

EMETTEUR MTBE SA	Date 27/09/2024
OBJET Projet hydroélectrique L'Isle-sur-le-Doubs	
CONTENU DU DOCUMENT Mémoire technique d'autorisation unique pour l'installation de deux centrales hydroélectriques sur la commune de l'Isle-sur-le-Doubs	



HydroReturn

DEMANDEURS Hydroreturn Représenté par Guilhem de Roquefeuil 8 rue du Château - 21230 Musigny SEM ENR CITOYENNE Représenté par Jean-Daniel MAIRE 1 rue Maurice Chevassu 39000 Lons le Saunier	REALISATION Laurent Dewandre Nicolas Bahiani
MTBE SA Avenue Guillaume d'Orange 111, B-4100 Seraing Belgique Tel : +32 (0)4 325 08 00 Mail contact : hydro@mtbe.be Web : www.mtbe.be	REVUE ET VALIDATION Stéphane Verraes
	REFERENCE 24_EXP_029_v02

Table des matières

1. Objet.....	7
2. Situation existante	7
2.1. Reportage photographique.....	8
2.2. Relevés bathymétriques et topographiques	17
2.3. Ouvrages.....	17
2.3.1. Seuil principal	17
2.3.1. Seuil secondaire	17
2.3.2. Buses de prise d'eau des anciennes forges	17
2.3.3. Canal de fuite.....	18
2.3.4. Accès	18
3. Analyse hydrologique.....	19
3.1. Station de mesures des débits.....	19
3.2. Plage de débits pris en considération	20
3.3. Rapport de superficie de bassin versant et particularités du site	20
3.4. Analyse des données	21
3.4.1. Évolution des débits.....	21
3.4.2. Statistiques des données.....	23
4. Situation projetée et objectifs visés.....	25
4.1. Seuil de dérivation.....	25
4.2. Seuil de retenue dans le petit Doubs	26
4.3. Centrales.....	26
4.4. Turbines.....	27
4.5. Vantellerie.....	28
4.5.1. Vannes de garde.....	28
4.5.2. Vannes de décharge.....	29
4.6. Plans de grilles et prises d'eaux.....	30
4.7. Éléments électromécaniques.....	30
4.7.1. Sondes de niveaux.....	31
4.8. Circulation.....	31
4.9. Entretien et rectification du petit Doubs	31
4.10. Ouvrages de génie civil.....	32
5. Débit réservé	33

6.	Allocation de débits et régime de gestion des niveaux d'eau.....	33
7.	Étude hydraulique.....	35
7.1.	Données d'entrée.....	36
7.1.1.	Débits d'intérêts.....	36
7.1.2.	Données topographiques et bathymétriques.....	36
7.1.3.	Campagne de mesure des niveaux d'eau.....	36
7.2.	Méthodologie.....	41
7.3.	Modélisation de la situation existante.....	42
7.3.1.	Considérations générales.....	42
7.3.2.	Calage de la condition aval.....	44
7.3.3.	Calibrage du seuil.....	45
7.3.4.	Calibrage de l'amont du tronçon court-circuité.....	45
7.3.5.	Calibrage des ouvrages.....	47
7.3.6.	Calibrage des coefficients de Manning.....	47
7.4.	Modélisation de la situation projetée.....	47
7.4.1.	Considérations générales.....	47
7.4.2.	Dimensionnement des ouvrages.....	49
7.4.3.	Curage.....	51
7.4.4.	Allocation des débits.....	52
7.4.5.	Résultats.....	53
8.	Continuité écologique.....	56
8.1.	Transit sédimentaire.....	56
8.1.1.	Situation existante.....	56
8.1.2.	Situation projetée.....	57
8.1.3.	Charriage.....	57
8.1.4.	La suspension.....	57
8.2.	Continuité piscicole.....	58
8.2.1.	Situation existante.....	58
8.2.2.	Passé à poissons.....	58
8.2.3.	Dévalaison.....	64
9.	Méthodologie de mise en œuvre.....	69
9.1.	Chantiers principaux - Centrales.....	69
9.1.1.	Installation de chantier.....	69
9.1.2.	Aménagement des accès.....	70

