffrage est effectué sur la base de l'expérience du bureau d'étude en maîtrise d'œuvre de travaux similaires.

Désignation de la nature des travaux	unité	Quantité	Prix unitaire HT (€)	Montant HT (€)
Etudes préliminaires				***55 000 €***
Mesures topographiques complémentaires (modélisation + projet)	F	1	15 000 €	15 000 €
Modélisation hydraulique 1D/2D	F	1	20 000 €	20 000 €
Investigations géotechniques	F	1	8 000 €	8 000 €
Etude projet	F	1	12 000 €	12 000 €
Maîtrise d'œuvre	F	1	42 148.65 €	***42 149 €***
Installation chantier/frais généraux/études/divers	F	1	45 814 €	***45 814 €***
Batardeaux chantier (RG et RD)	F	1	126 225 €	***126 225 €***
Pêche électrique	F	1	2 500 €	2 500 €
Remblais apport et mise en batardeau, pour phasage 1	m^3	15500	5 €	77 500 €
Reprise et mise en remblai des déblais (batardeau) pour phasage 2	m^3	3600	1 €	3 600 €
Travaux préparatoires				***63 000 €***
Débroussaillage	m^2	2500	2 €	5 000 €
Déboisement	u	10	100 €	1 000 €
Traitement invasives piste accès RG	m^2	3800	15 €	57 000 €
Remblais				***52 000 €***
Remblais en grande masse - Loire 2km	m^3	7000	1 €	7 000 €
Remblais en grande masse - gravières	m^3	9000	5 €	45 000 €
Enrochements				***50 400 €***
Amenée et pose des enrochements sur les seuils	m^3	630	80 €	50 400 €
Reprise berges				***1 200 €***
Reprofilage berges 1/1	ml	200	6 €	1 200 €
Voirie				***12 600 €***
Piste circulation engins : fourniture et mise en œuvre des matériaux	ml	700	18 €	12 600 €

Sous-total HT	**448 387 €**
Imprévus (20%)	89 677 €
Total HT	**538 065 €**

Note : le prix des matériaux issus des gravières ou carrière est fortement dépendant des fluctuations du marché local.

1.6.5. Etudes complémentaires

Les études suivantes (AVP / Projet) devront inclure les points suivants :

- Afin d'affiner le chiffrage des travaux un levé topographique sera nécessaire à la réalisation des étapes suivantes. La butée fera l'objet d'un relevé au 1/100 sur son emprise, afin de réaliser des profils en travers précis. La zone de remplissage en amont de la fera l'objet d'un relevé au 1/500. En complément, pour la réalisation du modèle hydraulique (cf. ci-après), la réalisation de profils bathymétriques additionnels sera nécessaire (10 profils),
- Une étude de modélisation de l'inondation du lit majeur : modélisation 1D en lit mineur, et 2D en lit majeur. L'emprise doit s'étendre environ 3 km en amont et autant en aval du site de l'intervention, pour bien représenter les débordements et les mouvements dans le lit majeur. Faire un essai pour vérifier la portance de la marne vis-à-vis de la circulation des engins de chantier :

- Soit par la réalisation de sondages à la pelle depuis la berge pour, de visu, attester de la compacité ou non de la marne
- Soit réaliser des sondages carottés en haut de berge et prélever à la hauteur correspondant à la marne un échantillon intact pour essai labo de compacité.

- Etude AVP détaillé / projet (ces deux études peuvent être combinées)

1.6.6. Approche réglementaire

Les démarches administratives à réalisation du projet sont présentées ci-après. La réalisation du projet nécessitera un dossier d'autorisation au titre de la loi sur l'eau. Un dossier de Demande d'Autorisation Environnementale devra donc être établi.

La nécessité d'une étude d'impact (évaluation environnementale) n'est pas à écarter étant donné la nature des travaux, mais reste à l'appréciation de l'administration. Dans ce sens un travail de concertation et d'échange en amont paraît indispensable afin de bien cadrer le contexte réglementaire du projet, notamment vis-à-vis de la nécessité de réaliser un dossier de dérogation espèces protégées. Une étude naturaliste complémentaire sera nécessaire pour la réalisation des dossiers règlementaires à adapter au site et selon le cadrage avec la DREAL.

Nomenclature IOTA	Demande d'Autorisation au titre de Rubrique 3.1.2.0 : Modification du profil en long et en travers sur une longueur supérieur à 100 m. Rubrique 3.1.1.0 Installations, ouvrages, remblais et épis, dans le lit mineur d'un cours d'eau Possible concernant la rubrique 3.1.5.0 : Destruction de frayères, sur une surface de plus de 200m²
Evaluation environnementale	Examen au cas par cas au titre de Catégorie 10. Canalisation et régularisation des cours d'eau
Evaluation des incidences Natura 2000	Oui Site Natura 2000 directive habitats (ZSC) : Milieux alluviaux et aquatiques de la Loire - FR8201765 Site Natura 2000 directive oiseaux (ZPS) : Plaine du Forez FR8212024
Dérogation espèces protégées	Possible Nécessite un cadrage avec la DREAL
Demande de défrichement	Non

2. SITE DE L'ECOPOLE

2.1. PRESENTATION DU SITE

2.1.1. Situation

Le site de l'Ecopôle du Forez est situé à proximité de l'Ecopôle du Forez. En rive gauche, ce site se situe à cheval sur les communes de Magneux-Haute-Rive et de Chambéon. En rive droite, le site se situe au niveau de la ville de Saint-Laurent-la-Conche.

Fig. 59. Carte de situation du site d l'Ecopôle. Source : IGN (géoportail)

Une vue aérienne récente (2016) du site est présentée ci-après :

Fig. 60. Photographie aérienne du site de l'Ecopôle. Source : IGN (géoportail)

2.1.2. Données topographiques

Des profils topographiques ont été réalisés au niveau du site de L'Ecopôle (février 2020). La localisation des profils est présentée sur la figure ci-après.

Ces profils sont présentés en Annexe 2.

2.1.3. Caractéristiques du seuil de marnes

Le seuil de l'Ecopôle a une configuration complexe. Une zone de forte pente est présente au niveau des deux chenaux de part et d'autre de l'île. Deux seuils de type « barrette » sont visibles sur le chenal en rive droite (chenal secondaire), alors que ce n'est pas le cas en rive gauche où la chute est plus progressive. La photographie aérienne suivante permet de voir ces seuils « barrette » sur le chenal en rive droite, qui sont orientés de bais par rapport à l'écoulement. Sur le chenal en rive droite, la teinte de l'eau plus claire témoigne d'une lame d'eau plus faible et de vitesses d'écoulement plus importantes qu'à l'amont et à l'aval.

Fig. 61. Le seuil de marne de l'Ecopôle

Ce site a fait l'objet d'une visite le 16 mai 2019 et le 3 février 2020. Les photos ci-après présentent la configuration du site et du seuil.

Le chenal rive gauche, vue de la rive gauche, vers l'aval. On distingue les marnes par leur couleur verdâtre (3/02/2020)

Chenal rive gauche, vue vers l'amont (03/02/2020)

Le seuil « barrette » aval du chenal rive droite, vu de l'aval (16/05/2019)

Vue de l'aval de l'île, proche de l'emplacement prévu pour la butée aval (3/02/2020)

Fig. 62. Photographies de la zone de l'Ecopôle du Forez le 16 mai 2019 et le 3 février 2020). Photographies ARTELIA

Le profil en long du site est présenté ci-après, ainsi que les lignes d'eau 2004 (EMSE) et 2011 (Lidar DREAL).

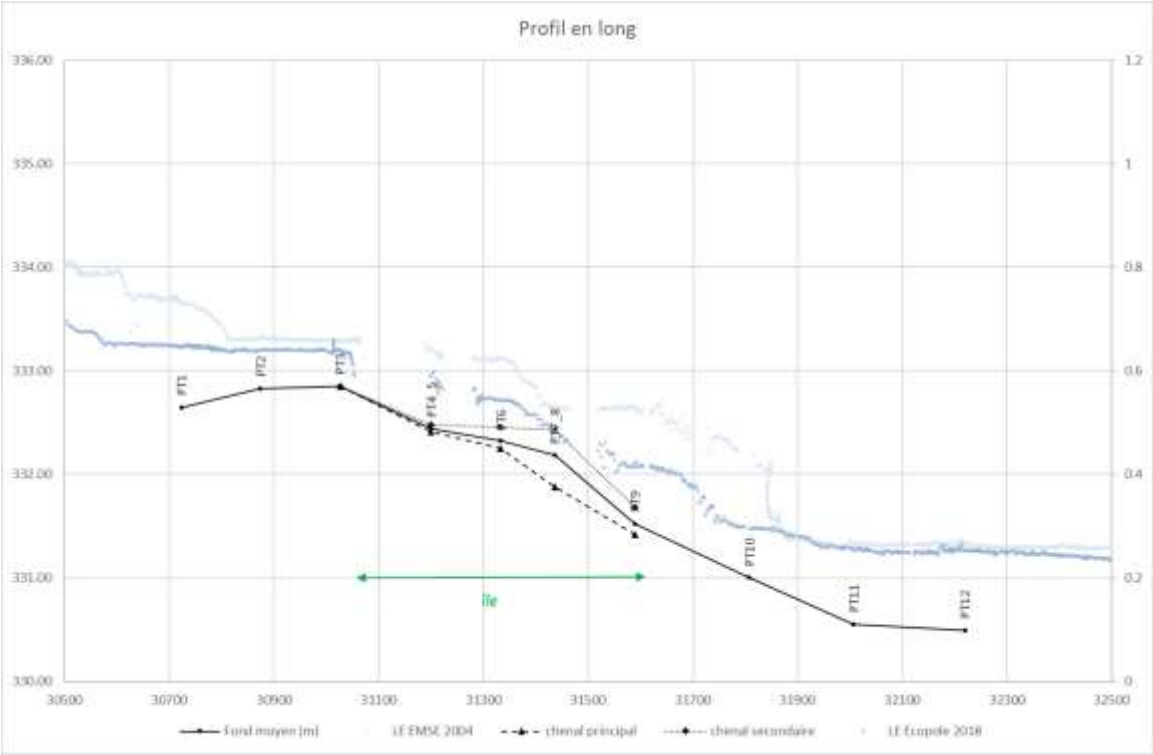


Fig. 63. Profil en long du site de l'Ecopôle – le fond moyen est calculé d'après les mesures topographiques, et les lignes d'eau proviennent de l'EMSE (2004) et du Lidar de la DREAL (2011)

Ce site a connu une incision de l'ordre de 60 cm vraisemblablement au cours de la crue de 2016, comme en témoignent les différences entre la ligne d'eau d'étiage de 2004 et celle de 2018 sur le graphique ci-dessus.

Au niveau du fond, la chute est de 2.3 m entre le profil 3 et le profil 11, sur une distance de 981 m. La chute est moins marquée au niveau de la ligne d'eau (1.9 m). En suivant le tracé du chenal en rive gauche (chenal principal), la pente est régulière entre PT3 et PT11, avec peut-être un point haut peu marqué en PT6, qui pourrait indiquer la présence d'un point dur dans les marnes. Dans le chenal secondaire, l'évolution de la pente est très différente. La pente est modérée entre PT3 et PT8. Au niveau de PT8, situé sur l'un des seuils « barrette », il y a une rupture de pente nette, qui devient beaucoup plus forte jusqu'à PT9. Le seuil barrette en PT8 semble ainsi constituer un véritable point dur qui tient le profil en long dans ce chenal.

Au niveau du profil PT7 (chenal RG) - PT8 (chenal RD), le lit en rive droite est ainsi perché par rapport au lit en rive gauche. C'est aussi le cas au niveau du profil PT9, mais avec une différence d'élévation plus faible.

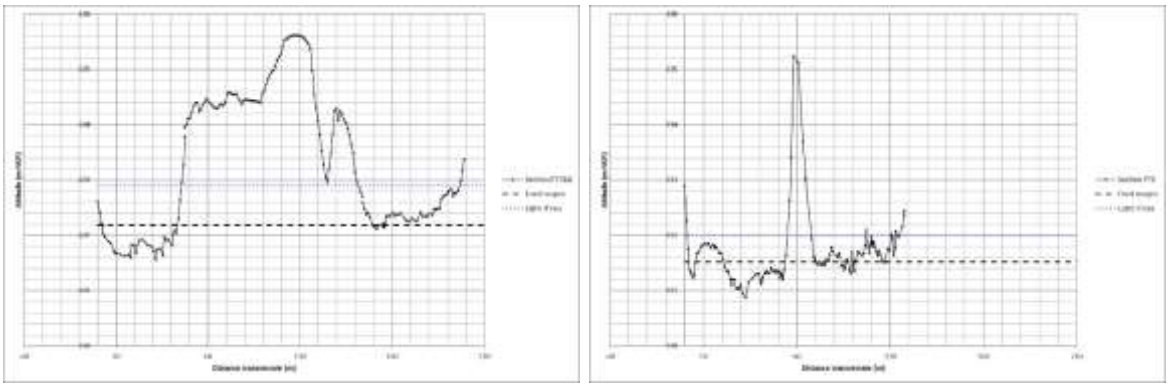


Fig. 64. Profils PT 7 (chenal rive gauche) et PT8 (chenal rive droite) à gauche, et profil PT9 à droite

2.1.4. Diagnostic environnemental

2.1.4.1. Contexte naturel

Le site de l'Ecopôle est directement concerné par plusieurs zonages :

- site Natura 2000 directive habitats (ZSC) : Milieux alluviaux et aquatiques de la Loire FR8201765 ;
- site Natura 2000 directive oiseaux (ZPS) :
  - Plaine du Forez FR8212024 ;
  - Ecozone du Forez FR8212002 ;
- ZICO : Plaine du Forez n°00185 ;
- ZNIEFF Type 2 : Plaine du Forez n°820002499 ;
- ZNIEFF Type 1 : Fleuve Loire et annexes fluviales de Grangent à Balbigny n°820032225.

Ces zonages valorisent l'ensemble naturel formé par la Loire. Ils comprennent le fleuve et la plaine alluviale qui abritent une mosaïque de milieux naturels notamment humides et aquatiques. Les bordures de la Loire sont remaniées en fonction des déplacements du cours d'eau. La plaine alluviale est également marquée par l'exploitation de gravières qui a largement façonné le paysage. Cet ensemble supporte une biodiversité importante, et constitue une zone particulièrement remarquable pour de nombreuses espèces d'oiseaux. (

Les principales pressions identifiées sur ces sites sont :

- la pollution des eaux de surfaces ;
- le changement des conditions hydrauliques induit par l'homme ;
- les espèces exotiques envahissantes ;
- les pratiques agricoles ;

Ainsi, les enjeux de conservation visent à :

- maintenir la dynamique du fleuve :

- favoriser les zones d'érosion et d'accumulation sédimentaire ;
- réaménager certains faciès dégradés (fond du lit, berges ...).

Plusieurs autres zonages sont présents à proximité :

- **Site Natura 2000 directive habitats (ZSC) :**
  - Lignon, Vizezy, Anzon et leurs affluents FR8201758 < 2km ;

- ZNIEFF Type 1 :
  - Etang Mazoyer n°820032198 < 3km.

D'un point de vu général, le site fait partie d'un ensemble naturel à très fort intérêt écologique situé dans un contexte très anthropisé (urbanisation, culture, exploitation de matériaux…). Cet ensemble forme un corridor écologique important.

2.1.4.2. Diagnostic écologique

Le site de l'Ecopôle du Forez a été largement étudié et dispose d'une base de données conséquente.

Les boisements alluviaux occupent une surface importante sur les berges. Les milieux ouverts sont tous liés à la dynamique alluviale et revête un intérêt écologique certain. La majorité des habitats est ainsi reconnue d'intérêt communautaire vis-à-vis de leur caractéristique rivulaire.

Le secteur de l'Ecopôle et de l'Ecozone est un site à enjeu abritant une faune et une flore diversifiées et patrimoniales.

Plusieurs espèces patrimoniales ont été identifiées en particulier sur la berge de la rive gauche du site étudié (FNE Loire, inventaire 2019) :

- *Ludwigia palustris :* Protection régionale et menacée (NT) en Rhône-Alpes ;
- *Najas marina* Protection régionale et menacée (LC) en Rhône-Alpes ;
- *Poa palustris* Protection régionale et menacée (NT) en Rhône-Alpes.

	CORINE Biotopes		Natura 2000				
Libellé habitat naturel	**Code**	**Libéllé**	**Code**	**Statut**	**Libellé**	**Enjeux**	**Surface (ha)**
Boisement alluvial	44.4 / 44.1	Forets mixtes de chênes, d'ormes et de frênes des grands fleuves / Formations riveraines de saules	91E0	PR	Forêts alluviales à Alnus glutinosa et Fraxinus excelsior (Alno-Padion,Alnion incanae, Salicion albae)*	Fort	6,6362
Friche herbacée alluviale	87	Terrains en friche et terrains vagues		NC		Faible	0,6276
Friche annuelle amphibie	24.52	Groupements euro-sibériens annuels des vases fluviatiles	3270	IC	Rivières avec berges vaseuses avec végétation du Chenopodion rubri p.p. et du Bidention p.p.	Moyen	0,7912
Loire	24.1	Lits des rivières		NC		Fort	7,2226
Mégaphorbiaie à Phalaris arundinacea	53.16 / 37.71	Végétation à Phalaris arundinacea / Voiles des cours d'eau	6430	IC	Mégaphorbiaies hygrophiles d'ourlets planitiaires et des étages montagnard à alpin	Moyen	0,4056
Ourlet nitrophile	37.71	Voiles des cours d'eau	6430	IC	Mégaphorbiaies eutrophes des eaux douces	Moyen	0,0528
Saulaie arbustive riveraine	44.12	Saussaies de plaine, collinéennes et méditerranéo-montagnardes		NC		Moyen	0,2068
Végétation herbacée pionnière	22.3 / 24.52	Communautés amphibies / Groupements euro-sibériens annuels des vases fluviatiles	3130 / 3270	IC	Eaux stagnantes, oligotrophes à mésotrophes avec végétation des Littorelletea uniflorae et/ou des Isoeto-Nanojuncetea / Rivières avec berges vaseuses avec végétation du Chenopodion rubri p.p. et du Bidention p.p.	Fort	0,7183

Les espèces exotiques envahissantes sont nombreuses et ont également été bien étudiées par l'Ecopôle. Sur le site et à proximité immédiate les espèces suivantes ont été identifiées :

- *Reynoutria gr. Japonica*
- *Senecio inaequidens*
- *Robinia pseudoacacia*
- *Ambrosia artemisiifolia*
- *Lindernia dubia*
- *Bidens frondosa*
- *Cyperus esculentus*
- *Egeria densa*

- *Elodea nuttallii*
- *Erigeron canadensis*
- *Erigeron sumatrensis*
- *Galega officinalis*
- *Acer negundo*
- *Impatiens glandulifera*

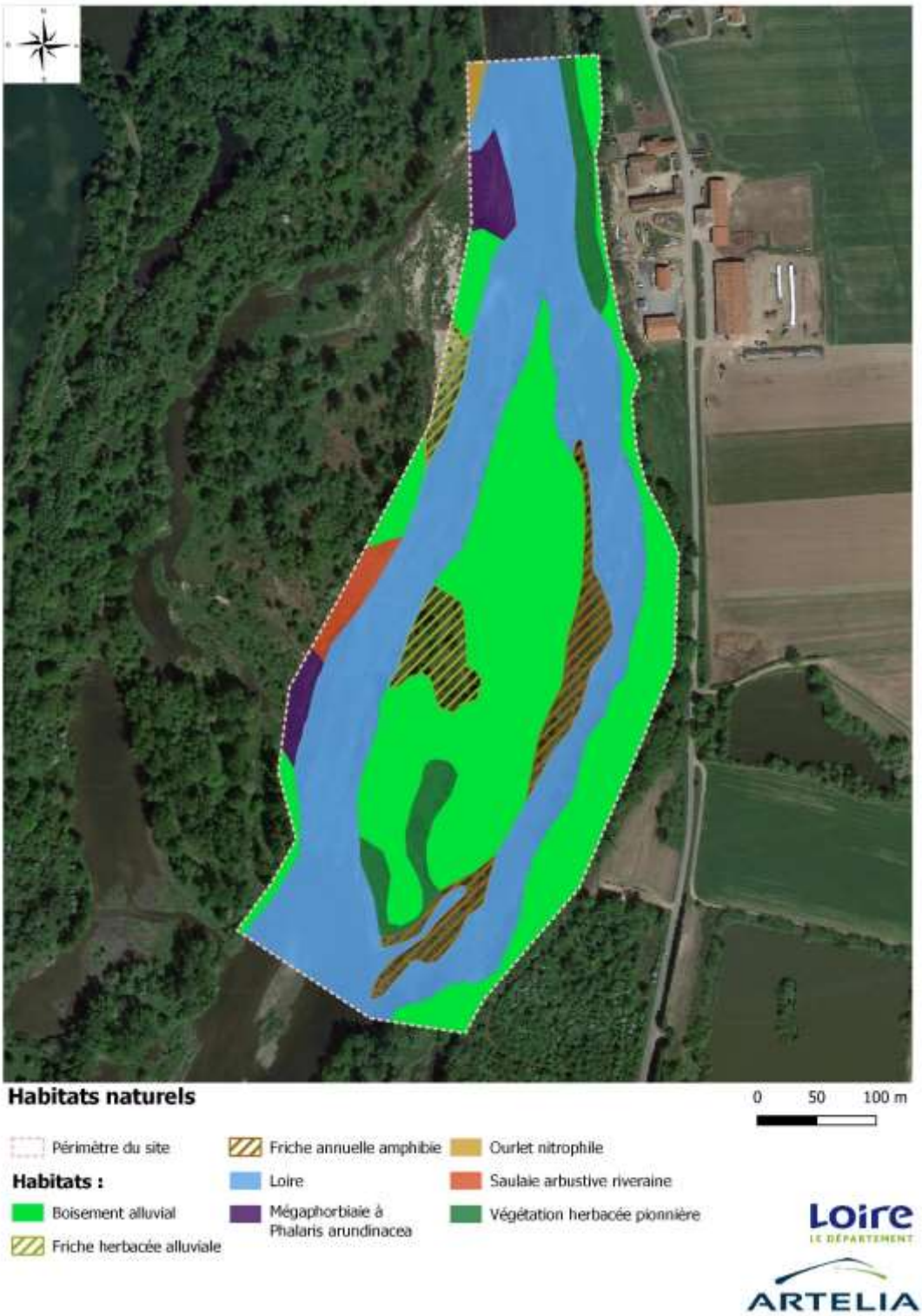


Fig. 65. Carte des habitats naturels du site de l'Ecopôle

2.2. CHOIX DES SCENARIOS D'AMENAGEMENT

Le choix des scénarios d'aménagement s'est déroulé en plusieurs étapes :

- Le bureau d'étude a présenté plusieurs possibilités d'aménagement pour chacun des sites lors d'une réunion du COTECH le 25 novembre 2019. Ces différentes options ont fait l'objet de discussions, et ont amené des suggestions de la part des membres du COTECH.
- A l'issue de cette réunion, des discussions complémentaires ont eu lieu entre le maître d'ouvrage, le bureau d'étude, et certains membres du COTECH, afin d'affiner la définition des scénarios.
- Enfin, une note technique présentant les scénarios retenus a été diffusée à l'ensemble des membres du COTECH pour validation. Ce document a été approuvé.

Les diapositives diffusées lors de cette réunion sont présentées en Annexe 2. Le compte-rendu de la réunion est présenté en Annexe 3. La note technique validée est présentée en Annexe 4.

Ces scénarios sont inspirés des travaux antérieurs réalisés sur cette question :

- Reconstitution du matelas alluvial du lit de la Loire : étude générale, étude détaillée du site de Feurs La grande Motte, Rapport technique de SOGREAH pour la Direction départementale de l'équipement de la Loire, 1998
- Etude complémentaire au diagnostic du SAGE Loire en Rhône-Alpes - Plan d'actions pour limiter le dysfonctionnement géomorphologique du fleuve Loire, Rapport technique, Hydratec, Département de la Loire, 2009

Pour ces différents scénarios d'AVP, il a semblé judicieux de varier les solutions afin de proposer un spectre de solutions. Le niveau d'ambition de protection des marnes varie d'un scénario à l'autre. Le caractère expérimental de ces aménagements est affirmé.

Les grands principes des solutions retenues sont présentés ci-après.

2.2.1. Triple butée : principe

Trois butées en enrochements libres sont disposées à l'aval du seuil de marnes, et au milieu du seuil sur chacun des deux bras. Elles sont ancrées dans les marnes.

Ces butées ont une hauteur de 50 cm. La pente aval de ces butées est de 4%, avec une forte rugosité pour créer des abris et ainsi assurer la franchissabilité piscicole.

La butée aval permet de rattraper l'incision récente du seuil de marnes et permet également l'alimentation de la frayère à brochets.

La zone entre les deux butées est remplie de matériaux. On dispose des matériaux de toute taille pour remplir cette zone, et des matériaux plus grossiers en surface pour constituer le pavage. La pente de cette zone de remplissage est de de 2.4‰.

La butée amont est construite sans apport de matériaux, dans l'objectif d'un remplissage naturel.