9.1.3.	Mise en place des batardeaux	70
9.1.4.	Mise à sec de la zone de chantier.....	72
9.1.5.	Excavations	75
9.1.6.	Mise en œuvre des ouvrages de génie civil.....	76
9.1.7.	Installation des éléments électromécaniques.....	76
9.1.8.	Génie civil de seconde phase	76
9.1.9.	Remise en état du site	77
9.2.	Finalisation des chantiers	77
9.2.1.	Installation des locaux techniques.....	77
9.2.2.	Mise en service et raccordement électrique.....	77
9.3.	Travaux d'entretien du seuil principal et de l'entrée du petit Doubs	77
9.3.1.	Mise à sec du seuil.....	78
9.3.2.	Inspection des affaissements	78
9.3.3.	Réparation des affaissements	78
9.4.	Constat d'huissier et remise en état des sites.....	79
9.5.	Planning	79
10.	Phase d'exploitation.....	81
10.1.	Le pilotage.....	81
10.1.1.	Capteurs	82
10.1.2.	Contrôle commande	83
10.1.3.	Organes de régulation	84
10.2.	Régime hydraulique en situation projetée	84
10.3.	Entretien et suivi de la centrale.....	85
10.4.	Moyens d'interventions en cas d'incident.....	86
10.5.	Production électrique	86
10.5.1.	Productibles escomptés au Moulin.....	88
10.5.2.	Productibles escomptés aux Forges.....	89
10.6.	Analyse financière succincte.....	90
11.	Conclusions.....	91

Liste des figures

Figure 1 : Organisation spatiale au droit du site.....	8
Figure 2 : Vue aérienne des prises de vue (PV) ci-dessous.....	9
Figure 3 : PV1 - Vue vers le seuil depuis la rive droite (source : MTBE, 2022).....	10
Figure 4 : PV2 - Vue vers le seuil depuis la rive gauche (source : Nourry Geo-Environnement, 2021).....	11
Figure 5 : PV3 - Vue vers le seuil sur le petit Doubs depuis l'amont (source : Nourry Geo-Environnement, 2021).....	12
Figure 6 : PV4 - Vue vers le seuil sur le petit Doubs depuis la rive droite (source : Nourry Geo-Environnement, 2021).....	13
Figure 7 : PV5 a et b - Vue vers les buses - Amont (source : MTBE, 2022).....	14
Figure 8 : PV6 - Vue vers les buses - Aval (source : Nourry Géo-Environnement, 2021).....	15
Figure 9 : PV7 - Vue vers les arches et le canal de fuite (source : MTBE, 2022).....	16
Figure 10 : PV8 - Vue vers le canal de fuite et le Doubs (source : MTBE, 2022).....	16
Figure 11 : Qualité et disponibilité des données hydrologiques au niveau de la station Doubs à Voujeaucourt (source : hydro.eaufrance.fr).....	20
Figure 12 : Évolution annuelle des débits, pour une année sèche, humide et moyenne (source données : Hydro.eaufrance.fr).....	22
Figure 13 : Débits classés annuels, pour une année sèche, humide et moyenne (source : Hydro.eaufrance.fr).....	23
Figure 14 : Dégradation du seuil de dérivation.....	26
Figure 15 : Extrait de la cartographie du bassin du Rhône (Le Doubs) Pl.8.....	33
Figure 16 : Localisations des sondes de niveaux d'eau amont pour la campagne de mesure des niveaux d'eau.....	37
Figure 17 : Évolution du niveau d'eau amont mesuré.....	38
Figure 18 : Évolution du niveau d'eau amont mesuré.....	39
Figure 19 : Localisation des profils relevés dans le tronçon court-circuité.....	40
Figure 20 : Schématisation du modèle hydraulique utilisé.....	43
Figure 21 : Profil en long du segment concerné du Doubs.....	43
Figure 22 : Profil en long du segment concerné du Doubs.....	44
Figure 23 : Schématisation du modèle à l'amont du TCC.....	46
Figure 24 : Profil en long au droit du seuil principal issus des plans (annexe 8).....	56
Figure 25 : Représentation schématique d'une passe à enrochements régulièrement répartis... ..	60
Figure 26 : Vue 3D de la passe à poissons.....	61
Figure 27 : Protection du bords amont des pales.....	65
Figure 28 : Assemblage de la vis et de l'auge.....	66
Figure 29 : profil de simulation hydraulique de la goulotte (HEC-Ras).....	68
Figure 30 : Vue sur la parcelle cadastrale n°AK/0346 et la zone de stockage sécurisée (source : Google StreetView, 2022).....	70
Figure 31 : Évolution des débits journaliers 2003-2021 observés au niveau du site en projet, pour la période de travaux (source : hydro.eaufrance.fr).....	72
Figure 32 : Schématisation du fonctionnement par automate d'une centrale hydroélectrique....	82
Figure 33 : Productibles escomptés au Moulin pour la période 2003-2022.....	88
Figure 34 : Productibles escomptés aux forges pour la période 2003-2022.....	89