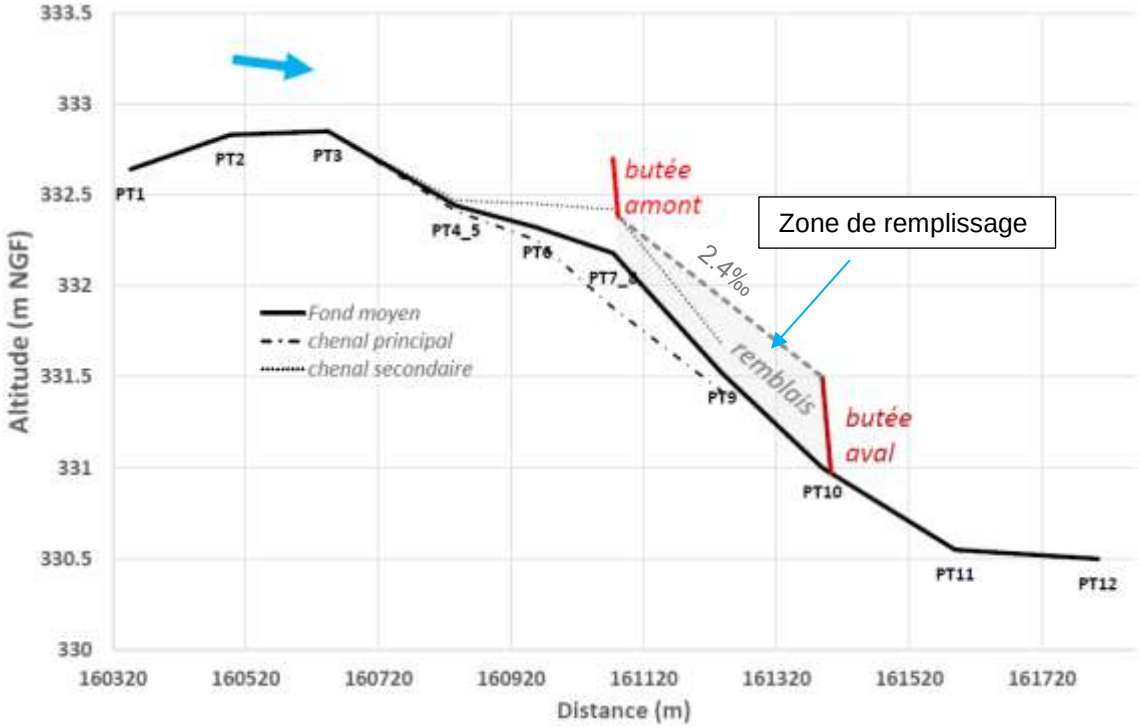


Fig. 66. Site de l'Ecopôle, Scenario 1 : schéma sur le profil en long

2.2.2. Simple butée : principe

Une butée en enrochement est disposée à l'aval du seuil de marnes. Elle est ancrée dans les marnes.

Elle a une hauteur de 50 cm. La pente aval de ces butées est de 4%, avec une forte rugosité pour créer des abris, afin d'assurer la franchissabilité piscicole.

L'amont de la butée est rempli de matériaux. On dispose des matériaux de toute taille pour remplir la butée, et des matériaux plus grossiers en surface pour constituer le pavage. La pente de cette zone de remplissage a une pente de 1.7‰.

Cette solution permet la protection du seuil de marne par une couverture alluviale, et améliore les conditions d'alimentation de la frayère à brochets.

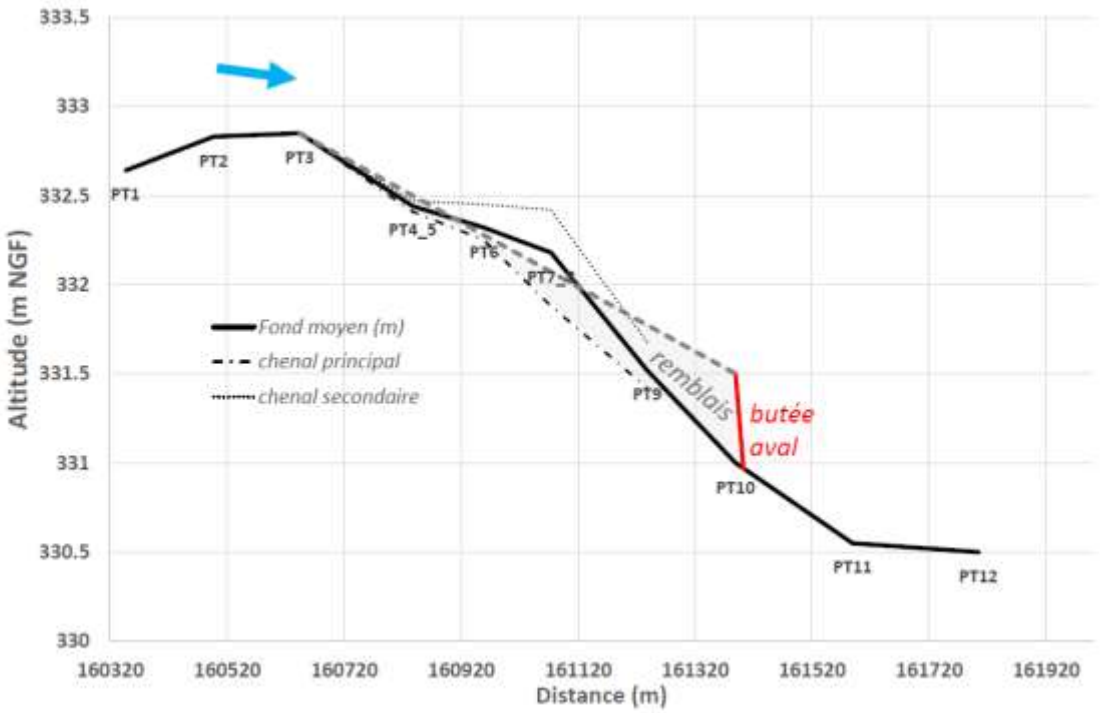


Fig. 67. Site de l'Ecopôle, Scenario 2 : schéma sur le profil en long

2.2.3. Epis à échancrure : principe

Des épis à échancrure peuvent être conçus pour rehausser la ligne d'eau, et constituer ainsi une protection hydraulique des marnes. La perte de charge responsable de l'érosion est concentrée au niveau des épis plutôt qu'au niveau du seuil de marnes.

Cette modification de l'hydraulique donne lieu au dépôt de matériaux naturellement en amont, s'il y a un apport de matériaux.

Au niveau et à l'aval des épis, l'écoulement est fortement accéléré. Les marnes doivent donc être protégées localement pour éviter les affouillements.

Ces épis fonctionneraient pour une gamme de débit assez précise, qui reste à déterminer en fonction des objectifs. Les épis sont neutres pour les débits plus faibles ou plus forts que ceux pour lesquels ils ont été dimensionnés.

L'avantage de cette solution est qu'elle permet d'éviter d'installer un obstacle sur toute la largeur du chenal. Elle est donc très favorable pour la continuité piscicole. Par ailleurs, les épis peuvent être conçus pour permettre une bonne intégration paysagère et une diversification des habitats.

Ce type d'épis a été installé dans les années 2000 à Fresnes-sur Loire pour alimenter un chenal secondaire.

Fig. 68. Epis de Fresnes-sur-Loire

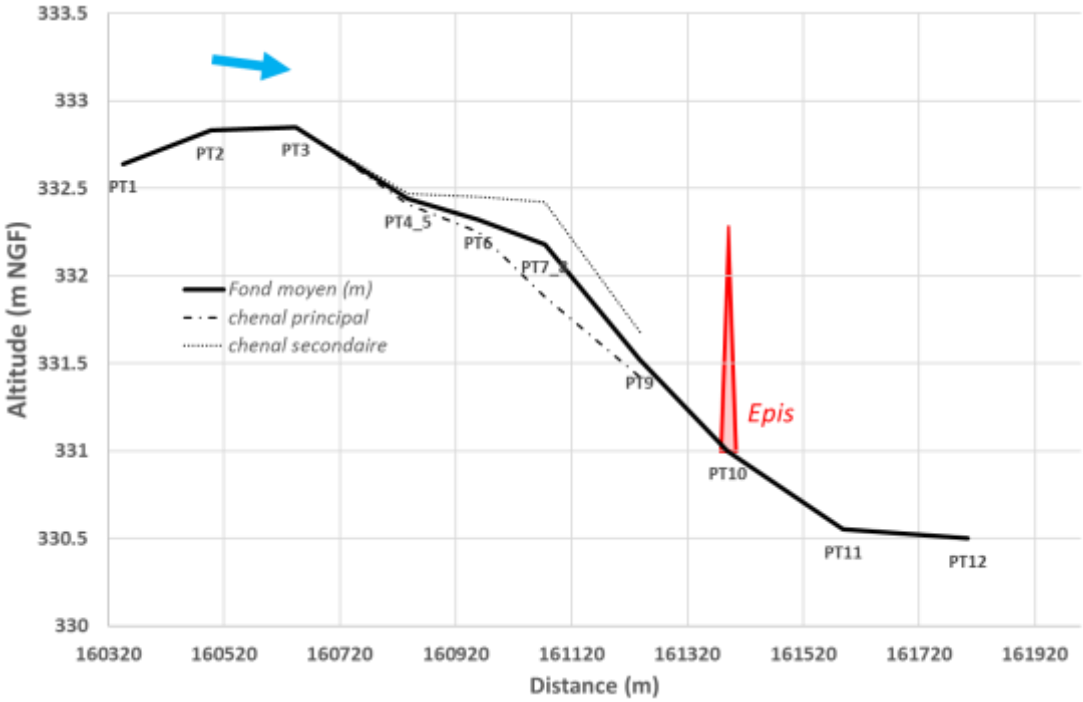


Fig. 69. Site de l'Ecopôle, Scenario 3 : localisation des épis à échancrure

2.3. MODELISATION HYDRAULIQUE

2.3.1. Construction et calibration

L'état actuel et les états aménagés du site de L'Ecopôle ont fait l'objet d'une modélisation hydraulique unidimensionnelle en régime permanent à l'aide du logiciel HECRAS. Les données topographiques utilisées pour construire le modèle correspondent à 10 sections en travers dans le lit mineur prolongées par les données lidar 2011 pour le lit majeur.

Fig. 70. Carte des profils du modèle hydraulique, site de l'Ecopôle

Un modèle unidimensionnel (Mascaret) construit avec une plus grande étendue spatiale (de Gaudet à Feurs) dans le cadre de l'étude de modélisation 1D réalisée par ARTELIA pour l'EP Loire en 2018 a été utilisé pour déterminer les conditions aux limites du modèle HECRAS utilisé dans la présente étude. Le modèle Mascaret a été calibré en ligne d'eau pour les crues de 2003 et de 2008, et validé sur la crue de 2016. Les simulations HECRAS sont réalisées en introduisant un débit en amont du modèle et en fixant un niveau en aval. La relation niveau aval/débit tirée du modèle MASCARET est présenté ci-après :

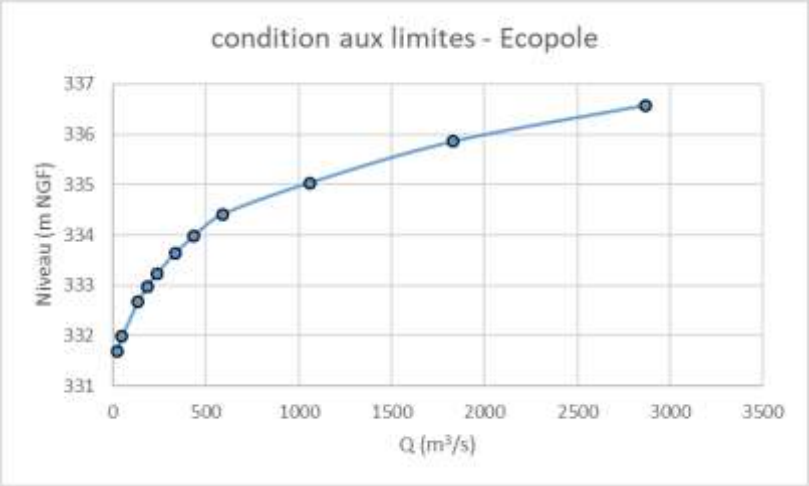


Fig. 71. Site de l'Ecopôle : relation niveau/débit déterminant la condition à la limite aval du modèle hydraulique

Des coefficients de frottement de Strickler pour le lit mineur et majeur de respectivement 23 et 18 ont été utilisés après validation des lignes d'eau en considérant le modèle MASCARET comme référence pour 4 débits (590, 91060, 1830 et 2870 m³/s) :

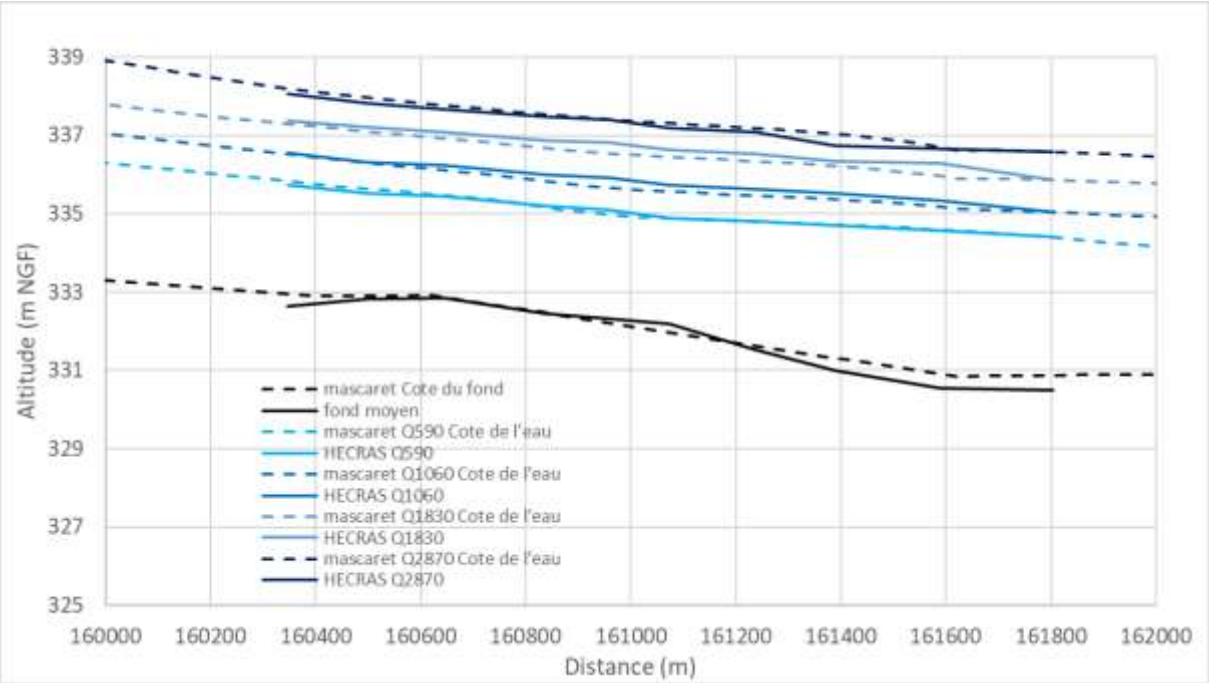


Fig. 72. Comparaison des lignes d'eau obtenues avec le modèle HEC-RAS et le modèle de référence Mascaret pour 4 débits

Les différents états aménagés sont simulés en faisant varier la forme et en ajoutant des sections en travers représentant les aménagements. Les grandeurs hydrauliques (vitesses, contraintes, niveau d'eau, etc.) sont utilisées dans le dimensionnement des aménagements.

2.3.2. Validité et limites du modèle

En complément des lignes d'eau présentée plus haut, on présente ci-après les vitesse et contraintes modélisées pour l'état actuel.

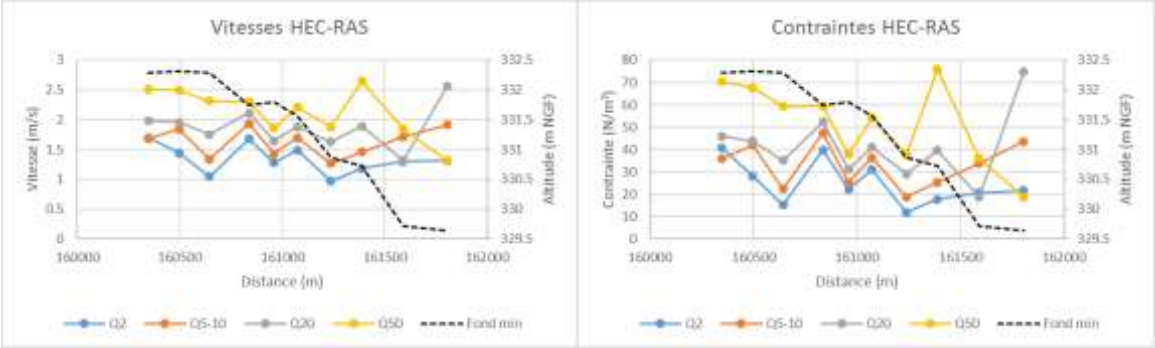


Fig. 73. Résultats du modèle HEC-RAS pour le site de l'Ecopôle, état actuel, vitesses et contraintes

Pour ce modèle, les lignes d'eau obtenues sont très proche des lignes d'eau du modèle mascaret, notamment en amont en aval, et ce pour tous les débits.

Le modèle ne permet pas de distinguer les différences de vitesse ou de contraintes entre le chenal principal et le chenal secondaire.

Les vitesses sont de l'ordre de 1 à 2.6 m/s. Elles augmentent selon les débits. Les contraintes sont de l'ordre de 10 à 80 N/m². De même, elles sont plus fortes quand les débits sont plus importants. Vitesses et contraintes sont globalement assez homogène le long du tronçon modélisé. Un pic de vitesse et de contrainte est observé au profil P10 pour la crue cinquantennale.

Dans ce secteur, le lit majeur présente un variété topographique liée aux anciennes gravières et ancien chenaux, de telle sorte que des débordements sont observés pour tous les débits de crue modélisés. Cela dit, même pour le plus fort débit, le modèle représente l'ensemble des zones inondées. De plus, contrairement au modèle de Craintilleux, il n'y a pas de digues en bordure du chenal de telle sorte que l'écoulement en lit majeur est représenté sans contraction de section particulière.

On considère que ce modèle est fiable pour tous les débits modélisés.

2.4. AVP 1 – TRIPLE BUTEE

2.4.1. Présentation de l'aménagement

2.4.1.1. Principe

Trois butées en enrochements sont disposées à l'aval du seuil de marnes, et au milieu du seuil sur chacun des deux bras. Ces butées sont ancrées dans les marnes. Ces butées reprennent le principe généra décrit au 2.2 « Choix des scenarios d'aménagement ».

Ces butées présentent les caractéristiques suivantes :

- hauteur par rapport au fond moyen de 50 cm,
- crête de 60 m (aval), 47 m et 55 m (amont) de large berge à berge, selon la largeur de la Loire,
- pente du parement aval de 4%, avec une forte rugosité, afin d'assurer des conditions favorables à la franchissabilité piscicole.

La butée aval permet de rattraper l'incision récente du seuil de marnes et permet également l'alimentation de la frayère à brochets.

La butée aval est remplie de matériaux. On dispose des matériaux de toute taille pour remplir la butée, et des matériaux plus grossiers en surface pour constituer le pavage. La pente de cette zone de remplissage est de de 2.4‰. Ce remblai vient protéger l'aval d'un seuil de marne sur le chenal secondaire en rive droite.

La butée amont est construite sans apport de matériaux, dans l'objectif d'un remplissage naturel.

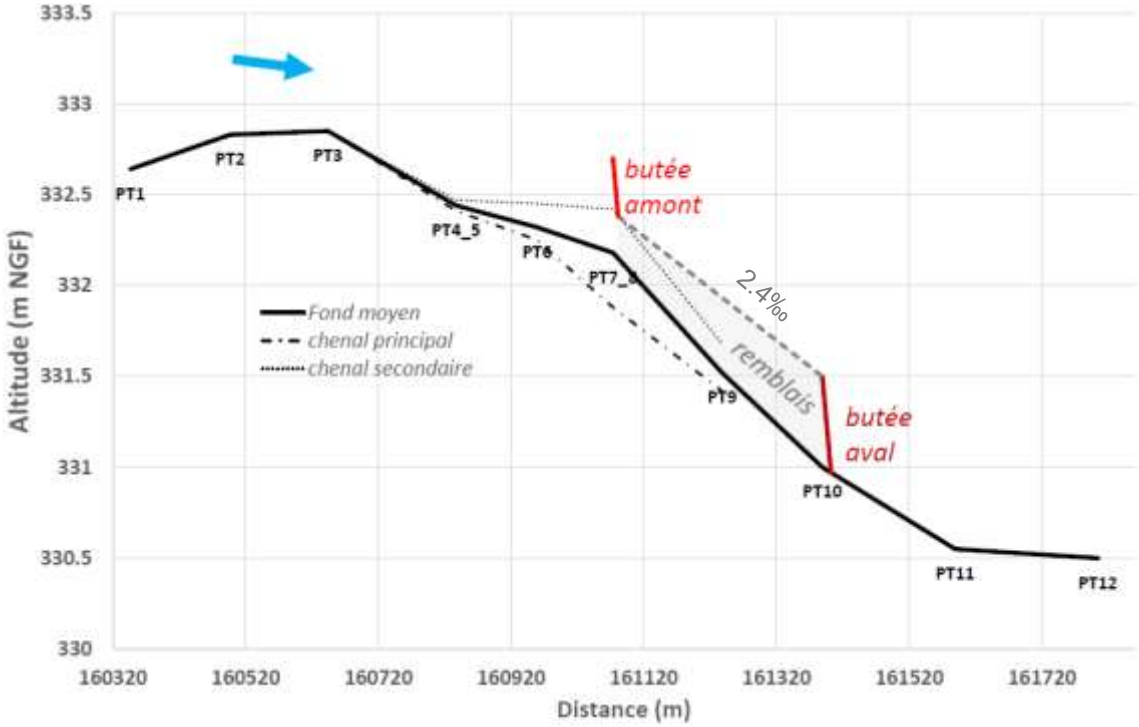
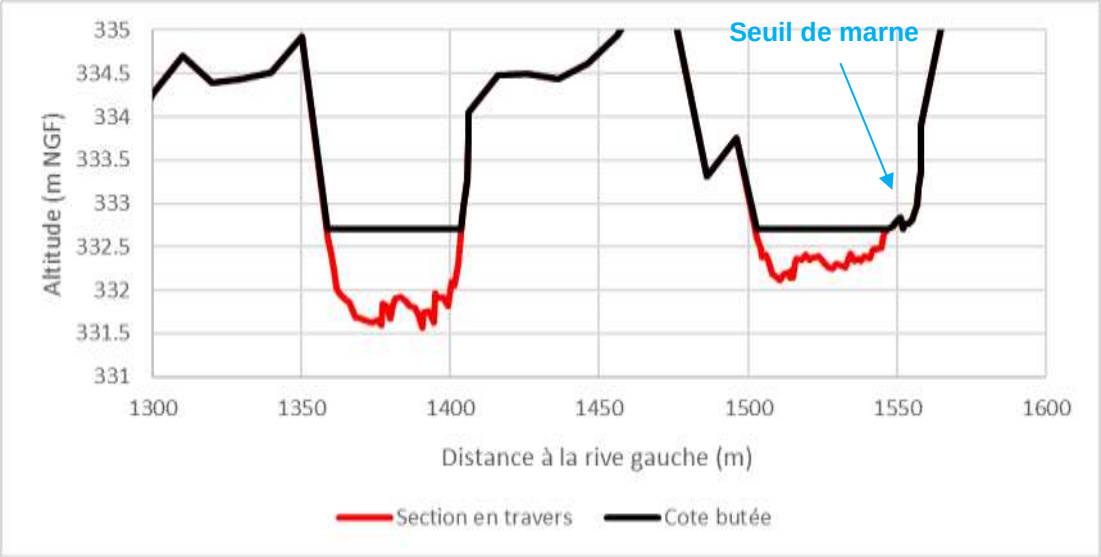


Fig. 74. Schéma sur le profil en long (butée triple)

Fig. 75. Vue en plan de l'aménagement (butée triple)

2.4.1.2. Butées

Les crêtes des butées sont positionnées au droit des profils n° 7_8 et n°10, 50cm au-dessus de la cote moyenne :



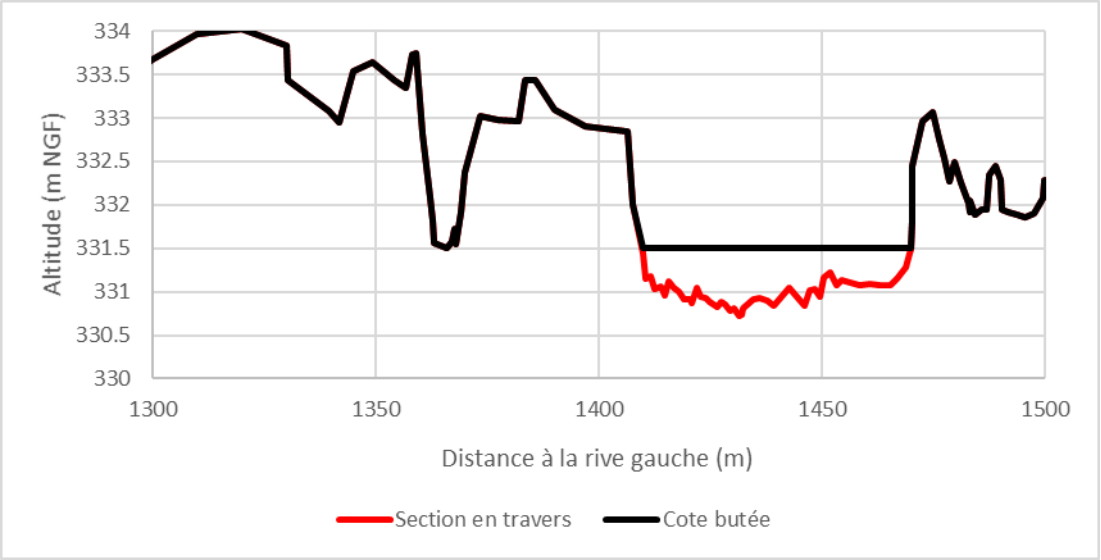


Fig. 76. Coupe en travers des deux butées (amont = figure du haut, aval = figure du bas)

A l'aide des niveaux et vitesses issues du modèle hydraulique 1D, les blocs constituant la butée sont dimensionnés.

Des vitesses maximums comprises entre 2.15 m/s et 2.65 m/s sont obtenues par la modélisation hydraulique (Q_{Loire}=2870m³/s, temps de retour 50 ans) dans le lit mineur pour les butées amont et aval.