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques de la station de mesure des débits (station : le Doubs à Voujeaucourt)	19
Tableau 2 : Débits minimums, maximums et moyens (en m ³ /s) sur le Doubs au droit du projet (source : Hydro.eaufrance.fr).....	21
Tableau 3 : QMNA5 au niveau de la station de mesure de Voujeaucourt et au droit du projet (données sur la période 11/1996 au 04/2022, source : Hydro.eaufrance.fr).....	23
Tableau 4 : Fréquences d'observation des débits moyens sur le Doubs au droit du projet (source : Hydro.eaufrance.fr).....	24
Tableau 5 : Caractéristiques principales des centrales hydroélectriques.....	27
Tableau 6 : Caractéristiques techniques des turbines projetées (sources : constructeurs).....	27
Tableau 7 : Caractéristiques des vannes de garde.....	29
Tableau 8 : Caractéristiques des vannes de décharge.....	29
Tableau 9 : Caractéristiques des plans de grille	30
Tableau 10 : Régimes de gestion des ouvrages et de régulation du niveau d'eau	34
Tableau 11 : Relevés des niveaux d'eau dans le tronçon court-circuité	40
Tableau 12 : Niveaux d'eau interpolés à la confluence pour chaque débit cible.....	44
Tableau 13 : Niveaux d'eau interpolés au seuil pour chaque débit cible.....	45
Tableau 14 : Résultats des niveaux d'eau aux différents profils du tronçon court-circuité après calibrage des coefficients de Manning (Q =122 m ³ /s).....	46
Tableau 15. Coefficients des ouvrages.....	47
Tableau 16. Caractéristiques des groupes de production hydroélectrique.....	47
Tableau 17 : Loi d'ouvrage et coefficients de débit de chaque ouvrage.....	51
Tableau 18 : Niveaux de reprofilage proposés.....	51
Tableau 19. Allocation des débits en situation projetée	52
Tableau 20. Évolution des niveaux d'eau (NE) amont et aval et de la chute en situation projetée pour les débits caractéristiques et en condition de centrale en fonctionnement.....	53
Tableau 21 : Résultats hydrauliques à la centrale du Moulin (intégrant les pertes de charge à la grille)	54
Tableau 22 : Résultats hydrauliques à la centrale des Forges (intégrant les pertes de charge à la grille)	54
Tableau 23 : Allocation de débit et niveaux d'eau au grand seuil - hautes eaux, centrales à l'arrêt	55
Tableau 24 : Caractéristiques de la passe à poissons.....	59
Tableau 25 : Évolution des niveaux d'eau dans le TCC.....	62
Tableau 26 : Caractéristiques dimensionnelles de la passe à poissons.....	63
Tableau 27: Paramètres de fonctionnement hydraulique de la passe selon plusieurs profondeurs	64
Tableau 28 : Caractéristiques des vis hydrodynamiques.....	65
Tableau 29 : Caractéristiques de la goulotte de dévalaison	67
Tableau 30 : Exemple de dimensionnement type d'un bassin de décantation	74
Tableau 31 : Planning général estimé de mise en œuvre	80
Tableau 32 : Catégories de capteurs prévus pour la centrale.....	83
Tableau 33 : Moyens de régulation du niveau d'eau amont.....	85
Tableau 34 : Analyse financière succincte.....	90

1. Objet

Le projet de centrales hydroélectriques de L'Isle-sur-le-Doubs (25250) a fait l'objet d'un développement technique en phase d'avant-projet. Le présent document est rédigé pour communiquer l'ensemble de ces éléments et expliquer les choix de développement retenus.

L'objectif du développement ici renseigné est multiple :

- Optimiser la production d'électricité à partir de la force motrice de l'eau du Doubs ;
- Assurer la bonne fonctionnalité et la pérennité de l'ensemble des ouvrages, en ce compris, les ouvrages de franchissement piscicole ;
- Apporter une logique de gestion et de fonctionnement entre les différents ouvrages ;
- Assurer la sécurité du site existant ;
- Adopter une démarche qui puisse être identifiée au travers des trois piliers du développement durable (social, environnemental et économique).

Ce mémoire fera état de la situation existante ainsi que du contexte hydrologique. La situation projetée sera ensuite présentée. Enfin, les modalités et résultats d'exploitation seront illustrés afin que le lecteur puisse se faire une vision globale et complète du projet.

2. Situation existante

Le projet est localisé sur la commune de l'Isle-sur-le-Doubs. Il vise à construire deux centrales hydroélectriques :

- La centrale de l'ancien moulin
- La centrale des forges

La centrale des forges se trouve au niveau du parc municipal derrière la mairie et son parking sur une île située entre deux bras du cours d'eau – le Doubs et le Petit Doubs. Pour atteindre la parcelle concernée par le projet, il convient de passer à gauche de la mairie et au niveau du parking, le canal de fuite des anciennes forges est bien visible. Il s'agit du site des anciennes forges Japy de L'Isle-sur-le-Doubs.

La centrale du moulin se trouve sur le petit Doubs 110 m en aval du pont de la D683. Elle est actuellement composée par un seuil de retenue, des vannes de régulation et d'une passerelle.

Le site du projet est composé d'un seuil de déviation des eaux vers un chenal en rive droite qui mène ensuite à un second seuil. Les deux bras du Doubs se rejoignent ensuite à l'aval, mais également via des buses qui passent sous l'îlot central de la commune. Le tronçon du Doubs situé entre le seuil et la confluence des deux bras est donc court-circuité (TCC). Par abus de langage, le bras principal est appelé le Doubs tandis que le bras secondaire est surnommé le petit Doubs.

L'organisation spatiale des ouvrages au droit du site est présentée dans la photographie aérienne ci-dessous.