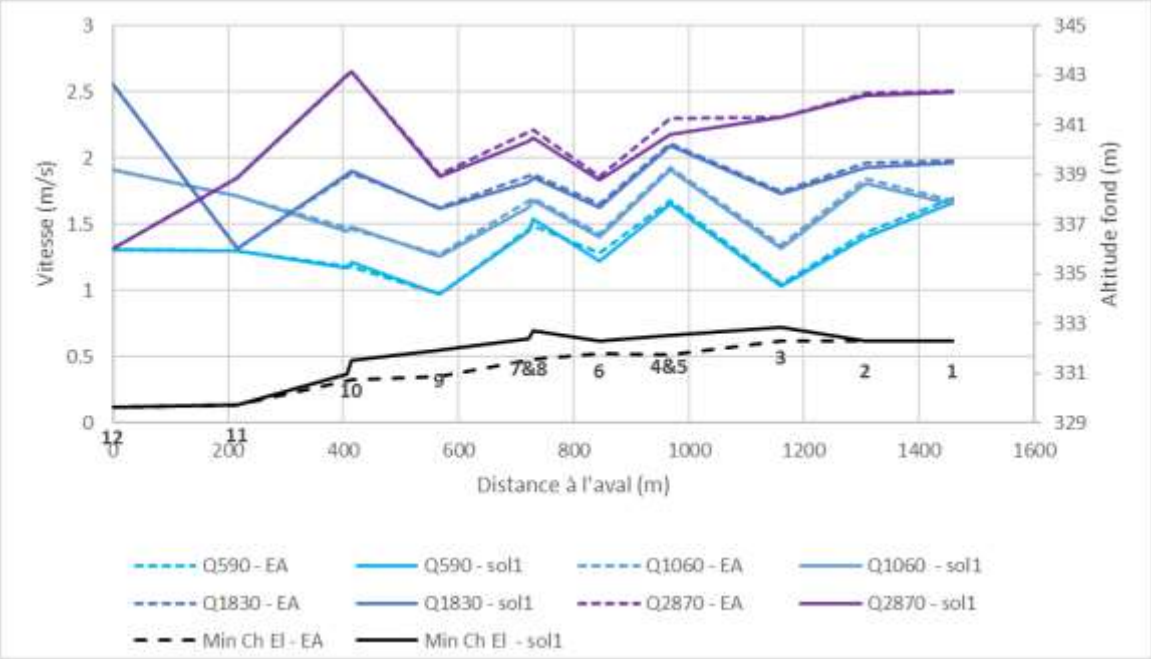


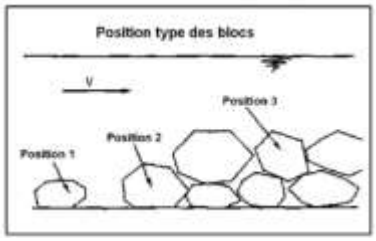
Fig. 77. Distribution des vitesses dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, sol 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 1. Modélisation en régime permanent pour des débits de 590 m³/s (temps de retour 2 ans), 1060 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1830 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 2870 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

L'approche du dimensionnement des blocs constituants la butée est étudiée suivant la méthode d'Isbach :

$$D_{50} = \frac{V^2}{m^2.2g.\Delta d}$$

Avec :

- D_{50} : blocs moyen (en m)
- V= vitesse dans la section contractée
- m= coefficient fonction de la place du bloc dans la protection. Pour notre cas m=1.2 (position 2)



- g= accélération gravitationnelle (9.81m/s^{-2})
- Δd= densité déjaugée de l'enrochement (1.6 à 1.85)

En utilisant le critère d'Isbach pour des blocs en extrémité de carapace (position 2) on obtient des diamètres de blocs stables de respectivement 11 et 16 cm pour la butée amont et aval.

En conclusion :

La classe d'enrochement **LM5/40** (blocs compris entre 15 et 31cm) est retenue pour constituer les butées, une blocométrie qui devrait permettre d'assurer la pérennité de la structure dans le temps, compte tenu des contraintes hydrauliques de la zone.

Afin d'assurer la stabilité des blocs du parement aval, un ancrage sur l'aval par un décaissement « à minima » dans la marne est proposé pour prévenir le départ des blocs. A noter que sans cet ancrage, les blocs risquent de rouler vers l'aval déstructurant ainsi l'ensemble de la structure. La mise en place d'un sabot ancré dans la marne permettre de stabiliser l'ensemble de la structure. L'épaisseur d'ancrage étant limitée, les blocs pourront être « enfoncés » à l'aide des pelles mécaniques pour augmenter leur imbrication.

Les butées amont ont une largeur de berge à berge de respectivement 47 m et 55 m tandis que la butée aval a une largeur de 60m, ce qui correspond à 700m^3 d'enrochements au total.

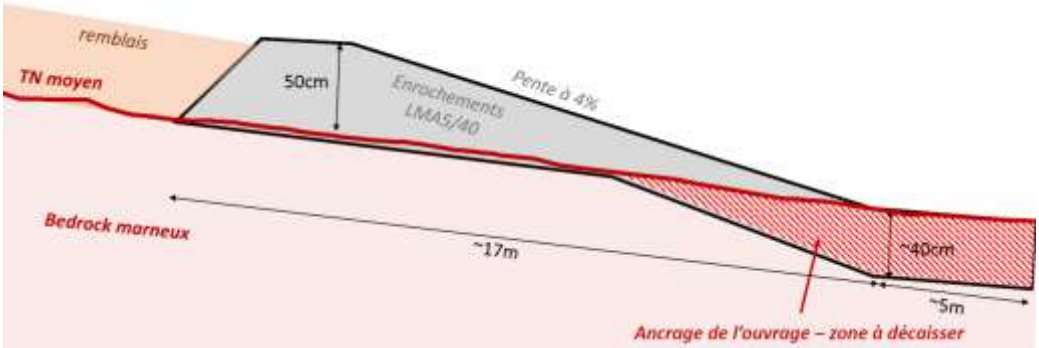


Fig. 78. Butée et matelas alluvial, schéma de principe

Concernant la provenance de ces blocs, la source suivante est envisagée :

- Utilisation de blocs provenant des opérations de désenrochement prévues dans le cadre des actions de réactivation de l'érosion latérale des terrains en bord de Loire. Pour limiter le transport, on suggère d'utiliser les blocs provenant du désenrochement du site de la boucle de Marclopt aval Montrond-les-Bains amont, volume estimé à 6000 m^3. La taille de ces blocs n'est pas connue à l'heure actuelle, elle sera supérieure à la classe LM5/40.

Fig. 79. Photographie du linéaire d'enrochements qui fera l'objet d'un désenrochement, Magneux-Haute-Rive (boucle de Marclopt aval), photographie ARTELIA, 4 février 2020

2.4.1.3. Matelas alluvial - zone de remplissage

Concernant le remblai en amont de la butée, le critère de Shields est considéré (valeur critique à 0.047). Ce critère permet de définir la contrainte limite de mise en mouvement des sédiments (initiation du charriage) pour des sédiments, en fonction du diamètre des matériaux et des conditions hydrauliques de l'écoulement :

$$D = \frac{\tau}{\tau_c{}^*} \times \frac{1}{(\rho_s - \rho)g}$$

Avec :

- D : diamètre des sédiments (en m)
- τ = contrainte hydraulique (N/m²)
- ρ_s masse volumique solide (kg/m³)
- ρ masse volumique liquide (kg/m³)
- $\tau_c{}^*$ nombre de Shields critique (0.047 dans notre cas).
- g accélération de la pesanteur (m/s²)

Une contrainte de 44.5 N/m² est obtenue pour la crue maximum indiquant des diamètres stables de l'ordre de 6 cm.

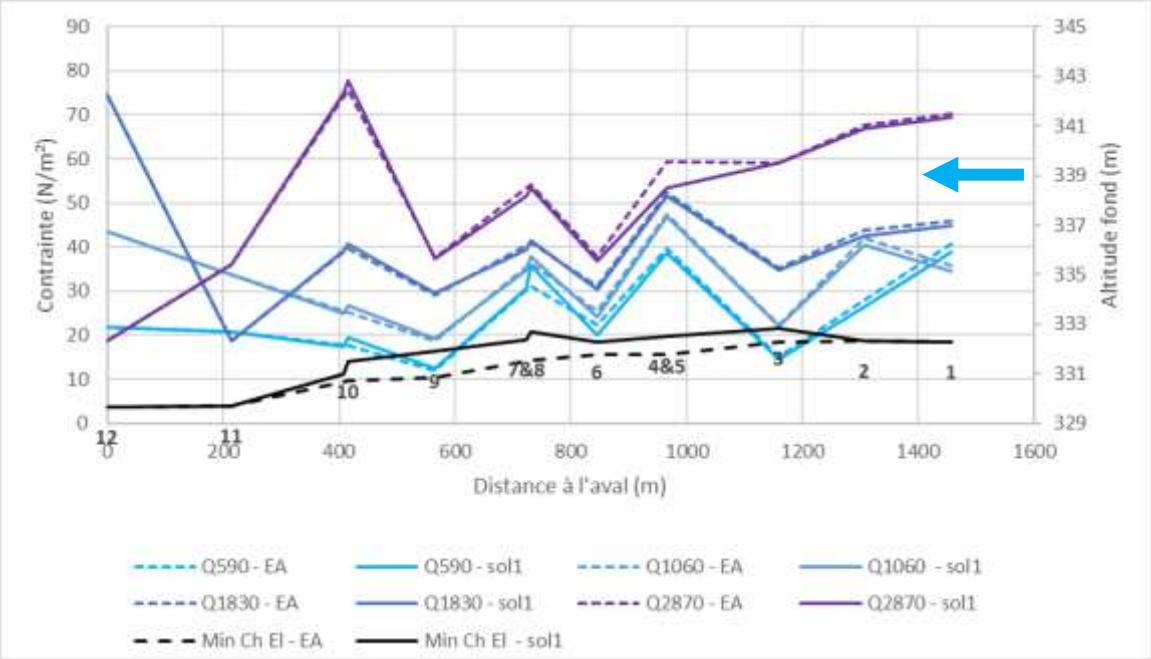


Fig. 80. Distribution des contraintes dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, sol 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 1. Modélisation en régime permanent pour des débits de 590 m³/s (temps de retour 2 ans), 1060 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1830 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 2870 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

Les matériaux les plus grossiers constituant les remblais doivent être placés préférentiellement en surface.

Sur l'ensemble du matelas alluvial, les matériaux les plus grossiers seront disposés en surface, de manière à constituer une couche de pavage stable, tandis que les matériaux plus fins seront disposés en profondeur.

Le volume estimatif basé sur les données topographiques disponibles (calcul de la surface de remblais sur chaque section appliquée sur la distance entre les sections) est de l'ordre de **14 000 m³**.

Concernant la provenance des matériaux, plusieurs sources sont identifiées :

- Décaissement de la berge à l'amont de la boucle de Marclopt proposé dans l' « Etude de réactivation de l'érosion des terrains en bord de Loire » (AVP 6), pour un volume estimé à 20 000 m³, dont on propose d'utiliser 6 450 m³.

  Deux jeux de données granulométriques sont disponibles : les mesures granulométriques issues de sondages en berge (cf. étude et rapport sur l'érosion latérale), et des mesures granulométriques de type « Wolmann » réalisée sur une partie basse de la berge ave une granulométrie grossière (J. Riquier).

La granulométrie issue des sondages est présentée ci-après. Ce sont des sables et cailloux, des fractions granulométriques qui peuvent être mobilisées en crue sur ce site.

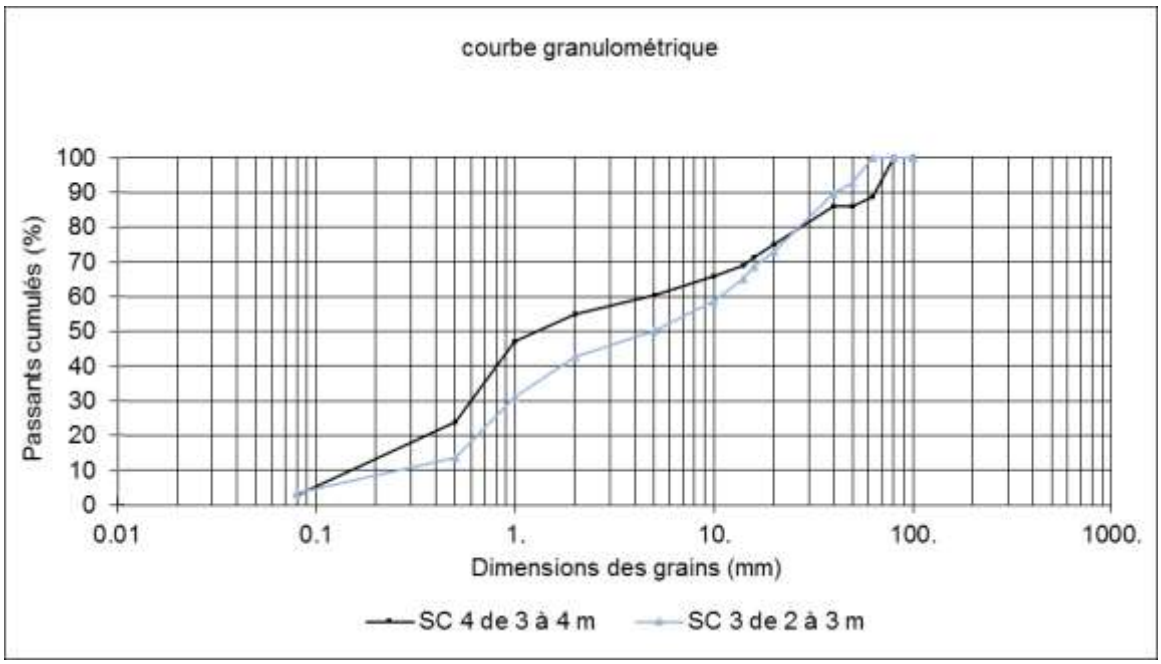


Fig. 81. Courbes granulométriques des alluvions présentes dans les sondages effectués à proximité du site de la boucle de Marclopt amont (commune de Chalain-le-Comtal)

Le diamètre médian (d50) est de 1 à 5 mm, c'est-à-dire du sable grossier au gravier fin. Le d90 est de 40 à 60 mm, correspondant à des cailloux grossiers. Le diamètre maximal observé est de l'ordre de 60 à 80 mm.

La granulométrie de type « Wolmann » est présentée ci-après.

Fig. 82. Courbes granulométriques de type « Wolmann » d'un secteur bas de la berge ai niveau du site d'érosion latérale de la boucle de Marclopt amont, réalisée par J. Riquier le 20/06/2020 (Université Jean Monet)

Ces mesures témoignent d'une granulométrie plus grossière allant des graviers fins aux graviers grossiers, avec un d50 de l'ordre de 3 cm et un d90 de l'ordre de 8 cm.

- Complément de matériaux de gravières, avec une granulométrie de type galets (4.5 – 15 cm), pour un volume de 4 400 m³. Ces matériaux plus grossiers seront disposés préférentiellement en surface.

2.4.2. Résultats attendus et impacts

2.4.2.1. Résultats attendus et impacts morphologiques

Cet aménagement protégera les marnes situées au niveau du remblai directement après les travaux (profils 7-8 à profil 10). Le seuil de marne situé au niveau du profil 8 sera protégé par la butée située au niveau de ce profil. Les marnes situées en amont des profils 7 (butée chenal rive gauche) et 8 (butée chenal rive droite) seront moins exposées hydrauliquement directement après les travaux, et seront réellement protégées par un matelas alluvial après remplissage naturel de la butée. Le remplissage de la butée amont dépendra des apports solides et de l'hydrologie, ainsi que de l'efficacité du piégeage des matériaux par la butée. La pérennité du matelas alluvial dépendra lui aussi de l'hydrologie. La charge solide pourra potentiellement passer à travers la butée pour les granulométries fines ou lors de crues importantes.

Le remblai de l'aménagement est dimensionné pour des crues de temps de retour 10 à 50 ans. Il est probable qu'il soit fortement endommagé lors de passage de crues plus exceptionnelles.

Pendant le remplissage, la butée amont présentera un obstacle temporaire au transport sédimentaire, son rôle étant de piéger les matériaux venant de l'amont. Le volume de sédiments piégés est difficile à évaluer en l'état des connaissances : on connait mal la capacité de piégeage de la butée, et on ne connaît pas non plus a priori la pente d'ajustement des matériaux piégés. Ces deux paramètres sont par ailleurs fortement dépendant de la granulométrie de la charge sédimentaire en transit (mal connue).

En première estimation, on peut envisager un matelas d'une hauteur moyenne de 30 cm entre les profils PT7-8 et PT3, ce qui correspond à un volume de 12 500 m³ environ. Ce volume correspond à 2 à 3 ans du transport résiduel annuel estimé à 5000 m³/an, mais en réalité très mal connu. Ainsi, il est possible que la butée amont soit un obstacle à la continuité sédimentaire sur une durée de l'ordre de quelques années, mais qui est fortement dépendant de l'hydrologie : la butée pourrait être remplie au cours de quelques crues morphogènes, et inversement, elle pourrait aussi ne pas se remplir pendant plusieurs années en l'absence de crue et d'apports solides amont significatifs. Les travaux d'arasement de bancs et de réactivation de l'érosion latérale situés en amont de ce site pourront contribuer à alimenter ce secteur en matériaux et accélérer la formation du matelas alluvial. Une fois le matelas constitué, cette butée n'aura plus d'incidence sur le transport sédimentaire.

La butée aval ne présentera pas de barrière au transport sédimentaire, dans la mesure où un matelas alluvial sera constitué au moment des travaux. Ainsi, cette butée ne piègera pas les matériaux venant de l'amont.

On s'attend néanmoins à un ajustement topographique et granulométrique du matelas alluvial.

La figure suivante présente les contraintes de cisaillement modélisées dans le tronçon concerné par l'expérimentation, dans l'état actuel et dans l'état projet, pour différentes crues. Les contraintes de cisaillement sont les contraintes hydrauliques exercées par l'écoulement sur le fond du lit du cours d'eau, qui entrainent les matériaux du lit.

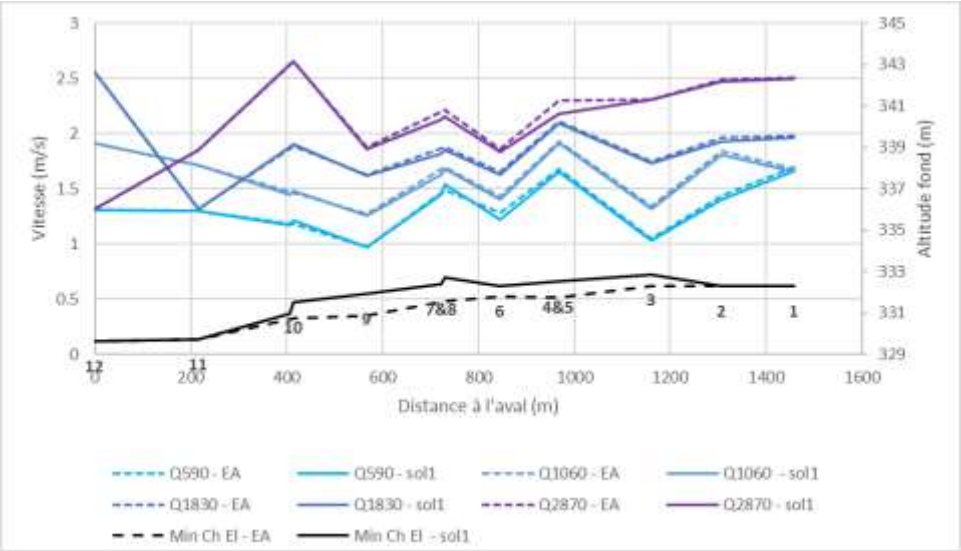


Fig. 83. Distribution des vitesses dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, sol 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 1. Modélisation en régime permanent pour des débits de 590 m³/s (temps de retour 2 ans), 1060 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1830 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 2870 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

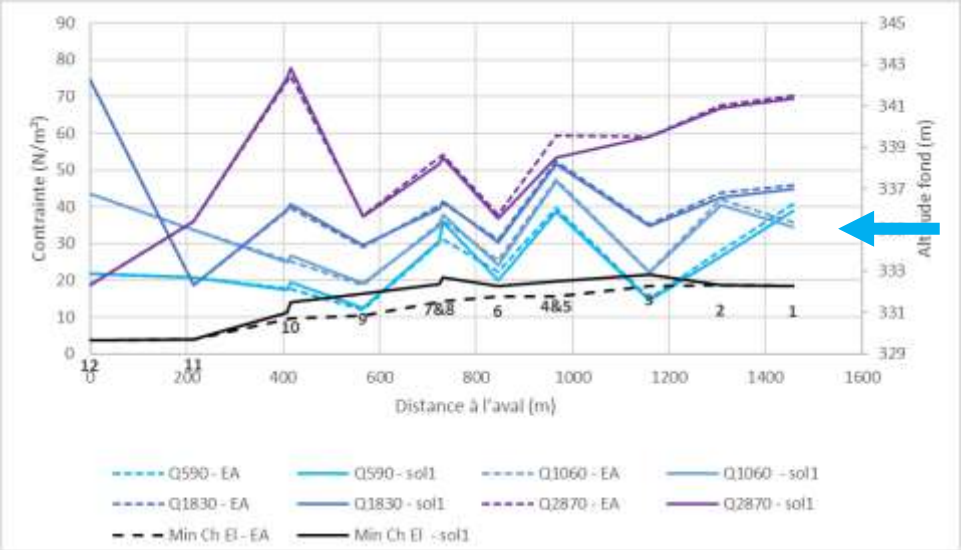


Fig. 84. Distribution des contraintes dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, sol 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 1. Modélisation en régime permanent pour des débits de 590 m³/s (temps de retour 2 ans), 1060 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1830 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 2870 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

Sur ce graphique, l'amont est à droite. Le modèle numérique 1D utilisé nous renseigne sur les contraintes présentes dans le chenal principal, côté rive gauche. On voit que les contraintes maximales prennent place au niveau des profils 4 et 5 pour les débits inférieurs à 1830 m³/s, et au

niveau du profil 10 pour une crue plus importante. L'expérimentation ne modifie que très marginalement ces contraintes, sauf pour les profils 4 & 5 au cours d'une crue cinquantennale. Elles atteignent au maximum 80 N/m², et sont généralement situées sous 50 N/m², ce qui est beaucoup plus faible que dans le cas du site de Craintilleux.

Il est probable que le matelas évolue au cours des premières crues, avec un ajustement topographique et granulométrique. On ne s'attend cependant pas à ce que ce réajustement soit de très grande ampleur.

L'état des connaissances sur la mobilité sédimentaire et l'outil de modélisation 1D utilisé pour le dimensionnement de cet AVP sont intrinsèquement associés à des incertitudes importantes. Le maintien du matelas alluvial dans le temps sur l'ensemble du linéaire, en particulier lors de crues extrêmes, reste incertain. Les sédiments les plus grossiers disposés en surface (couche sédimentaire appelée « armure ») auront une action de protection des matériaux plus fins. En cas de déstabilisation de cette couche de surface, par exemple au cours d'une forte crue, il est possible que l'ensemble du matelas soit rapidement déstabilisé. Ce matelas se reconstituera sans doute dans le temps. La dynamique de remplissage du matelas est mal connue à l'heure actuelle et sera fortement dépendante de la dynamique sédimentaire et du transport solide effectif dans la Loire au cours des années à venir.

2.4.2.2. Résultats attendus et impacts hydrauliques et hydrogéologiques

Le rehaussement de la ligne d'eau lié à l'aménagement est présenté sur la figure ci-après pour différents débits de crue, d'après la modélisation numérique.

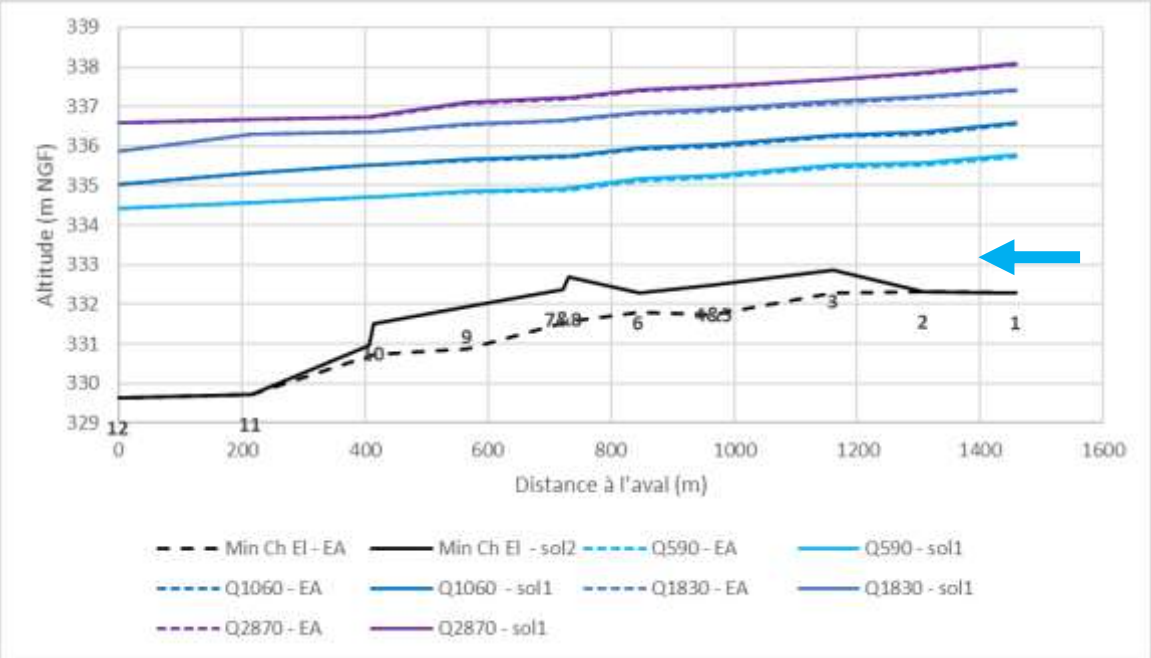


Fig. 85. Lignes d'eau actuelles et dans l'état projet dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Sol 2 = état projet pour le Scénario de l'AVP 2. Modélisation en régime permanent pour des débits de 590 m³/s (temps de retour 2 ans), 1060 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 18300 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 2870 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

En complément, le tableau suivant présente les différences de hauteur d'eau entre l'état projet et l'état actuel pour ces quatre débits.

Tabl. 4 - Différence de hauteur d'eau entre l'état actuel et l'état projet (AVP1), en m (les nombres positifs indiquent une rehausse de la ligne d'eau à l'état projet par rapport à l'état actuel)

	Q590	Q1060	Q1830	Q2870
PT1	0.04	0.03	0.03	0.01
PT2	0.05	0.04	0.03	0.02
PT3	0.06	0.04	0.04	0.02
PT4&5	0.06	0.05	0.04	0.04
PT6	0.07	0.04	0.04	0.04
PT7&8	0.03	0.02	0.02	0.02
PT9	0.02	0.02	0.02	0.02
PT10	0	0	0	0.01
PT11	0	0	0	0
PT12	0	0	0	0

La rehausse maximale modélisée est de 7 cm au niveau du profil 6 pour un débit de 590 m^3/s. En amont du modèle, la rehausse est de 4 cm au plus. En aval du profil P10, la ligne d'eau est inchangée.

Le rehaussement de la ligne d'eau est d'autant moins marqué que le débit est important. Pour la crue cinquantennale, les lignes d'eau sont rehaussées de 4 cm au plus.

La figure ci-après présente le rehaussement de la ligne d'eau pour des débits plus faibles, en lien avec l'alimentation de la frayère.

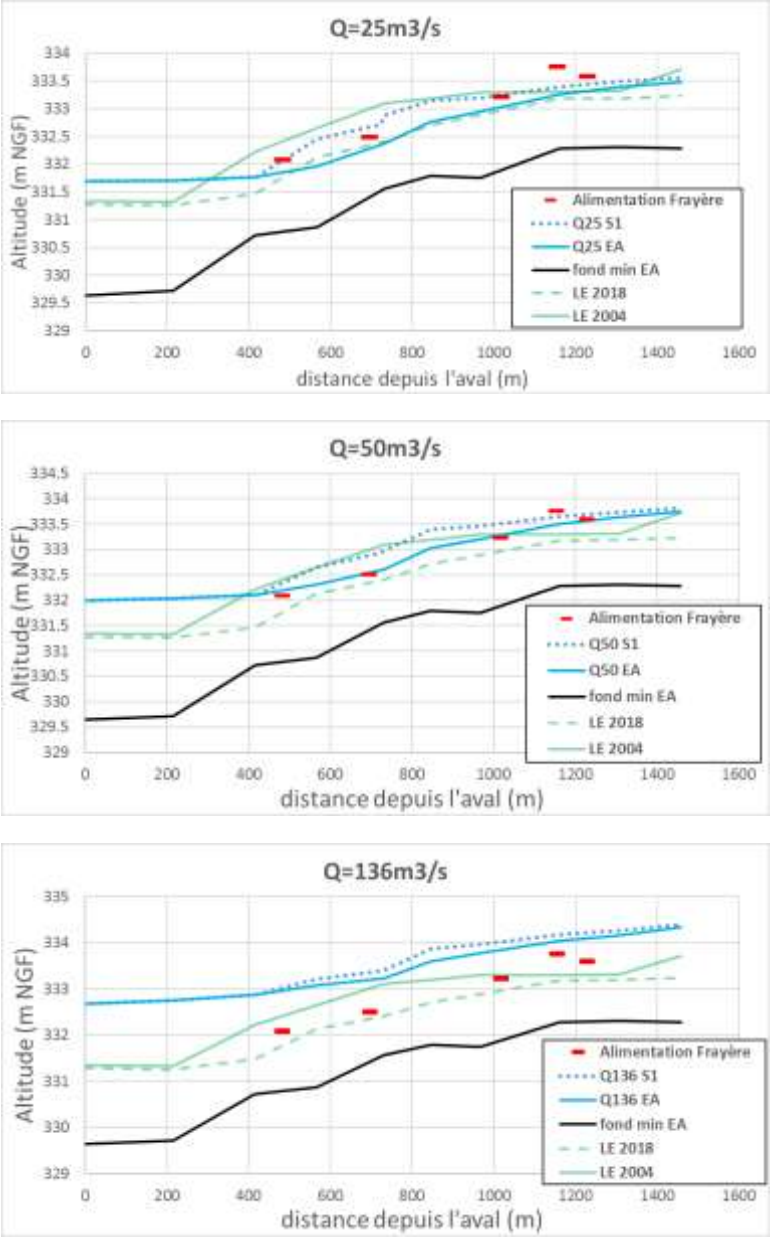


Fig. 86. Lignes d'eau actuelles et dans l'état projet dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, S1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 1. Modélisation en régime permanent pour des débits de 25 m³/s, 50 m³/s, et 136 m³/s. LE 2018 : ligne d'eau relevée par FNE Loire en 2018, LE 2004 : ligne d'eau relevée par l'EMSE en 2004. Les points d'alimentation de la frayère ont été déterminés visuellement à partir des photographies aériennes.

Ces résultats permettent de voir que l'état projet améliore considérablement les conditions d'alimentation de la frayère par rapport à l'état actuel, bien que ce matelas alluvial ne permette pas de rattraper les conditions présentes en 2004. D'après ces résultats, en prenant en compte les incertitudes de la modélisation, la frayère devrait être en eau pour un débit de 50 m³/s, alors qu'à

l'heure actuelle ces conditions sont très limite. Pour un débit de 136 m3/s, la frayère est en eau sans ambiguïté dans l'état actuel comme dans l'état projet.

Cette rehausse des lignes d'eau à l'étiage devrait aussi améliorer les conditions d'alimentation des annexes hydrauliques par la nappe d'accompagnement, bien que ce processus soit probablement très local.

2.4.2.3. Résultats attendus et impacts environnementaux

2.4.2.3.1. Impact du projet

Concrètement l'opération de reconstitution d'un matelas alluvial, en permettant l'accumulation de sédiments, va permettre le développement d'une zone hyporhéique qui correspond à l'ensemble des sédiments saturés en eau, situés au-dessous et à côtés d'un cours d'eau, contenant une certaine quantité d'eau de surface.

D'un point de vu de la diversité biologique, la présence de sédiments sert de frayères à certaines espèces de poissons, comme la truite (présente sur le secteur d'étude) et les poissons juvéniles se développent dans les interstices. La conception des seuils intègre la franchissabilité piscicole. Ainsi les aménagements ne constitueront pas un obstacle à la continuité écologique. La mise en place de seuils est favorable au maintien d'un niveau d'eau plus haut et donc d'une mise en eau plus efficace des annexes hydrauliques situées à proximité servant de frayères pour le brochet. La zone hyporhéique est également colonisée par de nombreux micro-organismes.

La zone hyporhéique permet de réguler la température de l'eau en isolant une partie des écoulements. Ainsi les écoulements circulant à travers les granulats du lit ont une température moins élevée. Ce phénomène de régulation a une importance pour la vie aquatique notamment en été, en période de basses eaux.

Le développement d'une zone hyporhéique aurait également une incidence positive sur l'autoépuration de l'eau en constituant une zone de stockage des nutriments et associé à une activité métabolique grâce aux micro-organismes. La zone hyporhéique agit comme un filtre physique et biologique L'autoépuration est optimale avec une granulométrie intermédiaire (qui favorise un équilibre entre le temps de transite suffisamment long et un brassage des eaux évitant l'accumulation de certains composés ou avec une micro-hétérogénéité suffisante pour garantir la présence de zones oxygénées et de zones anoxiques.

La création d'un seuil peut cependant engendrer un risque de dépôt de fines et de colmatage du fond défavorable à la vie aquatique.

L'impact sur les habitats naturels des berges est faible en raison d'une emprise limitée. L'impact sur les berges est essentiellement lié à la phase travaux pour l'accès au lit mineur.

L'incidence de la reconstitution d'un matelas alluvial est donc largement positive sur le plan environnemental. Les effets seront effectifs sur les emprises spatiales sur lesquelles le matelas va se mettre en place. Ils seront donc immédiats pour la butée aval. Les effets positifs seront progressifs au niveau des butées amonts en fonction du remplissage naturel. La butée aval permettra également de favoriser la mise en eau de l'annexe en rive gauche qui constitue une frayère à Brochet historique entretenue par l'Ecopôle.

2.4.2.3.2. Impact des travaux

Les principaux impacts potentiels en phase travaux sont :

- L'utilisation et/ou la création d'accès (dérangement des populations d'espèces faunistiques, destruction éventuelle d'individus, dégradation temporaire des habitats de la berge) ;

- Le dérangement et la destruction éventuelle de la faune piscicole ;
- La dégradation temporaire du lit en eau et des habitats aquatiques lors des différents aménagements (création des batardeaux, dépôts de matériaux, circulation des engins…). La phase de travaux dans le lit en eau peut être à l'origine d'un relargage de matière en suspension. Dans les zones ou la marne est affleurante l'impact sera plus limité en raison de l'absence de sédiments.

2.4.3. Modalités de réalisation des travaux

2.4.3.1. Déroulement des travaux

Les travaux seront réalisés en période d'étiage pour limiter les impacts sur l'environnement et éviter les risques de crue pour le chantier. La zone de travaux est isolée des écoulements de la Loire par la mise en place d'une merlon/batardeau de chantier.

(1) Quatre pistes d'accès (deux sur chaque rives) sont premièrement réalisées. A noter que les pistes en rive droite cheminent dans des parcelles privées.

(2) Deux batardeaux constitués de matériaux alluviaux et blocs permettant d'isoler la rive droite et le chenal secondaire en rive droite sont ensuite créés. Ceux-ci permettent la construction de la partie en rive droite des butées en amont et aval et le remplissage entre butées. Le batardeau en aval fait environs 2.8 m de haut, 3 m en crête et 15 m en pied sur 250 m linéaires, ce qui représente un volume de l'ordre de 6 300 m^3 de matériaux. Il permet le passage d'un débit de l'ordre de 100 m^3/s. Le batardeau en amont dans le chenal secondaire fait environs 1.8 m de haut, 3 m en crête et 15 m en pied sur 65 m linéaires, ce qui représente un volume de l'ordre de 1 000 m^3 de matériaux. Il permet également le passage d'un débit de l'ordre de 100m^3/s. Cette capacité est suffisante pour supporter les éclusés quotidiens réalisés par EDF (80 m3/S au maximum).

(3) Une fois les butées et le remplissage achevés sur la demi largeur rive droite et dans le chenal secondaire en rive droite, la partie aval du batardeau aval est basculée en rive gauche tandis que le batardeau sur le chenal secondaire est transféré en rive gauche (3.3 m de haut sur 65 m linéaire soit 1 500 m^3) pour mettre à sec la rive gauche de la Loire. L'écoulement est alors en rive droite et la construction des butées et du remblai peuvent avoir lieu à sec.

(4) Une fois cette étape achevée, le batardeau est enlevé en terminant de combler la zone à remblayer et le reliquat est évacué.

(5) Pour finir, les pistes d'accès sont enlevées et les emprises remises en état

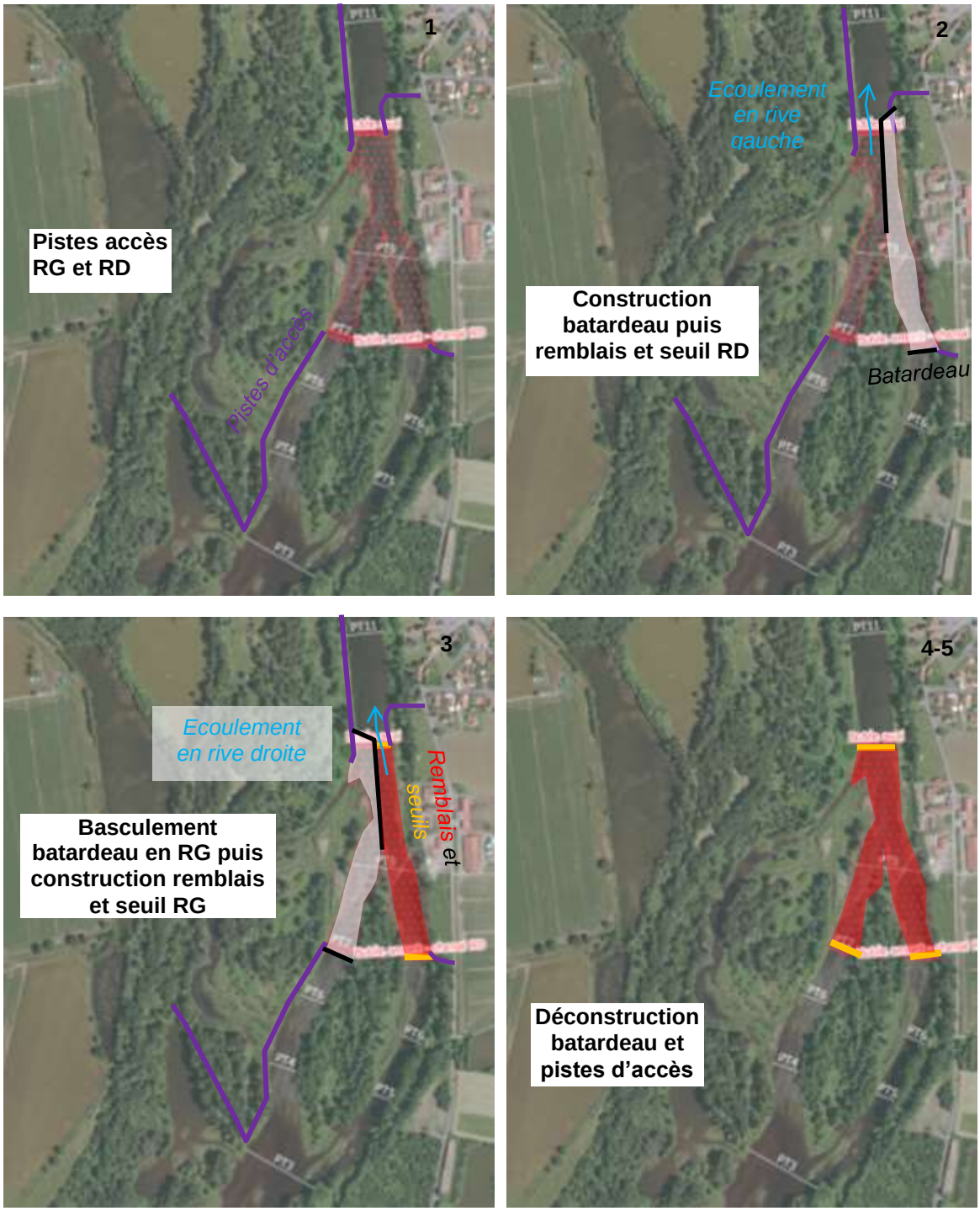


Fig. 87. Déroulement des travaux

2.4.3.2. Accès et piste de chantier

Deux pistes et rampe d'accès sont réalisées sur chaque rives, soit quatre pistes en tout (voir ci-dessus).

En ive gauche, les parcelles concernées par ces pistes appartiennent au FNE Loire.

En rive droite, les parcelles concernées sont les parcelles A75 et A660 (piste amont) et A658 (piste aval), dont le propriétaire n'est pas connu à ce stade.

Lors de la mise en place des batardeaux et du tapis de blocs, la portance de la marne peut amener à des difficultés de chantier, en fonction de sa portance. Il sera préférable de procéder à une reconnaissance complémentaire afin de s'en assurer.

2.4.3.3. Prise en compte des enjeux environnementaux

Aux vues des enjeux écologiques identifiés, les préconisations suivantes permettront de réduire les impacts environnementaux de la phase travaux :

- Période d'intervention adaptée à la faune piscicole (août à octobre). Cette période limitera également en partie les impacts sur la faune et la flore des berges lors de la création des accès.
- Gestion des plantes exotiques envahissantes. De nombreuses espèces exotiques sont présentes au niveau des berges et des milieux terrestres (Renouée, Balsamine de l'Himalaya, Séneçon du Cap, Ambroisie à feuilles d'armoise…) mais également dans le milieu aquatique (Elodée)
- Mesures de réduction intégrées aux phases de chantier (suivi environnemental du chantier, balisage préalable de l'emprise de la zone de travaux…)
- La réalisation du batardeau se fera d'amont vers l'aval. Lors de la mise en place du batardeau, des MES (matières en suspension) seront relarguées. Cette situation est difficilement évitable. Une pêche de sauvegarde sera mise en œuvre afin de minimiser l'impact sur la faune aquatique. Une fois le batardeau achevé, un écoulement dans l'enceinte du batardeau est toujours possible (percolation à travers les matériaux imperméables). Avant rejet au lit mineur en dehors de l'enceinte du batardeau, les eaux seront décantés au travers de barrages de matériaux de type gravette. Suivant les demandes spécifiques des services de l'état un suivi peut être réalisé pendant les travaux de mise en place des batardeaux. Si la situation hydraulique au moment semble trop critique vis-à-vis de la préservation des espèces, les travaux peuvent être stoppés momentanément.

2.4.3.4. Calendrier et phasage

Etant donné les enjeux environnementaux (période pour la faune propice de septembre à novembre) et les contraintes liées à l'hydrologie (crues en courantes novembre), la période de travaux la plus propice est la période aout-septembre.

On présente ci-après un calendrier prévisionnel de la réalisation des travaux.

Phase	Aout				Septembre			
Création accès - apport matériel - installation travaux								
Construction batardeaux depuis RD								
Construction encrages et butées - RD								
Remblais - RD								
Bascule batardeau pour RG								
Construction batardeau depuis RG								
Construction encrages et butées aval - RG								
Déconstruction batardeau et fin de chantier								

2.4.4. Estimation des coûts

Le chiffrage est effectué sur la base de l'expérience du bureau d'étude en maîtrise d'œuvre de travaux similaires.

Désignation de la nature des travaux	unité	Quantité	Prix unitaire HT (€)	Montant HT (€)
Etudes préliminaires				***35 000 €***
Mesures topographiques complémentaires	F	1	10 000 €	15 000 €
Investigations géotechniques	F	1	8 000 €	8 000 €
Etude projet	F	1	12 000 €	12 000 €
Maîtrise d'œuvre	F	1	26 906.90 €	***26 907 €***
Installation chantier/frais généraux/divers	F	1	29 247 €	***29 247 €***
Batardeaux chantier (RG et RD)	F	1	68 450 €	***68 450 €***
Pêche électrique	F	1	2 500 €	2 500 €
Remblais apport et mise en batardeau, pour phasage 1	m^3	7300	5 €	36 500 €
Reprise et mise en remblai des déblais (batardeau) pour phasage 2	m^3	1200	1 €	1 200 €
Remblais apport et mise en batardeau, pour phasage 2	m^3	1500	5 €	7 500 €
Régalage sur site des déblais de rivière -batardeau aval	m^3	3150	2 €	6 300 €
Evacuation du reliquat	m^3	5650	3 €	16 950 €
Travaux préparatoires				***6 700 €***
Débroussaillage	m^2	2850	2 €	5 700 €
Déboisement	u	10	100 €	1 000 €
Remblais				***46 188 €***
Remblais 1 en grande masse - Loire 7.5km	m^3	6450	4 €	24 188 €
Remblais 1 en grande masse grossiers - gravières	m^3	4400	5 €	22 000 €
Enrochements				***56 000 €***
Amenée et pose des enrochements sur les seuils	m^3	700	80 €	56 000 €
Reprise berges				***1 800 €***
Reprofilage berges 1/1	ml	300	6 €	1 800 €
Voirie				***15 840 €***
Piste circulation engins : fourniture et mise en œuvre des matériaux	ml	880	18 €	15 840 €
			Sous-total HT	**286 131 €**
			Imprévus (20%)	57 226 €
			Total HT	**343 357 €**

Note : le prix des matériaux issus des gravières ou carrière est fortement dépendant des fluctuations du marché local.

2.4.5. Etudes complémentaires

Les études suivantes (AVP / Projet) devront inclure les points suivants (~25 000 €).

- Afin d'affiner le chiffrage des travaux un levé topographique sera nécessaire à la réalisation des étapes suivantes. La butée fera l'objet d'un relevé au 1/100 sur son emprise, afin de réaliser des profils en travers précis. La zone de remplissage entre butée fera l'objet d'un relevé au 1/500,
- Faire un essai pour vérifier la portance de la marne vis-à-vis de la circulation des engins de chantier :

- Soit par la réalisation de sondages à la pelle depuis la berge pour, de visu, attester de la compacité ou non de la marne
- Soit réaliser des sondages carottés en haut de berge et prélever à la hauteur correspondant à la marne un échantillon intact pour essai labo de compacité.

2.4.6. Approche réglementaire

Les démarches administratives à réalisation du projet sont présentées ci-après. La réalisation du projet nécessitera un dossier d'autorisation au titre de la loi sur l'eau. Un dossier de Demande d'Autorisation Environnementale devra donc être établi.

La nécessité d'une étude d'impact (évaluation environnementale) n'est pas à écarter étant donné la nature des travaux, mais reste à l'appréciation de l'administration. Dans ce sens un travail de concertation et d'échange en amont paraît indispensable afin de bien cadrer le contexte réglementaire du projet, notamment vis-à-vis de la nécessité de réaliser un dossier de dérogation espèces protégées. Une étude naturaliste complémentaire sera nécessaire pour la réalisation des dossiers règlementaires à adapter au site et selon le cadrage avec la DREAL. En effet des un diagnostic actualisé intégrant les données de FNE (Ecopôle) sera nécessaire.

Nomenclature IOTA	Demande d'Autorisation au titre de Rubrique 3.1.2.0 : Modification du profil en long et en travers sur une longueur supérieur à 100 m. Rubrique 3.1.1.0 Installations, ouvrages, remblais et épis, dans le lit mineur d'un cours d'eau Possible concernant la rubrique 3.1.5.0 : Destruction de frayères, sur une surface de plus de 200m²
Evaluation environnementale	Examen au cas par cas au titre de Catégorie 10. Canalisation et régularisation des cours d'eau
Evaluation des incidences Natura 2000	Oui Site Natura 2000 directive habitats (ZSC) : Milieux alluviaux et aquatiques de la Loire - FR8201765 Site Natura 2000 directive oiseaux (ZPS) : Plaine du Forez FR8212024
Dérogation espèces protégées	Possible présence d'espèces avec un statut de protection sur les berges, potentiellement impactées lors de la phase travaux Nécessite un cadrage avec la DREAL
Demande de défrichement	Non

2.5. AVP 2 – SIMPLE BUTEE

2.5.1. Présentation de l'aménagement

2.5.1.1. Principe

Une butée en enrochement est disposée à l'aval du seuil de marnes. Cette butée est ancrée dans les marnes. Elle reprend le principe généra décrit au 2.2 Choix des scenarios d'aménagement.Choix des scenarios d'aménagement

Cette butée présente les caractéristiques suivantes :

- Hauteur par rapport au fond moyen de 50 cm,
- Crête de 65 m de large berge à berge,

- Pente du parement aval de 4%, avec une forte rugosité afin d'assurer des conditions favorables à la franchissabilité piscicole.

La butée permet de rattraper l'incision récente du seuil de marnes et permet également l'alimentation de la frayère à brochets.

La butée est remplie de matériaux. On dispose des matériaux de toute taille pour remplir la butée, et des matériaux plus grossiers en surface pour constituer le pavage. La pente de cette zone de remplissage est de l'ordre de 1.7‰.

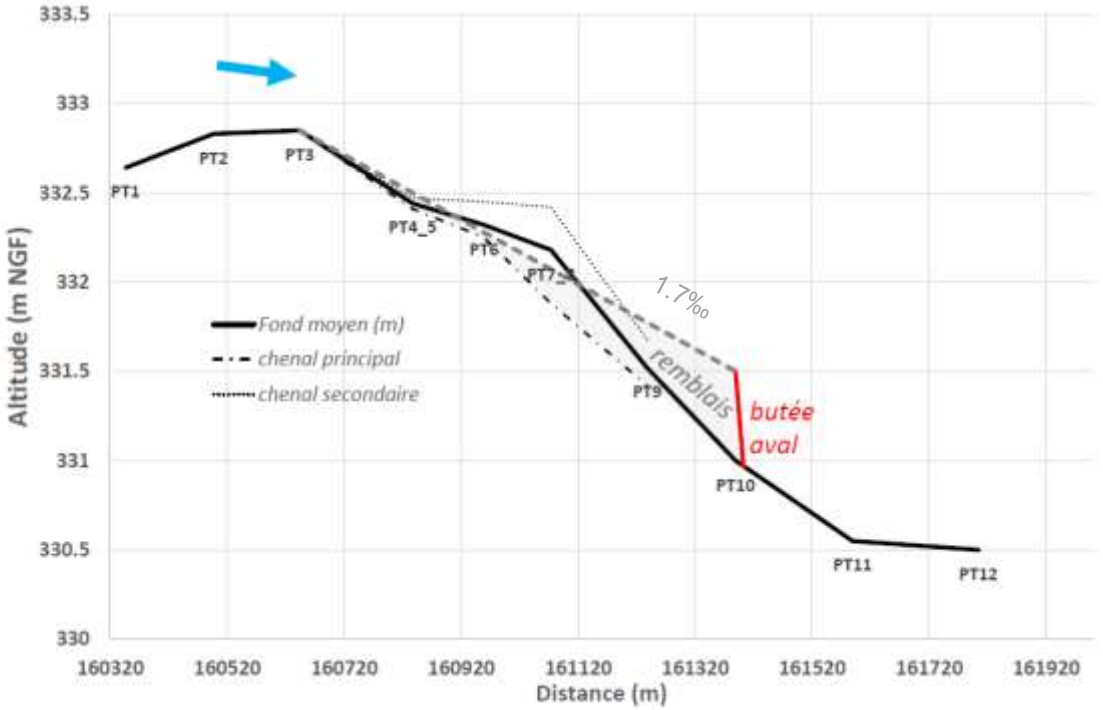


Fig. 88. Schéma sur le profil en long

Fig. 89. Vue en plan de l'aménagement (simple butée)

2.5.1.2. Butée

La crête de la butée est positionnée au droit profil n° n°10, 50cm au-dessus de la cote moyenne :

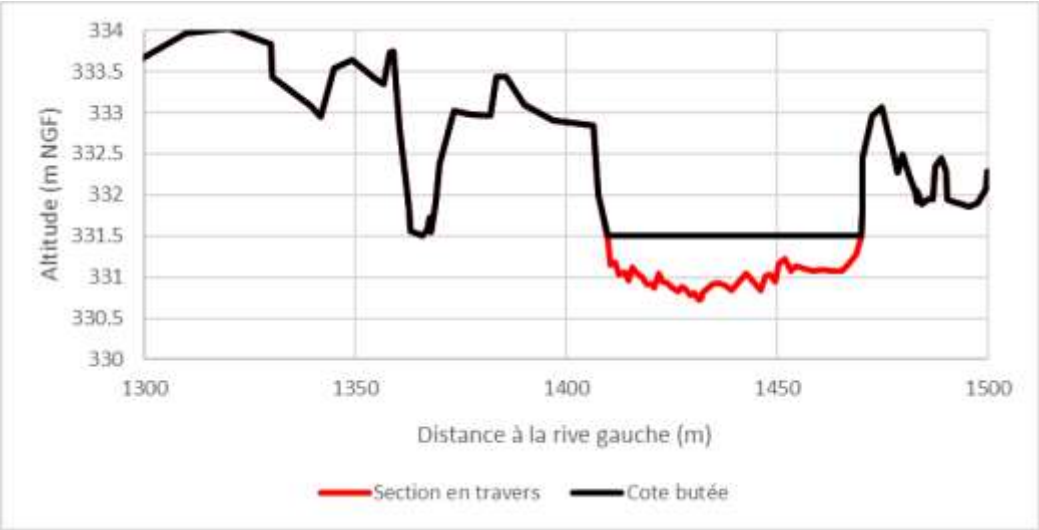


Fig. 90. Coupe en travers de la butée

A l'aide des niveaux et vitesses issues du modèle hydraulique 1D, les blocs constituant la butée sont dimensionnés.