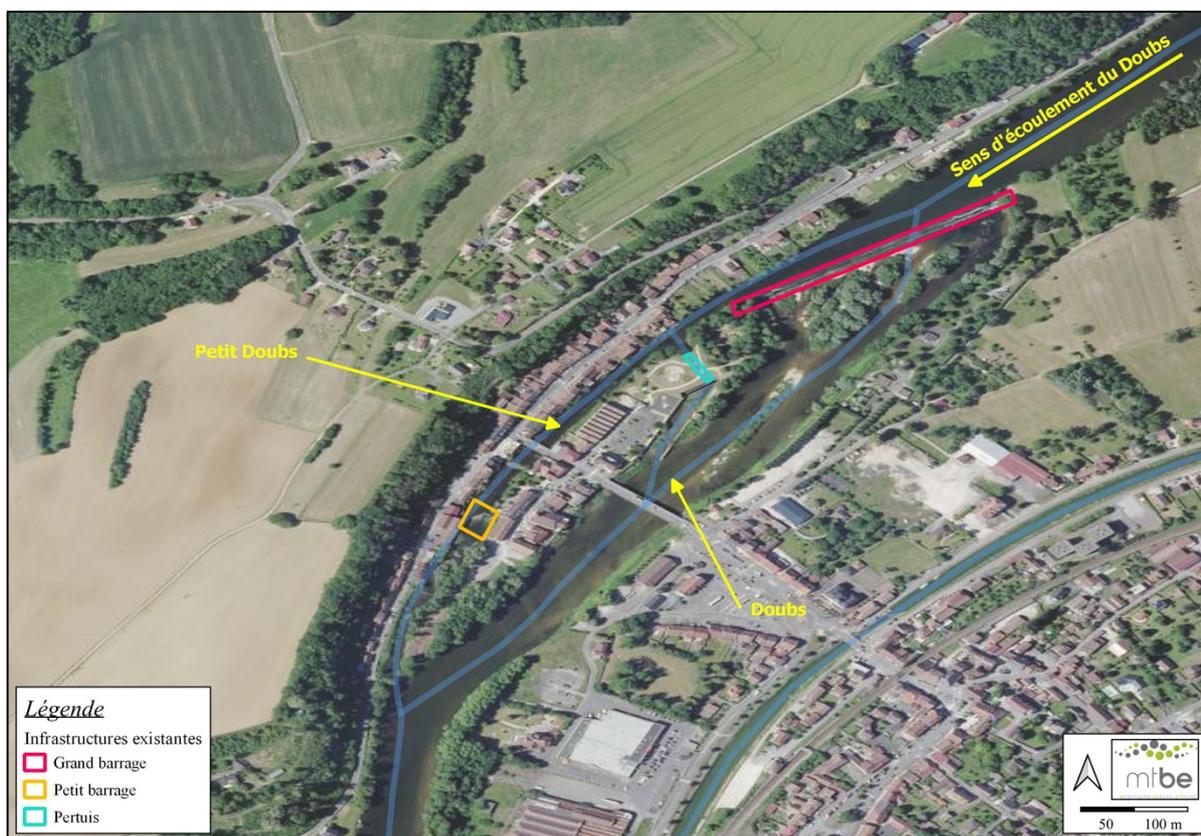


Figure 1 : Organisation spatiale au droit du site

Les ouvrages actuels au niveau de L'Isle-sur-le-Doubs sont décrits ci-après.

2.1. Reportage photographique

Afin de faciliter la compréhension de lecture et d'illustrer les propos qui seront tenus dans ce document, il est proposé au lecteur un reportage photographique mettant en lumière les éléments et ouvrages clés du site.



Figure 2 : Vue aérienne des prises de vue (PV) ci-dessous



Figure 3 : PV1 - Vue vers le seuil depuis la rive droite (source : MTBE, 2022)



Figure 4 : PV2 - Vue vers le seuil depuis la rive gauche (source : Nourry Geo-Environnement, 2021)



Figure 5 : PV3 - Vue vers le seuil sur le petit Doubs depuis l'amont (source : Nourry Geo-Environnement, 2021)



Figure 6 : PV4 - Vue vers le seuil sur le petit Doubs depuis la rive droite (source : Nourry Geo-Environnement, 2021)



Figure 7 : PV5 a et b - Vue vers les buses - Amont (source : MTBE, 2022)



Figure 8 : PV6 - Vue vers les buses - Aval (source : Nourry Géo-Environnement, 2021)



Figure 9 : PV7 - Vue vers les arches et le canal de fuite (source : MTBE, 2022)



Figure 10 : PV8 - Vue vers le canal de fuite et le Doubs (source : MTBE, 2022)

2.2. Relevés bathymétriques et topographiques

De manière à appréhender avec exactitude les dimensions et altimétries du site, un relevé topographique et bathymétrique a été opéré en 2020 par la société GeoPlans SAS. Ce relevé visait :

- L'ensemble des ouvrages présents sur le site ;
- Plusieurs profils du cours d'eau choisis de manière à obtenir une bonne représentation du fond de rivière et les premiers mètres du lit majeur. Les niveaux d'eau au jour du relevé ont été relevés au droit de chaque profil relevé.

A la suite des échanges effectués avec la DDT et dans l'objectif principal de caractériser hydrauliquement le Doubs, un second relevé a été réalisé en 2023 par Bathymétrie - Drone.

Ces relevés sont présentés sous forme de plans. Ils sont disponibles en **annexe 8**.

2.3. Ouvrages

2.3.1. Seuil principal

Le seuil permettant l'exploitation de l'énergie hydraulique est d'une longueur de 270 m. Il est situé en rive gauche du Doubs, avec le Petit Doubs en rive droite. Sa crête est variable entre 288,33 et 288,51 mNGF. Le pied du seuil est également variable, entre 286,50 et 286,87 mNGF. Plusieurs affaissements sont constatés tout le long du seuil.

2.3.1. Seuil secondaire

Le seuil secondaire se trouve sur le Petit Doubs, à environ 400 m à l'aval du seuil principal. Il est composé d'une partie déversoir et d'un emplacement accueillant historiquement deux vannes de décharge.