Des vitesses maximums de 2.65 m/s sont obtenues par la modélisation hydraulique (Q_{Loire}=2870 m³/s, temps de retour 50 ans) dans le lit mineur au droit de la butée.

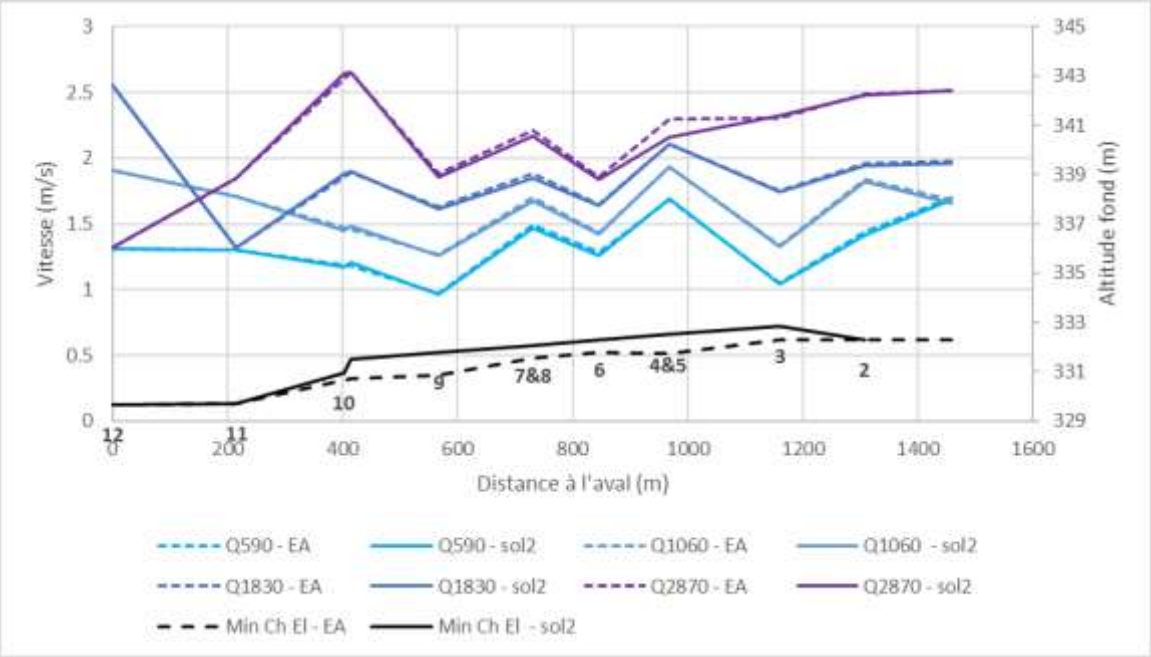


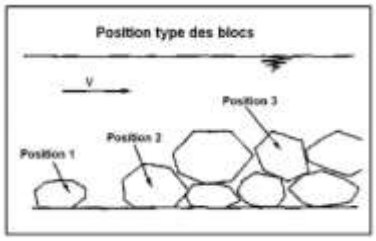
Fig. 91. Distribution des vitesses dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, sol 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 2. Modélisation en régime permanent pour des débits de 590 m³/s (temps de retour 2 ans), 1060 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1830 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 2870 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

L'approche du dimensionnement des blocs constituants la butée est étudiée suivant la méthode d'Isbach :

$$D_{50} = \frac{V^2}{m^2.2g.\Delta d}$$

Avec :

- D_{50} : blocs moyen (en m)
- V= vitesse dans la section contractée
- m= coefficient fonction de la place du bloc dans la protection. Pour notre cas m=1.2 (position 2)



- g= accélération gravitationnelle (9.81m/s^{-2})
- Δd= densité déjaugée de l'enrochement (1.6 à 1.85)

En utilisant le critère d'Isbach pour des blocs en extrémité de carapace (position 2) on obtient des diamètres de blocs stables de 16 cm pour la butée.

En conclusion :

La classe d'enrochement **LM5/40** (blocs compris entre 15 et 31cm) est retenue pour constituer la butée, une blocométrie qui devrait permettre d'assurer la pérennité de la structure dans le temps.

Afin d'assurer la stabilité des blocs du parement aval, un ancrage sur l'aval par un décaissement « à minima » dans la marne est proposé pour prévenir le départ des blocs. A noter que sans cet ancrage, les blocs risquent de rouler vers l'aval déstructurant ainsi l'ensemble de la structure. La mise en place d'un sabot dans la marne permettra d'assurer la stabilité de l'ouvrage. L'épaisseur d'ancrage étant limitée, les blocs pourront être « enfoncés » à l'aide des pelles mécaniques pour augmenter leur imbrication.

La butée a une largeur de berge à berge de 65 m, ce qui correspond à 460 m^3 d'enrochements au total.

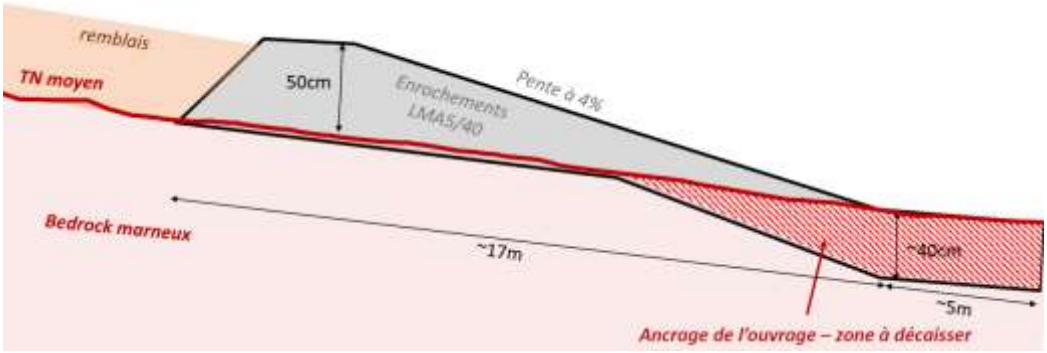


Fig. 92. Butée et matelas alluvial, schéma de principe

Concernant la provenance de ces blocs, une combinaison de deux sources de matériaux est à envisager :

- Utilisation de blocs provenant des opérations de désenrochement prévues dans le cadre des actions de réactivation de l'érosion latérale des terrains en bord de Loire. Pour limiter le

transport, on suggère d'utiliser les blocs provenant du désenrochement du site de la boucle de Marclopt aval Montrond-les-Bains amont, volume estimé à 6000 m³. La taille de ces blocs n'est pas connue à l'heure actuelle, elle sera supérieure à la classe LM5/40.

Fig. 93. Photographie du linéaire d'enrochements qui fera l'objet d'un désenrochement, Magneux-Haute-Rive (boucle de Marclopt aval), photographie ARTELIA, 4 février 2020

- En complément, la fraction la plus grossière des matériaux (diamètres > 15 cm) issus d'autres opérations de restauration pourra être utilisée. Ces sources sont plus précisément identifiées dans la partie suivante : ces matériaux seront en effet principalement utilisés pour le remblai, Le diamètre médian (d50) est de 1 à 5 mm, le d90 est de 40 à 60 mm. La fraction des particules sédimentaires de taille supérieures à 15 cm sera ainsi probablement assez faible.

2.5.1.3. Matelas alluvial - zone de remplissage

Concernant le remblai en amont de la butée, le critère de Shields est considéré (valeur critique à 0.047). Ce critère permet de définir la contrainte limite de mise en mouvement des sédiments (initiation du charriage) pour des sédiments, en fonction du diamètre des matériaux et des conditions hydrauliques de l'écoulement :

$$D = \frac{\tau}{\tau_c{}^*} \times \frac{1}{(\rho_s - \rho)g}$$

Avec :

- D : diamètre des sédiments (en m)
- τ = contrainte hydraulique (N/m²)
- ρ_s masse volumique solide (kg/m³)
- ρ masse volumique liquide (kg/m³)

- τ_c^* nombre de Shields critique (0.047 dans notre cas).
- g accélération de la pesanteur (m/s²)

Une contrainte de 53 N/m² est obtenue pour la crue maximum indiquant des diamètres stables de l'ordre de **7cm**.

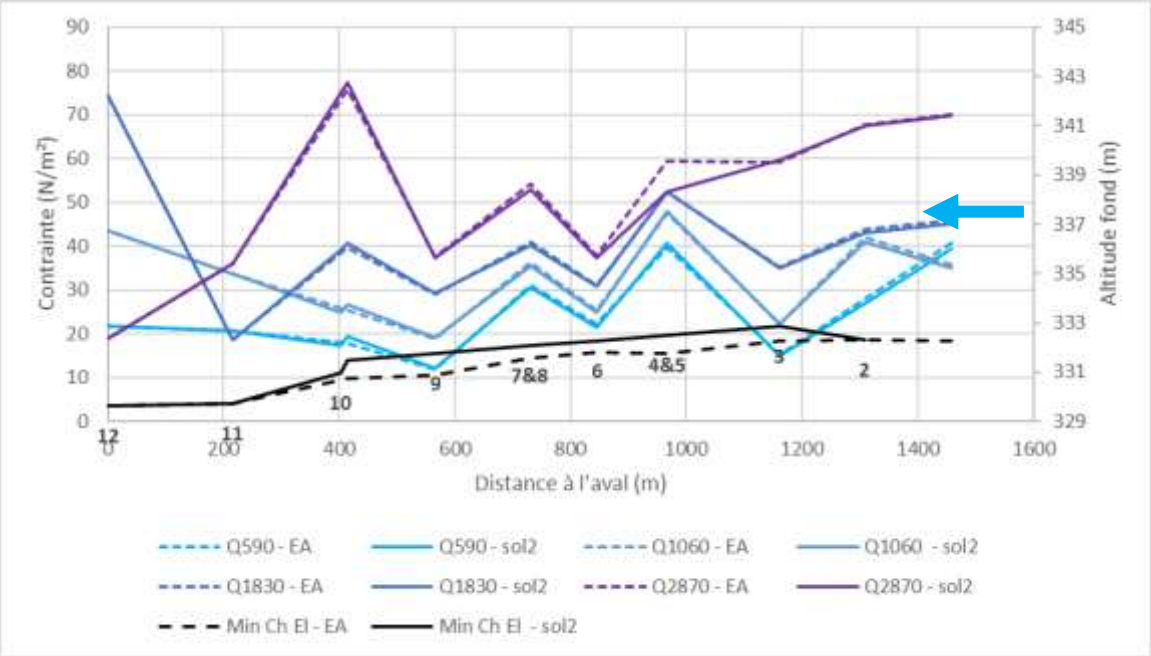


Fig. 94. Distribution des contraintes dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, sol 2 = état projet pour le Scénario de l'AVP 2. Modélisation en régime permanent pour des débits de 590 m³/s (temps de retour 2 ans), 1060 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1830 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 2870 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

Les matériaux les plus grossiers constituant les remblais doivent être placés préférentiellement en surface.

Sur l'ensemble du matelas alluvial, les matériaux les plus grossiers seront disposés en surface, afin de constituer une couche de pavage de surface, tandis que les matériaux plus fins seront disposés en profondeur.

Le volume estimatif basé sur les données topographiques disponibles (calcul de la surface de remblais sur chaque section appliquée sur la distance entre les sections) est de l'ordre de **12 300 m³**.

Concernant la provenance des matériaux, plusieurs sources sont identifiées :

- Décaissement de la berge à l'amont de la boucle de Marclopt proposé dans l' « Etude de réactivation de l'érosion des terrains en bord de Loire » (AVP 6), pour un volume estimé à 20 000 m3. La granulométrie de ces matériaux est présentée ci-après : ce sont des sables et cailloux, des fractions granulométriques qui peuvent être mobilisées en crue sur ce site. On propose d'utiliser 5000 m³ (couche de subsurface) de matériaux provenant de cette source.

Deux jeux de données granulométriques sont disponibles : les mesures granulométriques issues de sondages en berge (cf. étude et rapport sur l'érosion latérale), et des mesures granulométrique de type « Wolmann » réalisée sur une partie basse de la berge ave une granulométrie grossière (J. Riquier).

La granulométrie issue des sondages est présentée ci-après. Ce sont des sables et cailloux, des fractions granulométriques qui peuvent être mobilisées en crue sur ce site.

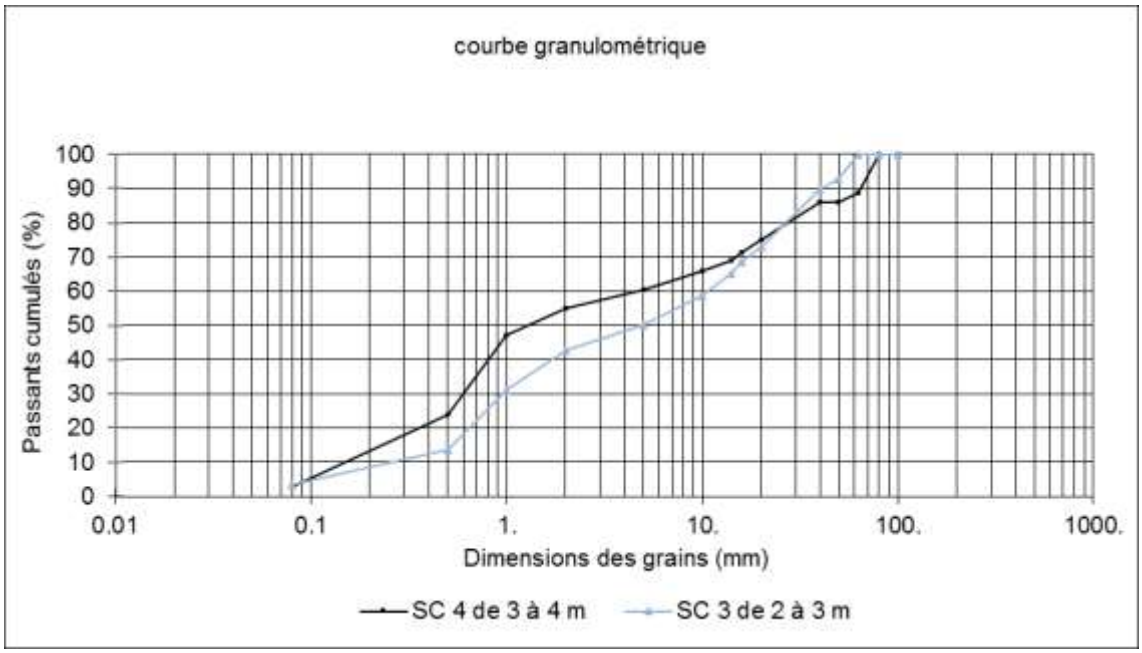


Fig. 95. Courbes granulométriques des alluvions présentes dans les sondages effectués à proximité du site de la boucle de Marclopt amont (commune de Chalain-le-Comtal)

Le diamètre médian (d50) est de 1 à 5 mm, c'est-à-dire du sable grossier au gravier fin. Le d90 est de 40 à 60 mm, correspondant à des cailloux grossiers. Le diamètre maximal observé est de l'ordre de 60 à 80 mm.

La granulométrie de type « Wolmann » est présentée ci-après.

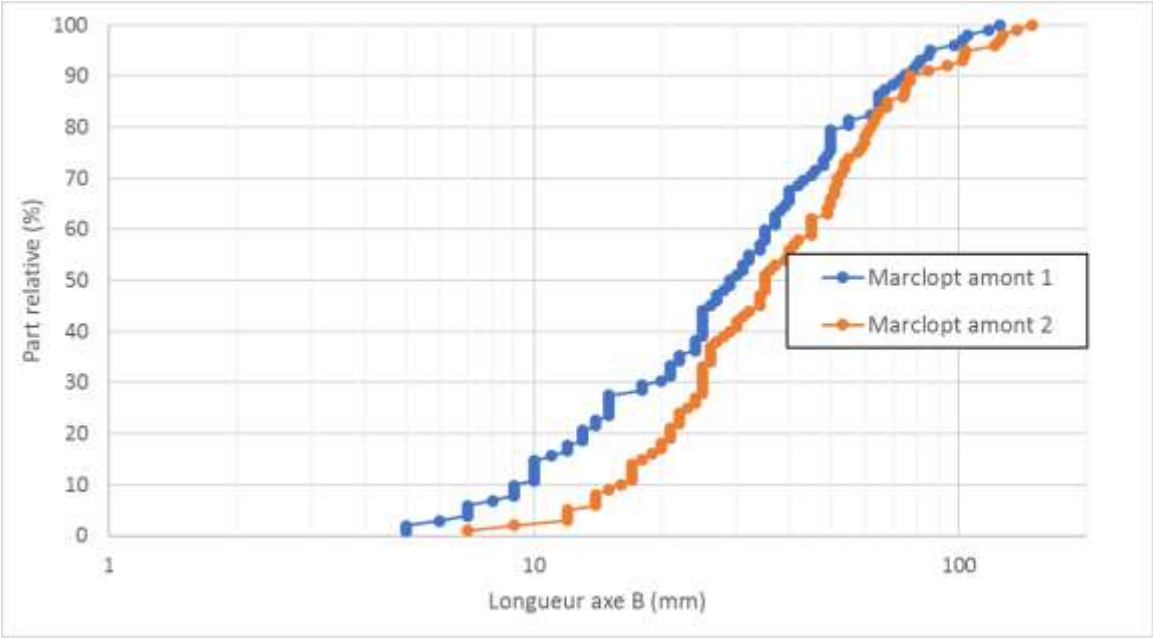


Fig. 96. Courbes granulométriques de type « Wolmann » d'un secteur bas de la berge ai niveau du site d'érosion latérale de la boucle de Marclopt amont, réalisée par J. Riquier le 20/06/2020 (Université Jean Monet)

Ces mesures témoignent d'une granulométrie plus grossière allant des graviers fins aux graviers grossiers, avec un d50 de l'ordre de 3 cm et un d90 de l'ordre de 8 cm.

- Complément de matériaux de gravières, avec une granulométrie de type galets (4.5 – 15 cm), pour un volume de 7 300 m³. Ces matériaux plus grossiers seront disposés préférentiellement en surface.

2.5.2. Résultats attendus et impacts

2.5.2.1. Résultats attendus et impacts morphologiques

Cette solution permet de protéger l'ensemble de la zone de forte pente directement à l'issue des travaux sur le chenal en rive gauche.

En revanche, une partie du chenal en rive droite, situé bien au-dessus du chenal en rive gauche, ne sera pas ou peu protégé par ce remblai. Elle restera exposée du fait de sa hauteur qui constituera nécessairement une rupture de pente dans cette zone.

La pérennité du matelas alluvial dépendra de l'hydrologie. La charge solide pourra potentiellement passer à travers la butée pour les granulométries fines ou lors de crues importantes.

Après les travaux, la butée ne présentera pas de barrière au transport sédimentaire, dans la mesure où un matelas alluvial sera constitué au moment des travaux. Ainsi, cette butée ne piègera pas ou peu les matériaux venant de l'amont.

On s'attend à un ajustement topographique et granulométrique du matelas alluvial.

La figure suivante présente les contraintes de cisaillement modélisées dans le tronçon concerné par l'expérimentation, dans l'état actuel et dans l'état projet, pour différentes crues. Les contraintes de cisaillement sont les contraintes hydrauliques exercées par l'écoulement sur le fond du lit du cours d'eau, qui entrainent les matériaux du lit.

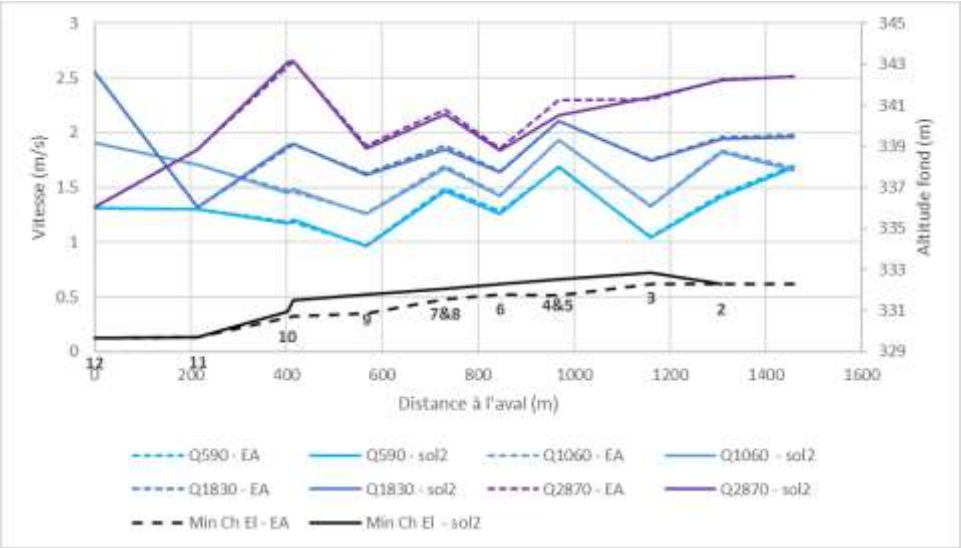


Fig. 97. Distribution des vitesses dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, sol 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 2. Modélisation en régime permanent pour des débits de 590 m³/s (temps de retour 2 ans), 1060 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1830 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 2870 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

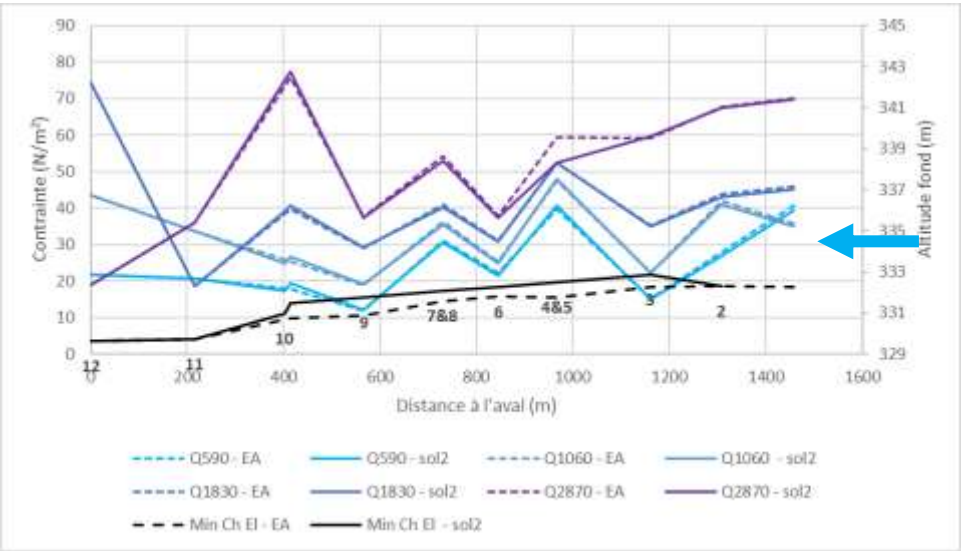


Fig. 98. Distribution des contraintes dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, sol 2 = état projet pour le Scénario de l'AVP 2. Modélisation en régime permanent pour des débits de 590 m³/s (temps de retour 2 ans), 1060 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1830 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 2870 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

Sur ce graphique, l'amont est à droite. Le modèle numérique 1D utilisé nous renseigne sur les contraintes présentes dans le chenal principal, côté rive gauche. On voit que les contraintes maximales prennent place au niveau des profils 4 et 5 pour les débits inférieurs à 1830 m³/s, et au

niveau du profil 10 pour une crue plus importante. L'expérimentation ne modifie que très marginalement ces contraintes, sauf pour les profils 4 & 5 au cours d'une crue cinquantennale. Elles atteignent au maximum 80 N/m², et sont généralement situées sous 50 N/m², ce qui est beaucoup plus faible que dans le cas du site de Craintilleux.

Comme précisé plus haut, le diamètre permettant au matelas alluvial d'être stable dans toutes ces situations est un diamètre de 7 cm. Les sédiments les plus grossiers qui seront disposés dans le chenal seront de l'ordre de 10 à 15 cm, de telle sorte que ce matelas soit stable et ainsi garantir la pérennité de l'aménagement.

Il est néanmoins probable que le matelas évolue au cours des premières crues, avec un ajustement topographique et granulométrique. On ne s'attend cependant pas à ce que ce réajustement soit de très grande ampleur.

En cas de crue plus importante, il est possible que le matelas soit plus fondamentalement déstructuré, avec un export d'une partie importante des matériaux vers l'aval.

L'état des connaissances sur la mobilité sédimentaire et l'outil de modélisation 1D utilisé pour le dimensionnement de cet AVP sont intrinsèquement associés à des incertitudes importantes. Le maintien du matelas alluvial dans le temps sur l'ensemble du linéaire, en particulier lors de crues extrêmes, reste incertain. Les sédiments les plus grossiers disposés en surface (couche sédimentaire appelée « armure ») auront une action de protection des matériaux plus fins. En cas de déstabilisation de cette couche de surface, par exemple au cours d'une forte crue, il est possible que l'ensemble du matelas soit rapidement déstabilisé. Ce matelas se reconstituera sans doute dans le temps. La dynamique de remplissage du matelas est mal connue à l'heure actuelle.

2.5.2.2. Résultats attendus et impacts hydrauliques et hydrogéologiques

Le rehaussement de la ligne d'eau lié à l'aménagement est présenté sur la figure ci-après pour différents débits de crue, d'après la modélisation numérique.

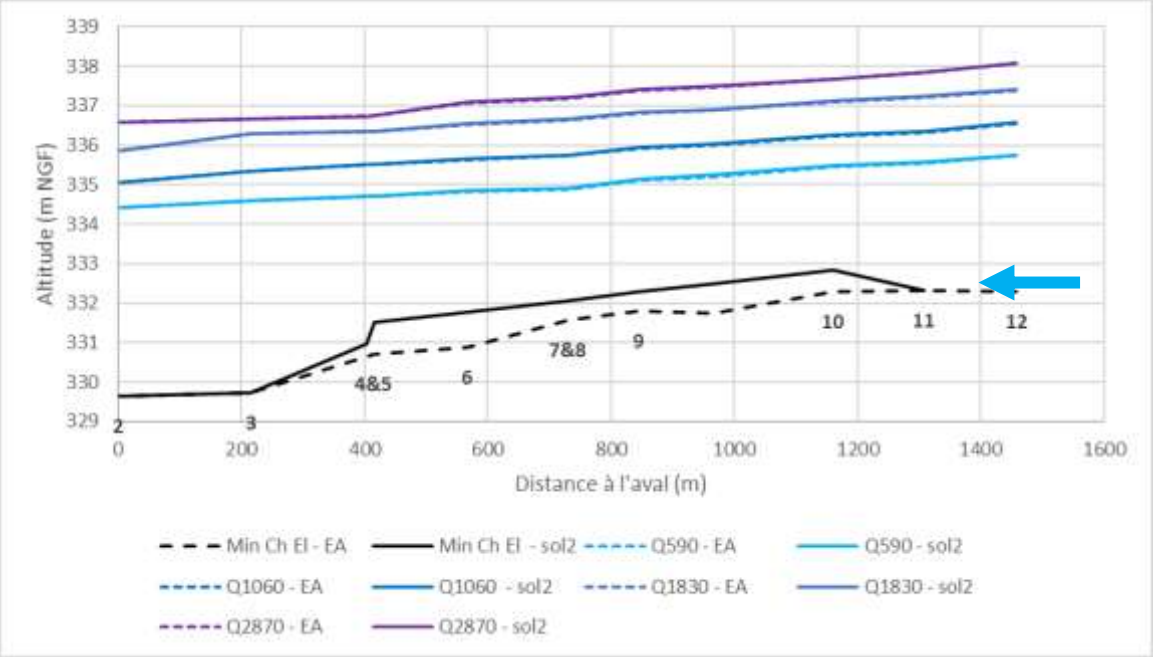


Fig. 99. Lignes d'eau actuelles et dans l'état projet dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Pro 2 = état projet pour le Scénario de l'AVP 2. Modélisation en régime permanent pour des débits de 590 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

En complément, le tableau suivant présente les différences de hauteur d'eau entre l'état projet et l'état actuel pour ces quatre débits.

Tabl. 5 - Différence de hauteur d'eau entre l'état actuel et l'état projet (AVP2), en m (les nombres positifs indiquent une rehausse de la ligne d'eau à l'état projet par rapport à l'état actuel)

	Q590	Q1060	Q1830	Q2870
PT1	0.02	0.02	0.02	0
PT2	0.03	0.03	0.02	0.01
PT3	0.03	0.03	0.02	0.01
PT4&5	0.03	0.03	0.02	0.03
PT6	0.03	0.02	0.02	0.03
PT7&8	0.02	0.02	0.02	0.02
PT9	0.02	0.02	0.02	0.02
PT10	-0.01	-0.01	0	-0.01
PT11	0	0	0	0
PT12	0	0	0	0

La rehausse maximale modélisée est de 3 cm. En amont du modèle, la rehausse est de 2 cm au plus. En aval du profil P10, la ligne d'eau est inchangée.

La figure ci-après présente le rehaussement de la ligne d'eau pour des débits plus faibles, en lien avec l'alimentation de la frayère.

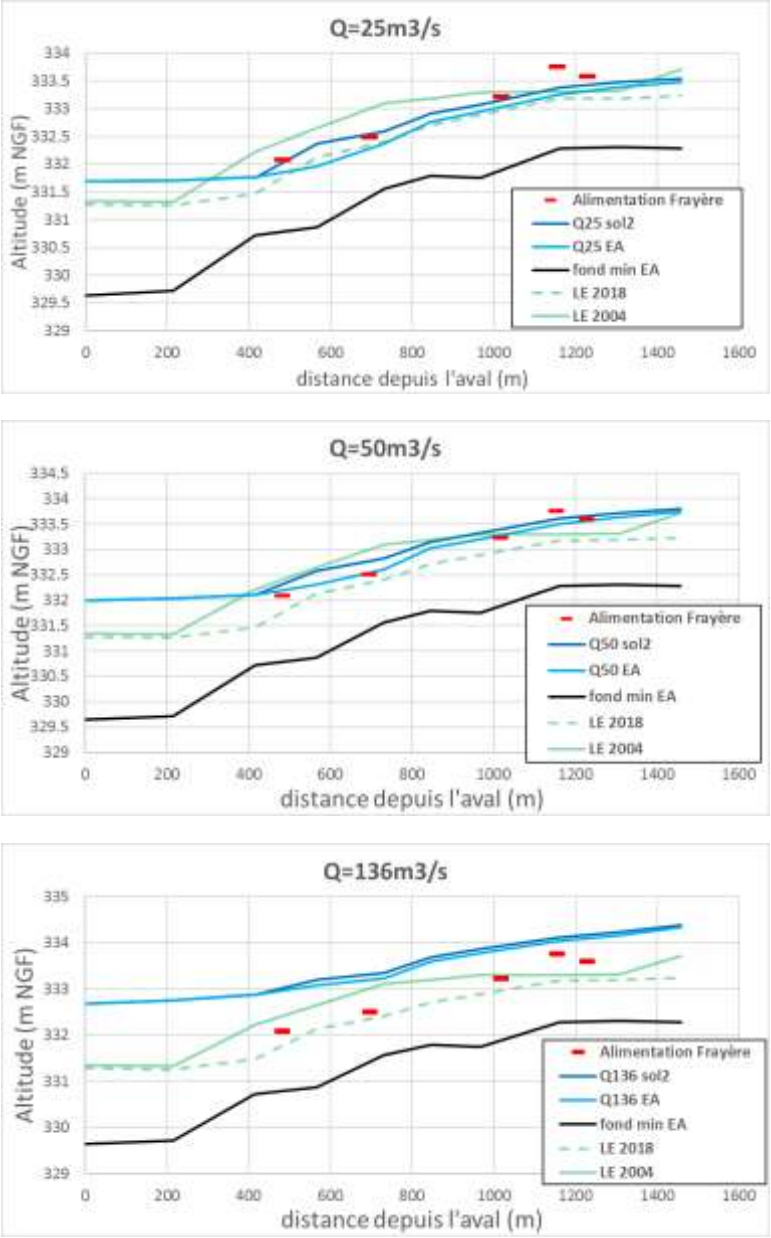


***Fig. 100.** Lignes d'eau actuelles et dans l'état projet dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, sol 2 = état projet pour le Scénario de l'AVP 2. Modélisation en régime permanent pour des débits de 25 m³/s, 50 m³/s, et 136 m³/s. LE 2018 : ligne d'eau relevée par FNE Loire en 2018, LE 2004 : ligne d'eau relevée par l'EMSE en 2004. Les points d'alimentation de la frayère ont été déterminés visuellement à partir des photographies aériennes.*

Ces résultats permettent de voir que l'état projet améliore les conditions d'alimentation de la frayère par rapport à l'état actuel, bien que ce matelas alluvial ne permette pas de rattraper les conditions présentes en 2004. Par ailleurs, la situation en projet est moins favorable à l'alimentation de la frayère que la situation considérée dans l'AVP 1. D'après ces résultats, en prenant en compte les incertitudes de la modélisation, la frayère devrait être en eau pour un débit de 50 m³/s, alors qu'à

l'heure actuelle ces conditions sont très limites. Pour un débit de 136 m3/s, la frayère est en eau sans ambiguïté dans l'état actuel comme dans l'état projet.

Cette rehausse des lignes d'eau à l'étiage devrait aussi améliorer les conditions d'alimentation des annexes hydrauliques par la nappe d'accompagnement, bien que ce processus soit probablement très local.

2.5.2.3. Résultats attendus et impacts environnementaux

2.5.2.3.1. Impact du projet

Concrètement l'opération de reconstitution d'un matelas alluvial en permettant l'accumulation de sédiments, va permettre le développement d'une zone hyporhéique qui correspond à l'ensemble des sédiments saturés en eau, situés au-dessous et à côtés d'un cours d'eau, contenant une certaine quantité d'eau de surface.

D'un point de vu de la diversité biologique, la présence de sédiments sert de frayères à certaines espèces de poissons, comme la truite (présente sur le secteur d'étude) et les poissons juvéniles se développent dans les interstices. La conception des seuils intègre la franchissabilité piscicole. Ainsi les aménagements ne constitueront pas un obstacle à la continuité écologique. La mise en place de seuils est favorable au maintien d'un niveau d'eau plus haut et donc d'une mise en eau plus efficace des annexes hydrauliques situées à proximité servant de frayères pour le brochet. La zone hyporhéique est également colonisée par de nombreux micro-organismes.

La zone hyporhéique permet de réguler la température de l'eau en isolant une partie des écoulements. Ainsi les écoulements circulant à travers les granulats du lit ont une température moins élevée. Ce phénomène de régulation a une importance pour la vie aquatique notamment en été, en période de basses eaux.

Le développement d'une zone hyporhéique aurait également une incidence positive sur l'autoépuration de l'eau en constituant une zone de stockage des nutriments et associé à une activité métabolique grâce aux micro-organismes. La zone hyporhéique agit comme un filtre physique et biologique L'autoépuration est optimale avec une granulométrie intermédiaire (qui favorise un équilibre entre le temps de transite suffisamment long et un brassage des eaux évitant l'accumulation de certains composés ou avec une micro-hétérogénéité suffisante pour garantir la présence de zones oxygénées et de zones anoxiques.

La création d'un seuil peut cependant engendrer un risque de dépôt de fines et de colmatage du fond défavorable à la vie aquatique.

L'impact sur les habitats naturels des berges est faible en raison d'une emprise limitée. L'impact sur les berges est essentiellement lié à la phase travaux pour l'accès au lit mineur.

L'incidence de la reconstitution d'un matelas alluvial est donc largement positive sur le plan environnemental. Les effets seront effectifs sur les emprises spatiales sur lesquelles le matelas va se mettre en place. La butée permettra également de favoriser la mise en eau de l'annexe en rive gauche qui constitue une frayère à Brochet historique entretenue par l'Ecopôle.

2.5.2.3.2. Impact des travaux

Les principaux impacts potentiels en phase travaux sont :

- L'utilisation et/ou la création d'accès (dérangement des populations d'espèces faunistiques, destruction éventuelle d'individus, dégradation temporaire des habitats de la berge) ;
- Le dérangement et la destruction éventuelle de la faune piscicole ;
- La dégradation temporaire du lit en eau et des habitats aquatiques lors des différents aménagements (création des batardeaux, dépôts de matériaux, circulation des engins…). La phase de travaux dans le lit en eau peut être à l'origine d'un relargage de matière en suspension. Dans les zones où la marne est affleurante l'impact sera plus limité en raison de l'absence de sédiments.

2.5.3. Modalités de réalisation des travaux

2.5.3.1. Déroulement des travaux

Les travaux seront réalisés en période d'étiage pour limiter les impacts sur l'environnement et éviter les risques de crue pour le chantier. La zone de travaux est isolée des écoulements de la Loire par la mise en place d'une merlon/batardeau de chantier.

(1) Quatre pistes d'accès (deux sur chaque rives) sont tout d'abord réalisées. A noter que les pistes en rive droite cheminent dans des parcelles privées.

(2) Deux batardeaux constitués de matériaux alluviaux et blocs permettant d'isoler la rive droite et le chenal secondaire en rive droite sont ensuite créés. Ceux-ci permettent la construction de la partie en rive droite de la butée et le remplissage en amont de la butée. Le batardeau en aval fait environ 2.8 m de haut, 3 m en crête et 15 m en pied sur 250 m linéaires, ce qui représente un volume de l'ordre de 6 300 m^3 de matériaux. Il permet le passage d'un débit de l'ordre de 100 m^3/s. Le batardeau en amont fait environs 2.3 m de haut, 3 m en crête et 15 m en pied sur 80 m linéaires, ce qui représente un volume de l'ordre de 1 700 m^3 de matériaux. Il permet le passage d'un débit de l'ordre de 100 m^3/s.

Cette capacité est suffisante pour supporter les éclusés quotidiens réalisés par EDF (80 m3/S au maximum).

(3) Une fois la butée et le remplissage achevés sur la demi largeur rive droite et dans le chenal secondaire en rive droite, le batardeau est basculé en rive gauche pour mettre à sec la rive gauche de la Loire. L'écoulement est alors en rive droite et la construction des butées et du remblai peuvent avoir lieu à sec.

(4) Une fois cette étape achevée, le batardeau est enlevé en terminant de combler la zone à remblayer et le reliquat est évacué (5) Pour finir, les pistes d'accès sont enlevées.

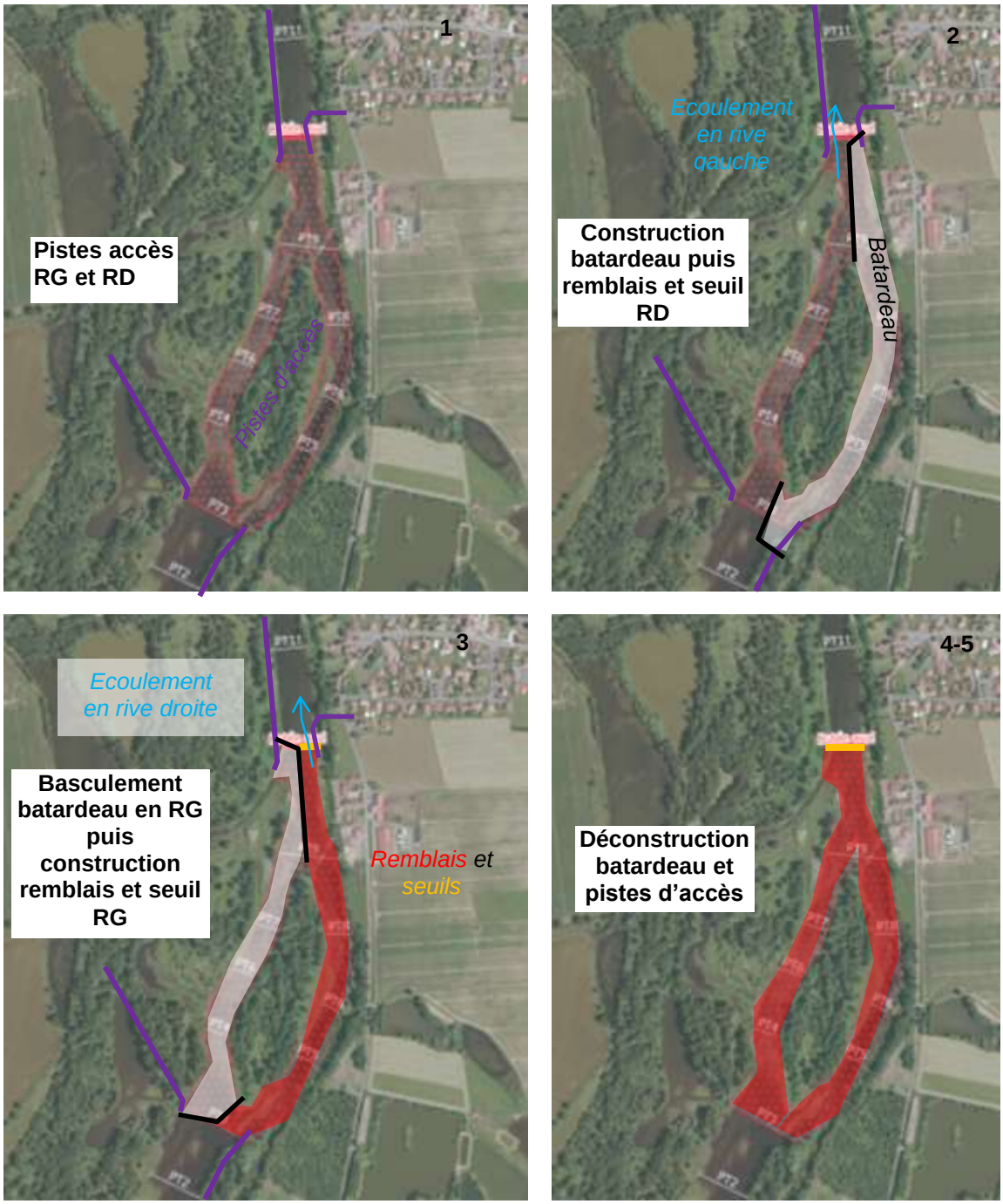


Fig. 101. Déroulement des travaux

2.5.3.2. Accès et piste de chantier

Deux pistes et rampes d'accès sont réalisées sur chaque rives, soit quatre pistes en tout (voir ci-dessus).

En ive gauche, les parcelles concernées par ces pistes appartiennent au FNE Loire.

En rive droite, les parcelles concernées sont les parcelles A75 et A660 (piste amont) dont le propriétaire n'est pas connu à ce stade. La piste amont peut être réalisée sur le DPF, à partir de pistes existantes.

Lors de la mise en place des batardeaux et du tapis de blocs, la portance de la marne peut amener à des difficultés de chantier. Il sera préférable de procéder à une reconnaissance complémentaire afin de s'en assurer.

2.5.3.3. Prise en compte des enjeux environnementaux

Aux vues des enjeux écologiques identifiés, les préconisations suivantes permettront de réduire les impacts environnementaux de la phase travaux :

- Période d'intervention adaptée à la faune piscicole (août à octobre). Cette période limitera également en partie les impacts sur la faune et la flore des berges lors de la création des accès.
- Gestion des plantes exotiques envahissantes. De nombreuses espèces exotiques sont présentes au niveau des berges et des milieux terrestres (Renouée, Balsamine de l'Himalaya, Séneçon du Cap, Ambroisie à feuilles d'armoise…) mais également dans le milieu aquatique (Elodée)
- Mesures de réduction intégrées aux phases de chantier (suivi environnemental du chantier, balisage préalable de l'emprise de la zone de travaux…)
- La réalisation du batardeau se fera d'amont vers l'aval. Lors de la mise en place du batardeau, des MES (matières en suspension) seront relarguées. Cette situation est difficilement évitable. Une pêche de sauvegarde sera mise en œuvre afin de minimiser l'impact sur la faune aquatique. Une fois le batardeau achevé, un écoulement dans l'enceinte du batardeau est toujours possible (percolation à travers les matériaux imperméables). Avant rejet au lit mineur en dehors de l'enceinte du batardeau, les eaux seront décantés au travers de barrages de matériaux de type gravette. Suivant les demandes spécifiques des services de l'état un suivi peut être réalisé pendant les travaux de mise en place des batardeaux. Si la situation hydraulique au moment semble trop critique vis-à-vis de la préservation des espèces, les travaux peuvent être stoppés momentanément.

2.5.3.4. Calendrier et phasage

Etant donné les enjeux environnementaux (période pour la faune propice de septembre à novembre) et les contraintes liées à l'hydrologie (crues en courantes novembre), la période de travaux la plus propice est la période aout-septembre.

On présente ci-après un calendrier prévisionnel de la réalisation des travaux.

Phase	Aout				Septembre			
Création accès - apport matériel - installation travaux								
Construction batardeaux depuis RD								
Construction encrage et butée - RD								
Remblais - RD								
Bascule batardeau pour RG								
Construction batardeau depuis RG								
Construction encrages et butée - RG								
Déconstruction batardeau et fin de chantier								

2.5.4. Estimation des coûts

Le chiffrage est effectué sur la base de l'expérience du bureau d'étude en maîtrise d'œuvre de travaux similaires.

Désignation de la nature des travaux	unité	Quantité	Prix unitaire HT (€)	Montant HT (€)
Etudes préliminaires				***35 000 €***
Mesures topographiques complémentaires	F	1	10 000 €	15 000 €
Investigations géotechniques	F	1	8 000 €	8 000 €
Etude projet	F	1	12 000 €	12 000 €
Maîtrise d'œuvre	F	1	25 259.18 €	***25 259 €***
Installation chantier/frais généraux/divers	F	1	27 456 €	***27 456 €***
Batardeaux chantier (RG et RD)	F	1	66 250 €	***66 250 €***
Pêche électrique	F	1	2 500 €	2 500 €
Remblais apport et mise en batardeau, pour phasage 1	m^3	8000	5 €	40 000 €
Reprise et mise en remblai des déblais (batardeau) pour phasage 2	m^3	2900	1 €	2 900 €
Régalage sur site des déblais de rivière -batardeau aval	m^3	3150	2 €	6 300 €
Evacuation du reliquat	m^3	4850	3 €	14 550 €
Travaux préparatoires				***9 000 €***
Débroussaillage	m^2	4000	2 €	8 000 €
Déboisement	u	10	100 €	1 000 €
Remblais				***43 988 €***
Remblais 1 en grande masse - Loire 7.5km	m^3	1410	4 €	5 288 €
Remblais 1 en grande masse grossiers - gravières	m^3	7740	5 €	38 700 €
Enrochements				***36 800 €***
Amenée et pose des enrochements sur les seuils	m^3	460	80 €	36 800 €
Reprise berges				***1 800 €***
Reprofilage berges 1/1	ml	300	6 €	1 800 €
Voirie				***25 200 €***
Piste circulation engins : fourniture et mise en œuvre des matériaux	ml	1400	18 €	25 200 €

Sous-total HT	**270 752 €**
Imprévus (20%)	54 150 €
Total HT	**324 903 €**

Note : le prix des matériaux issus des gravières ou carrière est fortement dépendant des fluctuations du marché local.

2.5.5. Etudes complémentaires

Les études suivantes (AVP / Projet) devront inclure les points suivants :

- Afin d'affiner le chiffrage des travaux un levé topographique sera nécessaire à la réalisation des étapes suivantes. La butée fera l'objet d'un relevé au 1/100 sur son emprise, afin de réaliser des profils en travers précis. La zone de remplissage entre butée fera l'objet d'un relevé au 1/500,
- Faire un essai pour vérifier la portance de la marne vis-à-vis de la circulation des engins de chantier :
    - Soit par la réalisation de sondages à la pelle depuis la berge pour, de visu, attester de la compacité ou non de la marne
    - Soit réaliser des sondages carottés en haut de berge et prélever à la hauteur correspondant à la marne un échantillon intact pour essai labo de compacité.

2.5.6. Approche réglementaire

Les démarches administratives à réalisation du projet sont présentées ci-après. La réalisation du projet nécessitera un dossier d'autorisation au titre de la loi sur l'eau. Un dossier de Demande d'Autorisation Environnementale devra donc être établi.

La nécessité d'une étude d'impact (évaluation environnementale) n'est pas à écarter étant donné la nature des travaux, mais reste à l'appréciation de l'administration. Dans ce sens un travail de concertation et d'échange en amont paraît indispensable afin de bien cadrer le contexte réglementaire du projet, notamment vis-à-vis de la nécessité de réaliser un dossier de dérogation espèces protégées. Une étude naturaliste complémentaire sera nécessaire pour la réalisation des dossiers règlementaires à adapter au site et selon le cadrage avec la DREAL. En effet des un diagnostic actualisé intégrant les données de FNE (Ecopôle) sera nécessaire.

Nomenclature IOTA	Demande d'Autorisation au titre de Rubrique 3.1.2.0 : Modification du profil en long et en travers sur une longueur supérieur à 100 m. Rubrique 3.1.1.0 Installations, ouvrages, remblais et épis, dans le lit mineur d'un cours d'eau Possible concernant la rubrique 3.1.5.0 : Destruction de frayères, sur une surface de plus de 200m²
Evaluation environnementale	Examen au cas par cas au titre de Catégorie 10. Canalisation et régularisation des cours d'eau
Evaluation des incidences Natura 2000	Oui Site Natura 2000 directive habitats (ZSC) : Milieux alluviaux et aquatiques de la Loire - FR8201765 Site Natura 2000 directive oiseaux (ZPS) : Plaine du Forez FR8212024
Dérogation espèces protégées	Possible présence d'espèces avec un statut de protection sur les berges, potentiellement impactées lors de la phase travaux Nécessite un cadrage avec la DREAL
Demande de défrichement	Non

2.6. AVP 3 – EPIS A ECHANCRURE

2.6.1. Présentation de la solution

2.6.1.1. Principe

Des épis à échancrure peuvent être conçus pour rehausser la ligne d'eau, et constituer ainsi une protection hydraulique des marnes. La perte de charge responsable de l'érosion est concentrée au niveau des épis plutôt qu'au niveau du seuil de marnes.

Cette modification de l'hydraulique donne lieu au dépôt de matériaux naturellement en amont, s'il y a un apport de matériaux.

Au niveau et à l'aval des épis, l'écoulement est fortement accéléré. Les marnes doivent donc être protégées pour éviter les affouillements.

L'avantage de cette solution est qu'elle permet d'éviter d'installer un obstacle sur toute la largeur du chenal. Elle est donc très favorable pour la continuité piscicole. Par ailleurs, les épis peuvent être conçus pour permettre une bonne intégration paysagère et une diversification des habitats.

Ces épis présentent les caractéristiques suivantes :

- hauteur par rapport au fond moyen de 1.50 m,
- crête de 65m de large berge à berge,
- ouverture centrale de 10m de large.

Pour exemple, ce type d'épis a été installé dans les années 2000 à Fresnes-sur Loire pour alimenter un chenal secondaire.

Fig. 102. ***Epis de Fresnes-sur-Loire***

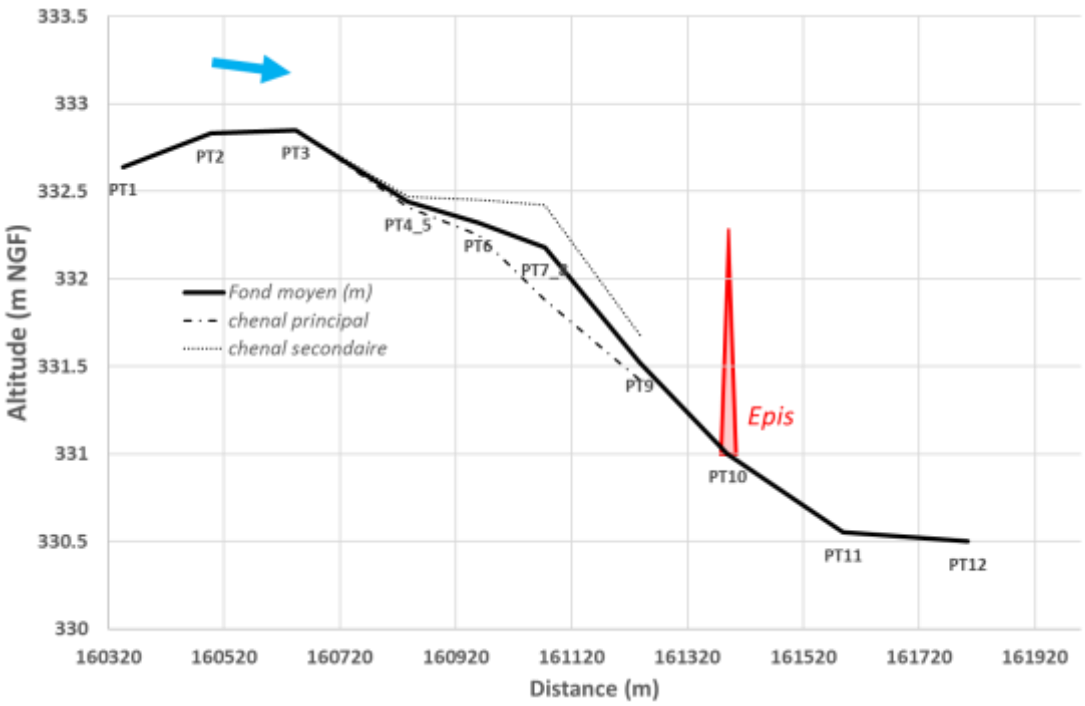


Fig. 103. ***Profil en long avec la solution Epis à échancrure***

Fig. 104. ***Carte de l'aménagement***

2.6.1.2. Epis

La crête des l'épis est positionnée au droit des profils n° 10, 1.5m au-dessus de la cote moyenne :

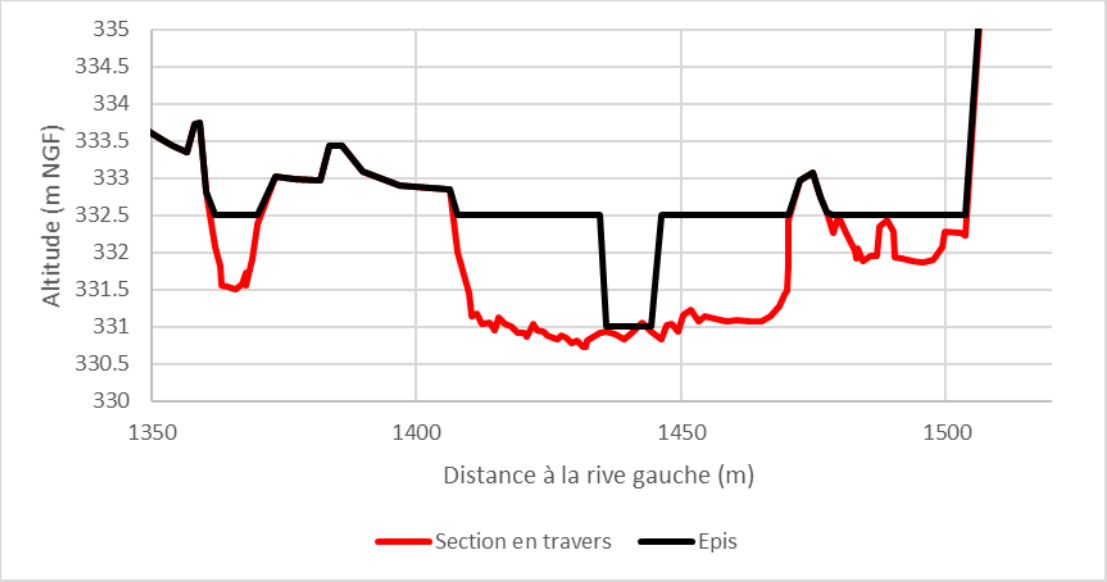


Fig. 105. Coupe en travers des l'épis

A l'aide des niveaux et vitesses issues du modèle hydraulique 1D, les blocs constituant l'épis et protégeant la marne sont dimensionnés.

Des vitesses maximums de 2.7 m/s sont obtenues par la modélisation hydraulique (Q_{Loire}=2870 m³/s, temps de retour 50 ans) dans le lit mineur au droit de l'épis.

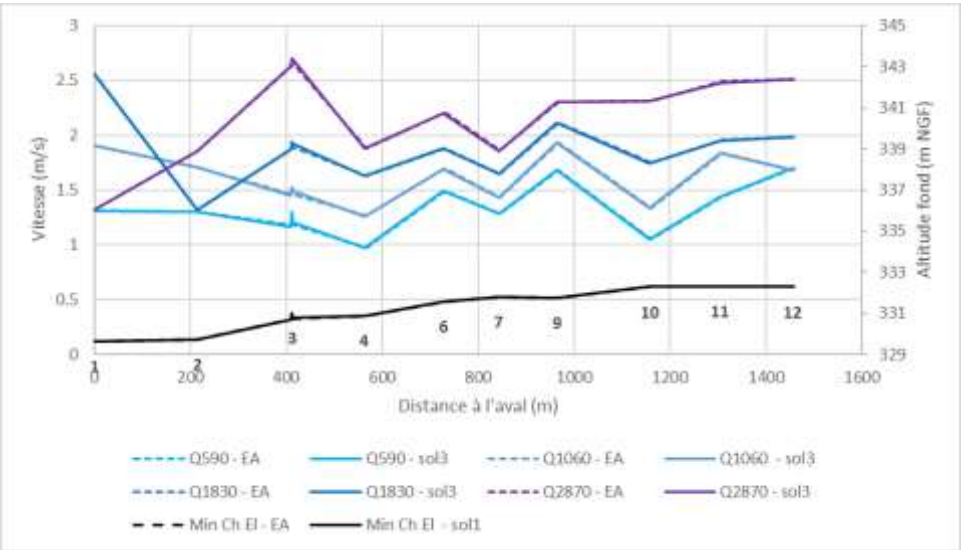


Fig. 106. Distribution des vitesses dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, sol 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 2. Modélisation en régime permanent pour des débits de 590 m³/s (temps de retour 2 ans), 1060 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1830 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 2870 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)

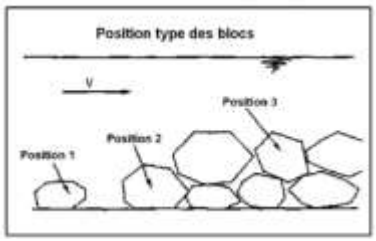
L'approche du dimensionnement des blocs constituants l'épis est étudiée suivant la méthode d'Isbach :

La formule utilisée est la suivante :

$$D_{50} = \frac{V^2}{m^2 . 2g . \Delta d}$$

Avec :

- D_{50} : blocs moyen (en m)
- V= vitesse dans la section contractée
- m= coefficient fonction de la place du bloc dans la protection. Pour notre cas m=0.85 (position 1)



- g= accélération gravitationnelle (9.81m/s^{-2})
- Δd= densité déjaugée de l'enrochement (1.6 à 1.85)

En utilisant le critère d'Isbach pour des blocs fortement sollicités (position 1) on obtient des diamètres de blocs stables de 31 cm.

En conclusion :

La classe d'enrochement **LM40/200** (blocs compris entre 31 et 53 cm) est retenue pour constituer les butées, une blocométrie qui devrait permettre d'assurer la pérennité de la structure dans le temps.

Afin d'assurer la stabilité des épis et protéger les marnes dans la partie inter-épis où les contraintes liées à l'écoulement sont concentrées, un tapis de blocs avec ancrage sur l'aval par un décaissement « à minima » dans la marne est proposé. A noter que sans cet ancrage, les blocs risquent de rouler vers l'aval déstructurant ainsi l'ensemble de la structure. De même le substratum marneux pourrait être dégradé du fait de la concentration de l'écoulement. L'épaisseur d'ancrage étant limitée, les blocs pourrons être « enfoncés » à l'aide des pelles mécaniques pour augmenter leur imbrication.

L'épis a une largeur de berge à berge de 65 m, ce qui correspond à 2000 m^3 d'enrochements au total.

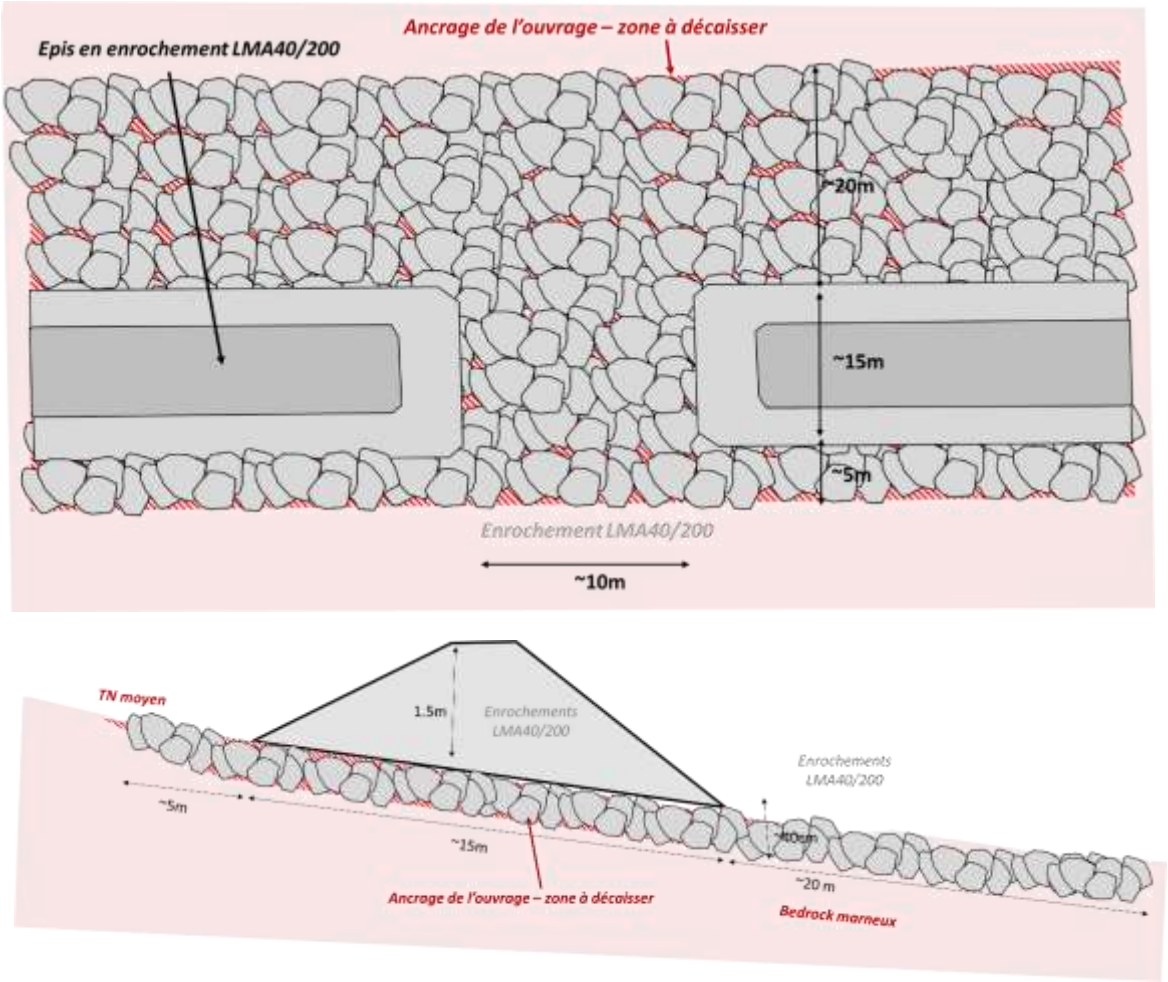


Fig. 107.Epis, schéma de principe (en haut = en plan, en bas = coupe longitudinale).

Concernant la provenance de ces blocs, on propose d'utiliser les blocs provenant des opérations de désenrochement prévues dans le cadre des actions de réactivation de l'érosion latérale des terrains en bord de Loire. Pour limiter le transport, on suggère d'utiliser les blocs provenant du désenrochement du site de la boucle de Marclopt aval Montrond-les-Bains amont, volume estimé à 6000 m^3. La taille de ces blocs n'est pas connue à l'heure actuelle, elle devrait être dans la classe **LM40/200.**

Fig. 108. ***Photographie du linéaire d'enrochements qui fera l'objet d'un désenrochement, Magneux-Haute-Rive (boucle de Marclopt aval), photographie ARTELIA, 4 février 2020***

Dans un objectif de diversification des habitats et d'intégration paysagère du dispositif, ces épis pourront être végétalisé à l'aide de fascines pré-végétalisées. Des boudins coco pourront être disposés sur la crête des l'épis, avec plantation d'espèces hélophytes. Ces aménagements permettront par ailleurs d'augmenter la stabilité des blocs.

Cette technique ne modifie pas les écoulements en crue : ces plantes étant très flexibles, elles n'augmentent pas la rugosité de l'ensemble.

2.6.2. Résultats attendus et impacts

2.6.2.1. Impacts morphologiques

Cet aménagement a un caractère particulièrement expérimental.

Les épis ont été conçus traditionnellement pour protéger les berges, ou pour concentrer l'écoulement dans un chenal plus étroit afin d'augmenter la profondeur du chenal pour des enjeux de navigation. En limitant les vitesses en contraintes en amont, et en créant une barrière physique, les épis ont la plupart du temps donné lieu à des dépôts de matériaux en amont. C'est cet effet que l'on cherche à utiliser dans le cadre de cette expérimentation.

Le matelas devrait ainsi se reconstituer sur une partie de la largeur du d'eau par le biais des apports amont.

Les épis donnent aussi lieu à une augmentation des vitesses dans la contraction de la section, qui pourrait sur-solliciter les marnes. Les protections conçues au niveau des épis devraient permettre d'éviter ce phénomène.

L'influence de ces épis sur les contraintes est présentée sur la figure suivante. Les contraintes de cisaillement sont les contraintes hydrauliques exercées par l'écoulement sur le fond du lit du cours d'eau, qui entrainent les matériaux du lit. Ces analyses ont été faites par le biais de la modélisation 1D, et ne tiennent donc pas compte des effets 2D voire 3D qui auront lieu au droit et en amont des

épis : ralentissement de l'écoulement derrière les épis, accélération de l'écoulement entre les épis, développement de turbulences en aval ...

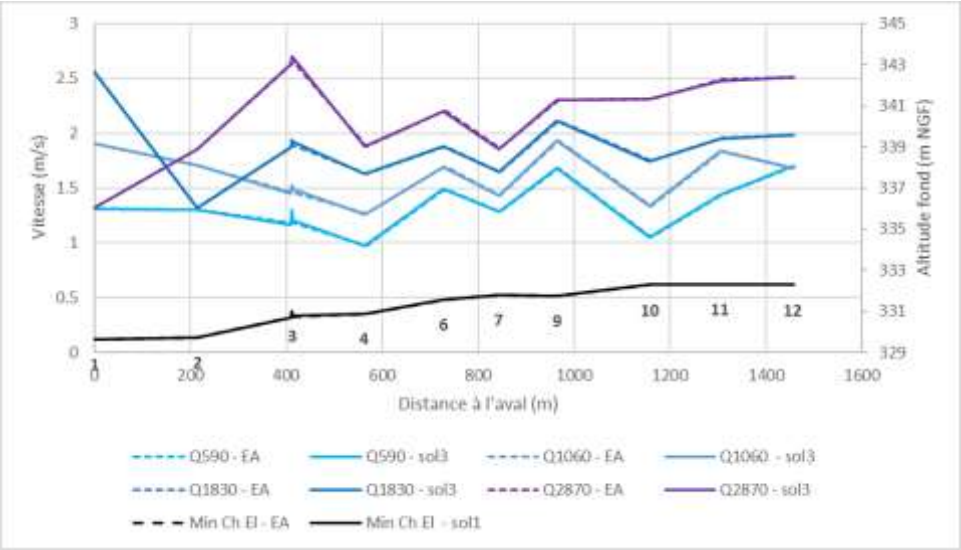


Fig. 109. ***Distribution des vitesses dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, sol 1 = état projet pour le Scénario de l'AVP 2. Modélisation en régime permanent pour des débits de 590 m³/s (temps de retour 2 ans), 1060 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1830 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 2870 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)***

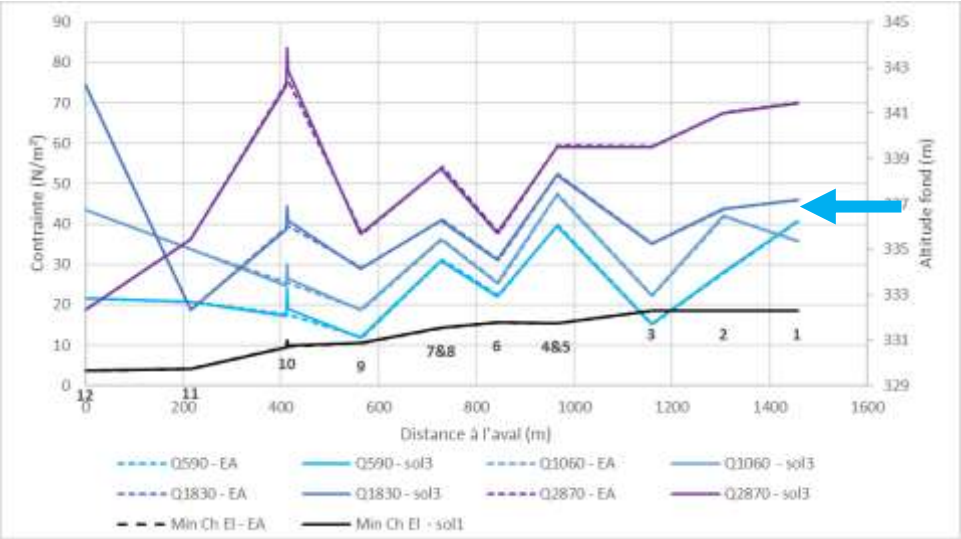


Fig. 110. ***Distribution des contraintes dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Sol 3 = état projet pour le Scénario de l'AVP 1. Modélisation en régime permanent pour des débits de 590 m³/s (temps de retour 2 ans), 1060 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1830 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 2870 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)***

Ces résultats indiquent une augmentation significative des contraintes de l'ordre de 10 N/m² au niveau du profil 10. Cela indique que les épis donnent lieu à une perte de charge localisée (perte d'énergie).

Pour les débits de crue présentés, les épis ont peu d'influence dans les autres zones et notamment en amont. C'est aussi le cas de la vitesse et de la hauteur d'eau, qui sont plus fortes localement au niveau des épis et ne présentent pas de différences majeures avec l'état actuel par ailleurs. Les limitations d'une modélisation 1D ne permettent pas d'apporter d'élément tangible sur l'efficacité du dispositif.

Des matériaux devraient être piégés à l'amont des épis, mais il est difficile de prévoir quelle quantité et quel linéaire de cours d'eau seront concernés. Ces éléments dépendant à la fois de l'écoulement en 2D en amont des épis, et des apports solides provenant de l'amont.

Cependant, dans la mesure où les épis semblent avoir une influence assez limitée sur l'écoulement en amont des épis (dans une vision 1D), il est probable que le matelas reconstitué soit d'ampleur plus faible que pour les autres projets, où le matelas est reconstitué au moins en partie au moment des travaux.

Les épis ne constitueront pas une barrière totale au transport sédimentaire, l'échancrure centrale permettant le transit de matériaux. Par ailleurs, son effet de piégeage de sédiments sera temporaire. La durée de ce rôle de piégeage ne peut être estimée avec les éléments actuels.

2.6.2.2. Impact hydraulique et hydrogéologique

Le rehaussement de la ligne d'eau lié à l'aménagement est présenté sur la figure ci-après pour différents débits de crue, d'après la modélisation numérique.

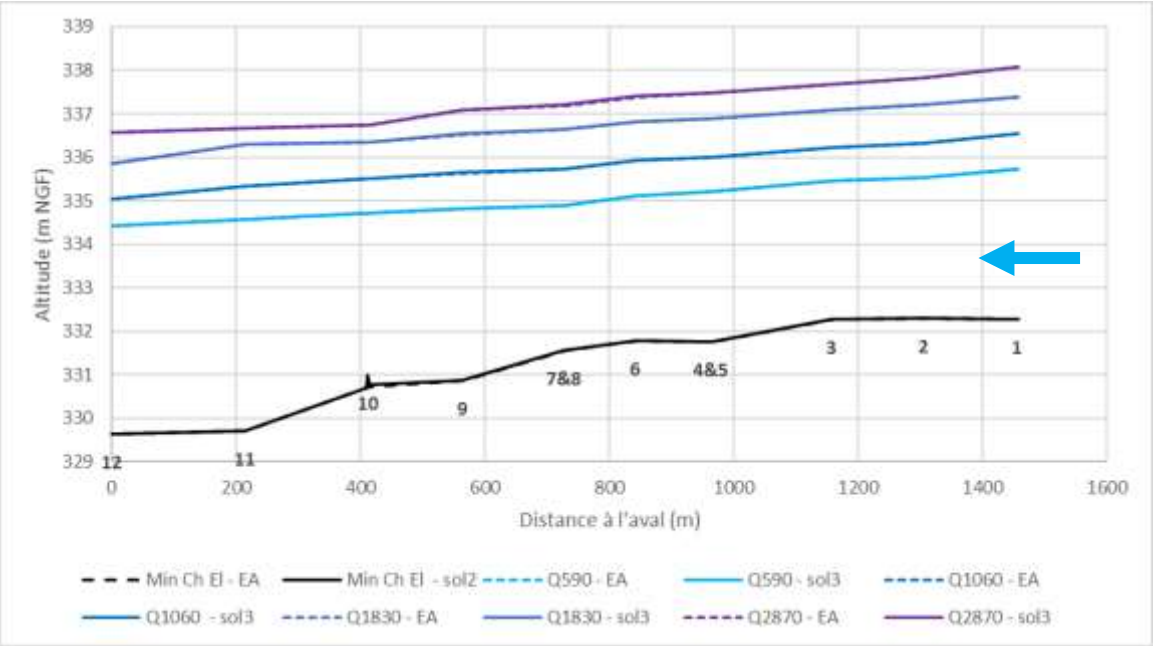


***Fig. 111.** Lignes d'eau actuelles et dans l'état projet dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, Sol 3 = état projet pour le Scénario de l'AVP 3. Modélisation en régime permanent pour des débits de 550 m³/s (temps de retour 2 ans), 950 m³/s (pic de crue 2016, temps de retour 5 à 10 ans), 1900 m³/s (pic de crue de décembre 2003, temps de retour 20 ans), et 3030 m³/s (pic de crue de 2008, temps de retour 50 ans)*

En complément, le tableau suivant présente les différences de hauteur d'eau entre l'état projet et l'état actuel pour ces quatre débits.

Tabl. 6 - Différence de hauteur d'eau entre l'état actuel et l'état projet (AVP3), en m (les nombres positifs indiquent une rehausse de la ligne d'eau à l'état projet par rapport à l'état actuel)

	Q590	Q1060	Q1830	Q2870
PT1	0	0	0	0
PT2	0	0	0	0
PT3	0	0	0	-0.01
PT4&5	0	-0.01	-0.01	0
PT6	0	0	-0.01	-0.01
PT7&8	0	0	-0.01	-0.01
PT9	0	-0.01	-0.01	-0.01
PT10	0.01	0.01	0	0.01
PT11	0	0	0	0
PT12	0	0	0	0

Pour les débits de crue, les lignes d'eau sont rehaussées de façon extrêmement marginale, avec des différences de l'ordre d'1 cm localement.

La figure ci-après présente le rehaussement de la ligne d'eau pour des débits plus faibles, en lien avec l'alimentation de la frayère.

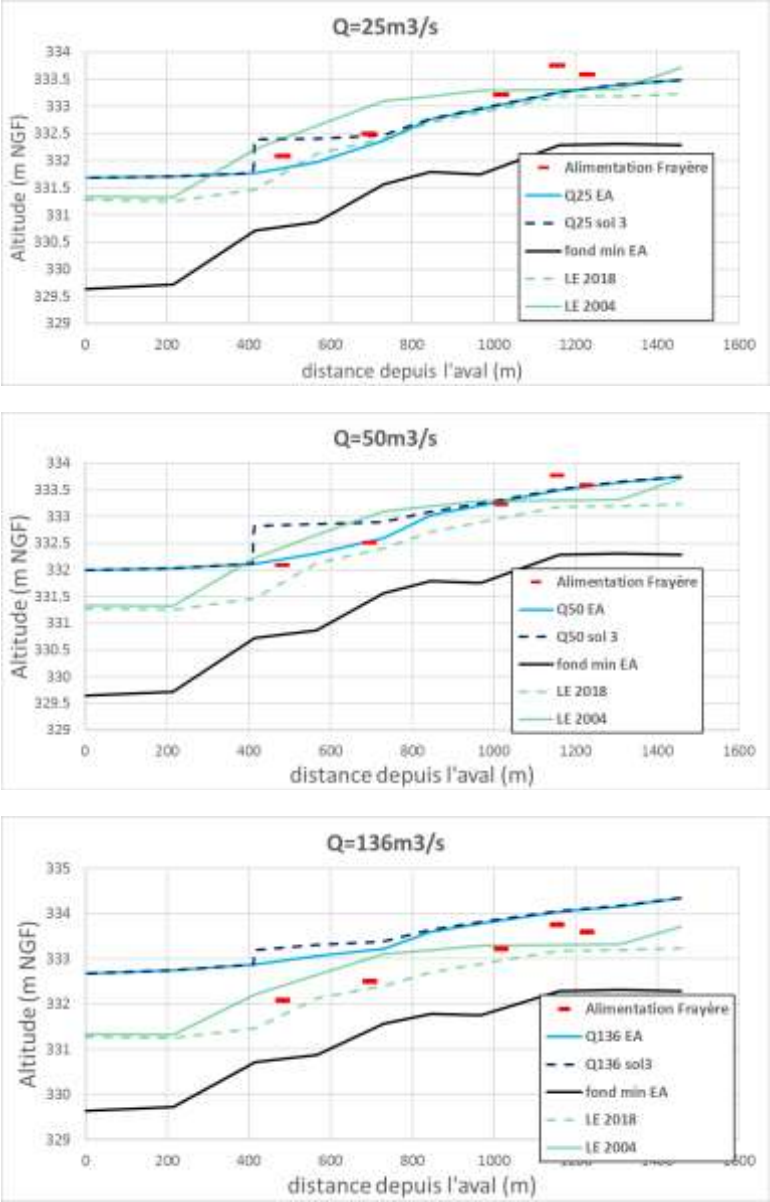


Fig. 112. ***Lignes d'eau actuelles et dans l'état projet dans le tronçon concerné par l'aménagement. EA = Etat actuel, sol 3 = état projet pour le Scénario de l'AVP 3. Modélisation en régime permanent pour des débits de 25 m³/s, 50 m³/s, et 136 m³/s. LE 2018 : ligne d'eau relevée par FNE Loire en 2018, LE 2004 : ligne d'eau relevée par l'EMSE en 2004. Les points d'alimentation de la frayère ont été déterminés visuellement à partir des photographies aériennes.***

Ces résultats montrent que pour des débits faibles et modérés, les épis rehaussent la ligne d'eau sur une distance d'environ 200 m en amont. La rehausse est maximale au niveau des épis. Elle atteint +62 cm pour un débit de 25 m³/s, +71 cm pour un débit de 50 m³/s, et +32 cm pour un débit de 136 m³/s. Ainsi, les épis devraient améliorer fortement les conditions d'alimentation de la frayère à brochet.

La rehausse est plus importante que pour les solutions 1 et 2, mais prend place sur une distance plus courte.

2.6.2.3. Impacts environnementaux

2.6.2.3.1. Impact du projet

Concrètement l'opération de reconstitution d'un matelas alluvial en permettant l'accumulation de sédiments, va permettre le développement d'une zone hyporhéique qui correspond à l'ensemble des sédiments saturés en eau, situés au-dessous et à côtés d'un cours d'eau, contenant une certaine quantité d'eau de surface.

D'un point de vu de la diversité biologique, la présence de sédiments sert de frayères à certaines espèces de poissons, comme la truite (présente sur le secteur d'étude) et les poissons juvéniles se développent dans les interstices. La conception des épis, en ne créant pas un obstacle sur toute la largeur du lit, permettent de garantir la continuité piscicole. La mise en place des épis est favorable au maintien d'un niveau d'eau plus haut et donc d'une mise en eau plus efficace des annexes hydrauliques situées à proximité servant de frayères pour le brochet. La zone hyporhéique est également colonisée par de nombreux micro-organismes.

La zone hyporhéique permet de réguler la température de l'eau en isolant une partie des écoulements. Ainsi les écoulements circulant à travers les granulats du lit ont une température moins élevée. Ce phénomène de régulation a une importance pour la vie aquatique notamment en été, en période de basses eaux.

Le développement d'une zone hyporhéique a également une incidence positive sur l'autoépuration de l'eau en constituant une zone de stockage des nutriments et associé à une activité métabolique grâce aux micro-organismes. La zone hyporhéique agit comme un filtre physique et biologique L'autoépuration est optimale avec une granulométrie intermédiaire (qui favorise un équilibre entre le temps de transite suffisamment long et un brassage des eaux évitant l'accumulation de certains composés ou avec une micro-hétérogénéité suffisante pour garantir la présence de zones oxygénées et de zones anoxiques.

La création d'un épi peut cependant engendrer un risque de dépôt de fines et de colmatage du fond défavorable à la vie aquatique.

L'impact sur les habitats naturels des berges est faible en raison d'une emprise limitée. L'impact sur les berges est essentiellement lié à la phase travaux pour l'accès au lit mineur.

L'incidence de la reconstitution d'un matelas alluvial est donc largement positive sur le plan environnemental. Les effets seront effectifs sur les emprises spatiales sur lesquelles le matelas va se mettre en place. Dans le cadre de cet avant-projet les effets seront progressifs à mesure de l'accumulation de sédiments au niveau des épis. La butée permettra également de favoriser la mise en eau de l'annexe en rive gauche qui constitue une frayère à Brochet historique entretenue par l'Ecopôle. La structure des épis permettra le développement d'habitats naturels riverains diversifiés. Leur végétalisation avec des hélophytes permettra une intégration rapide des aménagements.

2.6.2.3.2. Impact des travaux

Les principaux impacts potentiels en phase travaux sont :

- L'utilisation et/ou la création d'accès (dérangement des populations d'espèces faunistiques, destruction éventuelle d'individus, dégradation temporaire des habitats de la berge) ;

- Le dérangement et la destruction éventuelle de la faune piscicole ;
- La dégradation temporaire du lit en eau et des habitats aquatiques lors des différents aménagements (création des batardeaux, dépôts de matériaux, circulation des engins…). La phase de travaux dans le lit en eau peut être à l'origine d'un relargage de matière en suspension. Dans les zones où la marne est affleurante l'impact sera plus limité en raison de l'absence de sédiments.

2.6.3. Modalités de réalisation des travaux

2.6.3.1. Déroulement des travaux

Les travaux seront réalisés en période d'étiage pour limiter les impacts sur l'environnement et éviter les risques de crue pour le chantier. La zone de travaux est isolée des écoulements de la Loire par la mise en place d'un merlon/batardeau de chantier.

(1) Deux pistes d'accès (sur chaque rives) sont premièrement réalisées. A noter que les pistes en rive droite cheminent dans des parcelles privées.

(2) Un batardeau constitué de matériaux alluviaux et blocs permettant d'isoler la rive droite sont ensuite créés. Celui-ci permet la construction de la partie en rive droite des épis. Le batardeau en aval fait environs 2.8 m de haut, 3m en crête et 15 en pied sur 100m linéaires. Ce qui représente un volume de l'ordre de 2 500m^3 de matériaux. Il permet le passage d'un débit de l'ordre de 100m^3/s.

Cette capacité est suffisante pour supporter les éclusés quotidiens réalisés par EDF (80 m3/S au maximum).

(3) Une fois l'épi achevés sur la demi largeur rive droite, le batardeau est basculé en rive gauche. L'écoulement est alors en rive droite et la construction de la partie en rive gauche peut avoir lieu à sec.

(4) Une fois cette étape achevée, le batardeau est enlevé en comblant l'amont de l'épi

(5) Pour finir, les pistes d'accès sont enlevées et les emprises remises en état.

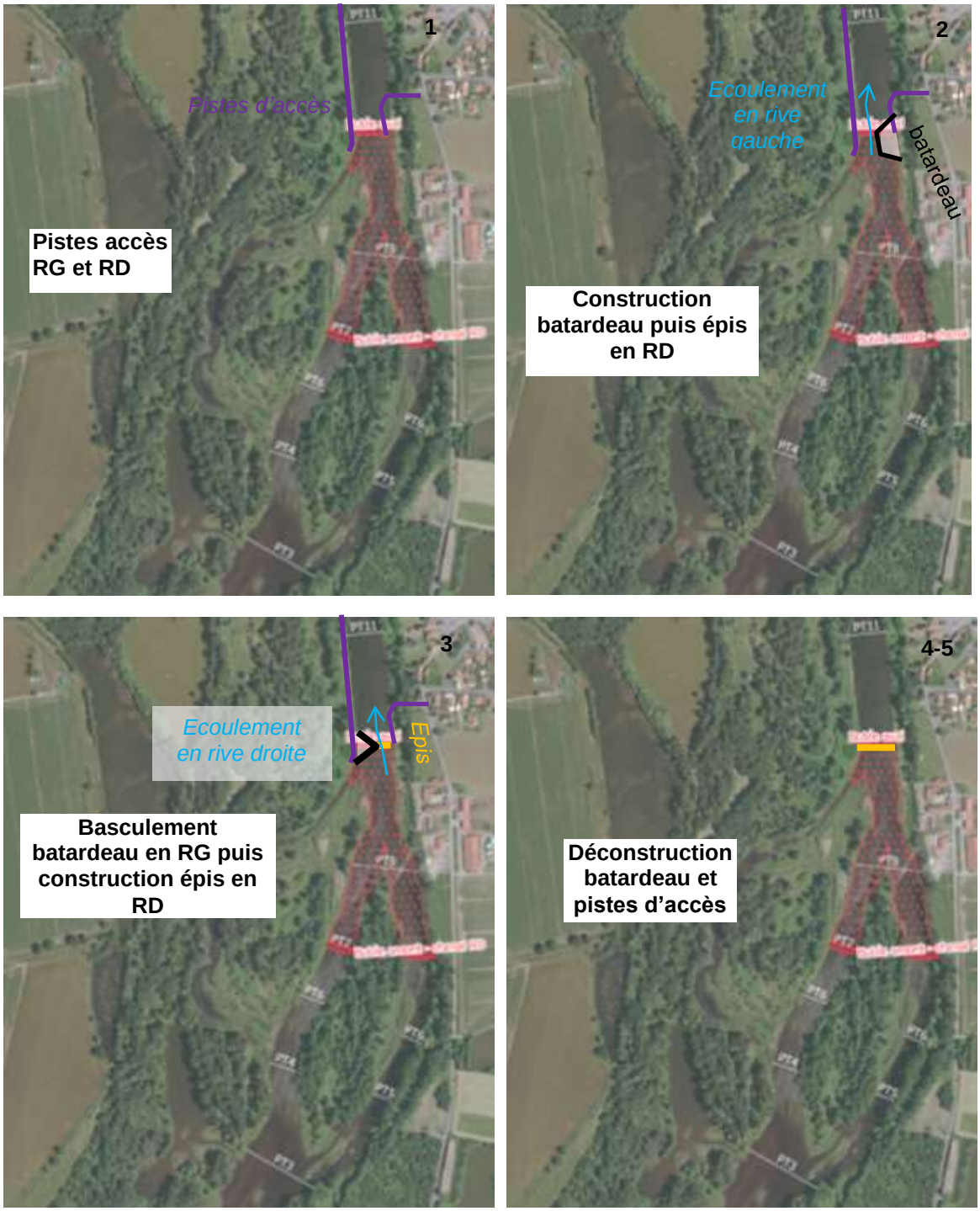


Fig. 113. Déroulement des travaux

2.6.3.2. Accès et piste de chantier

Une piste et rampe d'accès sont réalisées sur chaque rives (voir ci-avant).

En ive gauche, la parcelle concernée par ces pistes appartient au FNE Loire.

En rive droite, les parcelles concernées sont les parcelles A75 et A660 dont le propriétaire n'est pas connu à ce stade.

Lors de la mise en place des batardeaux et de l'épis, la portance de la marne peut amener à des difficultés de chantier en fonction de sa portance. Il sera préférable de procéder à une reconnaissance complémentaire afin de s'en assurer.

2.6.3.3. Prise en compte des enjeux environnementaux

Aux vues des enjeux écologiques identifiés, les préconisations suivantes permettront de réduire les impacts environnementaux de la phase travaux :

- Période d'intervention adaptée à la faune piscicole (août à octobre). Cette période limitera également en partie les impacts sur la faune et la flore des berges lors de la création des accès.
- Gestion des plantes exotiques envahissantes. De nombreuses espèces exotiques sont présentes au niveau des berges et des milieux terrestres (Renouée, Balsamine de l'Himalaya, Séneçon du Cap, Ambroisie à feuilles d'armoise…) mais également dans le milieu aquatique (Elodée)
- Mesures de réduction intégrées aux phases de chantier (suivi environnemental du chantier, balisage préalable de l'emprise de la zone de travaux…)
- La réalisation du batardeau se fera d'amont vers l'aval. Lors de la mise en place du batardeau, des MES (matières en suspension) seront relarguées. Cette situation est difficilement évitable. Une pêche de sauvegarde sera mise en œuvre afin de minimiser l'impact sur la faune aquatique. Une fois le batardeau achevé, un écoulement dans l'enceinte du batardeau est toujours possible (percolation à travers les matériaux imperméables). Avant rejet au lit mineur en dehors de l'enceinte du batardeau, les eaux seront décantés au travers de barrages de matériaux de type gravette. Suivant les demandes spécifiques des services de l'état un suivi peut être réalisé pendant les travaux de mise en place des batardeaux. Si la situation hydraulique au moment semble trop critique vis-à-vis de la préservation des espèces, les travaux peuvent être stoppés momentanément.

2.6.3.4. Calendrier et phasage

Etant donné les enjeux environnementaux (période pour la faune propice de septembre à novembre) et les contraintes liées à l'hydrologie (crues en courantes novembre), la période de travaux la plus propice est la période aout-septembre.

On présente ci-après un calendrier prévisionnel de la réalisation des travaux.

Phase	Aout				Septembre			
Création accès - apport matériel - installation travaux								
Construction batardeaux depuis RD								
Construction encrage et épis - RD								
Remblais - RD								
Bascule batardeau pour RG								
Construction batardeau depuis RG								
Construction encrages et épis - RG								
Déconstruction batardeau et fin de chantier								

2.6.4. Estimation des coûts

Le chiffrage est effectué sur la base de l'expérience du bureau d'étude en maîtrise d'œuvre de travaux similaires.

Désignation de la nature des travaux	unité	Quantité	Prix unitaire HT (€)	Montant HT (€)
Etudes préliminaires				***35 000 €***
Mesures topographiques complémentaires	F	1	10 000 €	15 000 €
Investigations géotechniques	F	1	8 000 €	8 000 €
Etude projet	F	1	12 000 €	12 000 €
Maîtrise d'œuvre	F	1	28 555.20 €	***28 555 €***
Installation chantier/frais généraux/divers	F	1	39 660 €	***39 660 €***
Batardeaux chantier (RG et RD)	F	1	25 000 €	***25 000 €***
Pêche électrique	F	1	2 500 €	2 500 €
Remblais apport et mise en batardeau, pour phasage 1	m^3	2500	5 €	12 500 €
Reprise et mise en remblai des déblais (batardeau) pour phasage 2	m^3	2500	1 €	2 500 €
Evacuation du reliquat	m^3	2500	3 €	7 500 €
Travaux préparatoires				***7 000 €***
Débroussaillage	m^2	3000	2 €	6 000 €
Déboisement	u	10	100 €	1 000 €
Enrochements				***160 000 €***
Amenée et pose des enrochements sur les épis	m^3	2000	80 €	160 000 €
Reprise berges				***900 €***
Reprofilage berges 1/1	ml	150	6 €	900 €
Voirie				***5 400 €***
Piste circulation engins : fourniture et mise en œuvre des matériaux	ml	300	18 €	5 400 €

Sous-total HT	**301 515 €**
Imprévus (20%)	60 303 €
Total HT	**361 818 €**

2.6.5. Etudes complémentaires

Les études suivantes (AVP / Projet) devront inclure les points suivants :

- Afin d'affiner le chiffrage des travaux un levé topographique sera nécessaire à la réalisation des étapes suivantes. La zone d'implantation des épis fera l'objet d'un relevé au 1/100 sur son emprise, afin de réaliser des profils en travers précis.
- Faire un essai pour vérifier la portance de la marne vis-à-vis de la circulation des engins de chantier :
  - Soit par la réalisation de sondages à la pelle depuis la berge pour, de visu, attester de la compacité ou non de la marne
  - Soit réaliser des sondages carottés en haut de berge et prélever à la hauteur correspondant à la marne un échantillon intact pour essai labo de compacité.

2.6.6. Approche réglementaire

Les démarches administratives à réalisation du projet sont présentées ci-après. La réalisation du projet nécessitera un dossier d'autorisation au titre de la loi sur l'eau. Un dossier de Demande d'Autorisation Environnementale devra donc être établi.

La nécessité d'une étude d'impact (évaluation environnementale) n'est pas à écarter étant donné la nature des travaux, mais reste à l'appréciation de l'administration. Dans ce sens un travail de concertation et d'échange en amont paraît indispensable afin de bien cadrer le contexte réglementaire du projet, notamment vis-à-vis de la nécessité de réaliser un dossier de dérogation espèces protégées. Une étude naturaliste complémentaire sera nécessaire pour la réalisation des dossiers règlementaires à adapter au site et selon le cadrage avec la DREAL. En effet des un diagnostic actualisé intégrant les données de FNE (Ecopôle) sera nécessaire.

Nomenclature IOTA	Demande d'Autorisation au titre de Rubrique 3.1.1.0 Installations, ouvrages, remblais et épis, dans le lit mineur d'un cours d'eau Possible concernant la rubrique 3.1.5.0 : Destruction de frayères, sur une surface de plus de 200m² Possible concernant la rubrique 3.1.2.0 : Modification du profil en long et en travers sur une longueur supérieur à 100 m.
Evaluation environnementale	Examen au cas par cas au titre de Catégorie 10. Canalisation et régularisation des cours d'eau
Evaluation des incidences Natura 2000	Oui Site Natura 2000 directive habitats (ZSC) : Milieux alluviaux et aquatiques de la Loire - FR8201765 Site Natura 2000 directive oiseaux (ZPS) : Plaine du Forez FR8212024
Dérogation espèces protégées	Possible présence d'espèces avec un statut de protection sur les berges, potentiellement impactées lors de la phase travaux Nécessite un cadrage avec la DREAL

Demande de défrichement	Non

3. PROTOCOLE DE SUIVI

3.1. SUIVI HYDRAULIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE

3.1.1. Suivi a minima

Suivi « Time lapse » :

Installation d'un appareil photo dans une boite étanche en haut d'un arbre à proximité des sites, qui prend 3 photos / jour. Cet outil permet de voir l'évolution du matelas alluvial, en particulier « avant-après crue ». En complément, reconnaissances visuelles et photographies complémentaires au moment de la récupération des fichiers (tous les 6 mois environ, peut être plus fréquent au début).

Outil facile à mettre en place, peu coûteux, et utile à la fois pour l'analyse et pour la communication.

Installation au début de travaux (permet ainsi de suivre aussi l'avancement des travaux), puis récupération des images 2 fois par an.

Coût 200 € pour le dispositif, 1000 € pour l'installation

Suivi ponctuel :

- **Visite de site** par un expert hydraulique / géomorphologue :
- **Relevés bathymétriques** au niveau du matelas alluvial, en amont, et en aval. Il est possible de se baser sur les profils relevés dans le cadre de la présente étude
- **Cartographie de la zone d'alluvions** (emprise)
- **Granulométrie de surface** : protocole de type Wolmann à l'étiage, ou à partir de photographies aquatiques pour tout débit.
- **Suivi colorimétrique :** installation de bandes colorées (peinture de marquage) à sec à l'issue des travaux. Suivi visuel de l'évolution de ces bandes jusqu'à leur disparition.

Etat initial (pré travaux), état après travaux, puis suivi années n+1, n+3, n+5, et n+10 et si crue importante.

Coût : 8000 € par année de suivi

3.1.2. Suivi complet

Sur la base du suivi a minima, avec les mesures complémentaires suivantes :

-
- Relevés bathymétrique affinés, notamment au niveau du matelas alluvial
- Suivi du colmatage – méthode Datry. Si au cours des 2 premiers suivi (n+1 et n+3) il est avéré que le colmatage du matelas alluvial n'est pas un enjeu, ce suivi peut être abandonné.
- Suivi du déplacement des particules par « pit tags » actifs (qui n'ont pas besoin d'être insérés dans des galets). Les pits tags peuvent être mis en place au moment des travaux, à 2 niveaux :
    - A la base du matelas alluvial, au niveau des marnes,

- Sous la couche de « pavage » de granulométrie plus importante.

Ces pits tags sont repérés en x, y et z au moment de l'installation. Au moment du suivi, on vient vérifier si les pit tags sont toujours en place. S'ils sont partis, cela signifie que les sédiments ont été mobilisés. Cette information concerne la « couche de mobilité ». Elle est complémentaire du suivi bathymétrie.

Etat initial (pré travaux), état après travaux, puis suivi années n+1, n+3, n+5, et n+10 et si crue importante.

Cout : 16 000 € par année de suivi et par site (y compris les éléments du suivi a minima)

+ 7000 € par site la première année pour l'installation des pit tags (3000 € de matériel, et 4000 € d'installation).

Dans le cadre de l'ensemble des actions de restauration prévues sur la Loire, on recommande un suivi du transport sédimentaire à l'échelle de la Loire Forézienne à l'aide de pit tags passif insérés dans des galets au niveau des sites de réinjection (en particulier le site de Saint-Juste-Saint Rambert, situé en amont de la zone d'étude).

3.2. SUIVI ECOLOGIQUE

3.2.1. Suivi a minima

Visite de site par un écologue :

Le suivi consistera en une analyse de l'état écologique du lit sur le terrain. L'expertise portera sur le secteur restauré et des secteurs amont et aval, non restauré pour comparaison. Le suivi comportera un compte rendu de la visite terrain détaillant la méthode et une analyse des observations.

Concernant le site de l'Ecopôle, FNE effectue un suivi et un entretien de la frayère à Brochet en rive gauche. Les données acquises, en particulier la mise en eau de la frayère, pourront être intégrées au suivi afin d'évaluer l'influence des aménagements.

Un suivi écologique est préconisé aux années n+2 ; n+5 ; n+10 ; n+15

Coût : 1 500 € par année de suivi.

3.2.2. Suivi complet

Inventaires des frayères :

Un inventaire des frayères sera réalisé sur le site restauré et à proximité dans des stations non restaurées. L'inventaire consistera en un parcours des sites d'inventaires préalablement définis. Chaque frayère identifiée sera localisée par GPS. Les données suivantes seront également recueillies :

- type de substrat,
- hauteur d'eau,
- dimensions de la frayère,
- faciès d'écoulement (rapides, radiers, plats courants, les profonds courants, autres faciès lentiques…),
- granulométrie du substrat,

- problèmes de colmatage…

Ce suivi nécessite la réalisation d'un état de référence avant travaux afin de comparer les résultats.

Ainsi le suivi des frayères est préconisé aux années n-1 ; n+2 ; n+5 ; n+10 ; n+15

Coût : 7 000 € par année de suivi

Inventaire des macro-invertébrés benthiques :

Un suivi des macro-invertébrés benthiques sera réalisé selon les normes en vigueur. L'analyse sera effectuée sur la base de différents indices, IBG-DCE et I2M2. L'outil de diagnostic associé à l'I2M2 pourra être utilisé pour évaluer spécifiquement le projet de reconstitution du matelas alluvial. Les diverses métriques de l'outil de diagnostic pouvant contribuer à identifier un risque de colmatage pourront être étudiées.

Ce suivi nécessite également la réalisation d'un état de référence avant travaux afin de comparer les résultats.

Ainsi le suivi des macro-invertébrés est préconisé aux années n-1 ; n+2 ; n+5 ; n+10 ; n+15

Coût : 4 000 € par année de suivi

4. ELEMENTS D'ANALYSE ET DE PHASAGE

Il paraîtrait cohérent de réaliser ces actions de l'aval vers l'amont, les aménagements pouvant donner lieu à une rupture temporaire de la continuité sédimentaire.

Par ailleurs, certaines actions envisagées doivent être couplées à d'autres actions de SAGE :

Site de Craintilleux :

- Désenrochement du site de Montrond-les-Bains amont (Etude érosion latérale, AVP4)
- Arasement des bancs de Rivas en amont et en aval du pont (Etude d'arasement des bancs, sites 7, 8, et 9 pour l'AVP1, site 7 seulement pour l'AVP 3).

Site de l'Ecopôle :

- Désenrochement du site de Marclopt aval (Etude érosion latérale, AVP7)
- Décaissement de la berge au niveau du site de Marclopt amont (Etude érosion latérale, AVP6) pour les AVP 1 et 2.

Ces actions doivent être réalisées soit de façon synchronisées, ou alors la restauration du matelas alluvial doit être réalisée après les actions sus citées, auquel cas une zone de stockage pour les matériaux doit être prévue.

Concernant le choix des scénarios, on propose ci-après un tableau récapitulatif des éléments principaux de ces scénarios. Il est à noter que compte-tenu des incertitudes du modèle hydraulique au niveau du site de Craintilleux, on recommande d'affiner l'analyse présentée dans le cadre d'une étude de modélisation complémentaire.

Tabl. 7 - Récapitulatif des Scénarios, site de Craintilleux

	AVP 1	AVP 2	AVP 3
Nombre de butées	2, profils 5 et 10	1 butée de faible hauteur	1, profil 8
Taille des matériaux de la butée	LM 10/60	LM 40/200	LM40/200
Volume de la butée	1 300 m³	200 m³	630 m³
Volume matelas alluvial	30 000 m³	5 200 m³	16 000 m³
Diamètre stable du matelas alluvial pour la crue de 2008 (Q50)	33 cm	28 cm	35 cm
Diamètre recommandé pour le « pavage »	10-20 cm (stable Q10 / Q20)	10-20 cm (stable Q10 / Q20)	13-25 cm (stable Q10 / Q20)
Surface de marnes protégées	5.9 Ha + 1.3 Ha suite remplissage butée amont	2.4 Ha	3.6 Ha
Efficacité du dispositif	Efficacité très probable entre les deux butées, risque de déstructuration en cas de grande crue. Efficacité mal connue en amont	Efficacité très probable sur l'ensemble du seuil	Efficacité probable, mais risque de déstructuration en cas de grande crue
Conséquences sur l'hydraulique	Rehausse ligne d'eau de 30 à 50 cm localement	Très faible	Rehausse ligne d'eau de 20 à 30 cm localement
Conséquences sur l'écologie	Effet positif	Effets positifs, mais gros blocs moins favorables.	Effet positif
Coût (HT)	609 897 €	422 879 €	538 065 €

Tabl. 8 - Récapitulatif des Scénarios, site de l'Ecopôle

	AVP 1 – triple butée	AVP 2 – simple butée	AVP 3 – épis à échancrure
Nombre de butées	3, profils 7, 8 et 10	1, profil 10	Pas de butée, mais deux épis profil 10
Taille des matériaux de la butée	LM 5/40	LM 5/40	LM40/200
Volume des butées	700 m^3	460 m^3	400 m^3
Volume matelas alluvial	14 000 m^3	12 300 m^3	0 m^3
Diamètre stable du matelas alluvial pour la crue de 2008 (Q50)	6 cm	7 cm	NA
Diamètre recommandé pour le « pavage »	4.5-15 cm	4.5-15 cm	NA
Surface de marnes protégée	2.8 Ha + 4.3 Ha suite remplissage butée amont	7.5 Ha	Inconnue
Efficacité du dispositif	Efficacité très probable entre les butées amont et aval, moins sûre en amont	Efficacité très probable là où le matelas est présent, mais seuil chenal rive droite trop haut pour être protégé par cette solution	Efficacité à valider.
Conséquences sur l'hydraulique	Très faible impact en crue. Rehausse de la ligne d'eau à l'étiage, favorable à la frayère.	Très faible impact en crue. Rehausse de la ligne d'eau à l'étiage, favorable à la frayère, mais moins favorable que la solution 1.	Très faible impact pour les débits de crues et pour les débits d'étiage.
Conséquences sur l'écologie	Effet positif	Effets positifs	Effet positif
Coût (HT)	343 357 €	324 903 €	361 818 €

ANNEXE 1

PROPOSITION DE SCENARIOS – PRESENTATION DE LA REUNION COPIL DU 25/11/2019

ANNEXE 2

COMPTE-RENDU DE LA REUNION COPIL DU 25/11/2019

ANNEXE 3

PRESENTATION DES SCENARIOS : NOTE TECHNIQUE DIFFUSEE AUX MEMBRES DU COPIL

ANNEXE 4

PROFILS TOPOGRAPHIQUES DU SITE DE CRAINTILLEUX

ANNEXE 5

PROFILS TOPOGRAPHIQUES DU SITE DE L'ECOPOLE