Le déversoir a une longueur totale de 19,4 m. Sa cote est de 288,57 mNGF et le pied du seuil s'élève à 286,51 mNGF. Un affaissement important est observé en rive droite sur une longueur d'environ 1,35 m d'où s'échappe un certain débit

L'emplacement pour les deux vannes ont une largeur de 2,8 m chacun et une cote radier de 287,67 mNGF.

2.3.2. Buses de prise d'eau des anciennes forges

Les buses reliant le Petit Doubs au Grand Doubs sont au nombre de trois, d'un diamètre de 1400 mm. Leur altitude d'entrée (bas des buses) est de 288,20 mNGF et celle de sortie de 287,15

mNGF pour une longueur de 39,1 m, soit une pente de 2,6 %. La largeur totale de l'ouvrage est de 9,25 m.

Ces buses ne sont alimentées qu'en période de hautes eaux.

2.3.3. Canal de fuite

Le canal de fuite est entouré de deux murs en maçonnerie de 120 m de long. La distance séparant ces deux murs est de 19 m. La cote de fond oscille aux alentours de 285,45 mNGF. Cinq atterrissements sont présents dans le canal de fuite, avec une végétation plus ou moins développée.

A l'entrée amont de ce canal de fuite se trouve également une ancienne structure composée de neuf arches en maçonnerie. Les fondations de ces arches se trouvent à environ 285 mNGF et chaque arche a une ouverture de 3,8 m.

2.3.4. Accès

Le projet des 2 microcentrales hydro-électriques se situe sur la commune de l'Isle sur le Doubs dans le département du Doubs. La commune de l'Isle sur le Doubs est située sur l'axe Besançon – Montbéliard à 56 km à l'Est de Besançon et à 24 km à l'Ouest de Montbéliard en empruntant la RD 683. La commune de Baume les Dames est à 25 km à l'Est et la commune de Pays de Clerval à 10 km à l'Est sur la RD 683.

La centrale des forges se trouve au niveau du parc municipal derrière la mairie et son parking sur une île située entre deux bras du cours d'eau – le Doubs et le Petit Doubs. Pour atteindre la parcelle section AK n° 110, il convient de passer à gauche de la mairie et au niveau du parking, le canal de fuite des anciennes forges est bien visible. Il s'agit du site des anciennes forges de l'Isle sur le Doubs.

L'accès au petit Doubs se fera par la route D29 en passant par la parcelle cadastrale A0326 pour la partie centrale hydroélectrique. A l'aval, un accès est prévu à la parcelle AI44, pour la partie pose de batardeau et reprofilage du bief.

Le projet nécessite également d'accéder au seuil via son extrémité gauche. Pour se faire, l'accès se fait par la parcelle 0400 de la section AK.

3. Analyse hydrologique

L'analyse hydrologique permet de déterminer la disponibilité en eau. Celle-ci est illustrée selon plusieurs grandeurs et moyens de représentation :

- Module : débit moyen sur la plage de débits considérés ;
- Étiage quinquennal : débit mensuel minimum dont la probabilité d'apparition est d'une fois tous les cinq ans (QMNA5) ;
- Courbe de débits classés ;
- Percentiles : part de débits minimaux sur une durée déterminée par rapport à une année complète.

Les résultats de cette analyse sont utilisés à plusieurs niveaux dans les études d'avant-projet :

- Dimensionnement et sélection du nombre et du type de turbines ;
- Détermination du débit qui sera réservé au fonctionnement écologique de la rivière ;
- Simulation du productible électrique ;
- Méthodologie de mise en œuvre du projet.

3.1. Station de mesures des débits

L'analyse hydrologique se base sur des données de débits mesurées sur le cours d'eau. Ces mesures sont issues de la station du Doubs à Voujeaucourt (code : U240 2010).

Les caractéristiques de la station sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Caractéristiques de la station de mesure des débits (station : le Doubs à Voujeaucourt)

Code station	U240 2010
Commune	Voujeaucourt (25632)
Cours d'eau	Le Doubs
Superficie de bassin versant	3490 km ²
Date de mise en service	19/11/1991
Qualité globale des mesures en basses eaux	Bonne
Qualité globale des mesures en moyennes eaux	Bonne
Qualité globale des mesures en hautes eaux	Bonne

Les données disponibles sont renseignées dans la page de la station. Une appréciation de la qualité des données est également fournie.

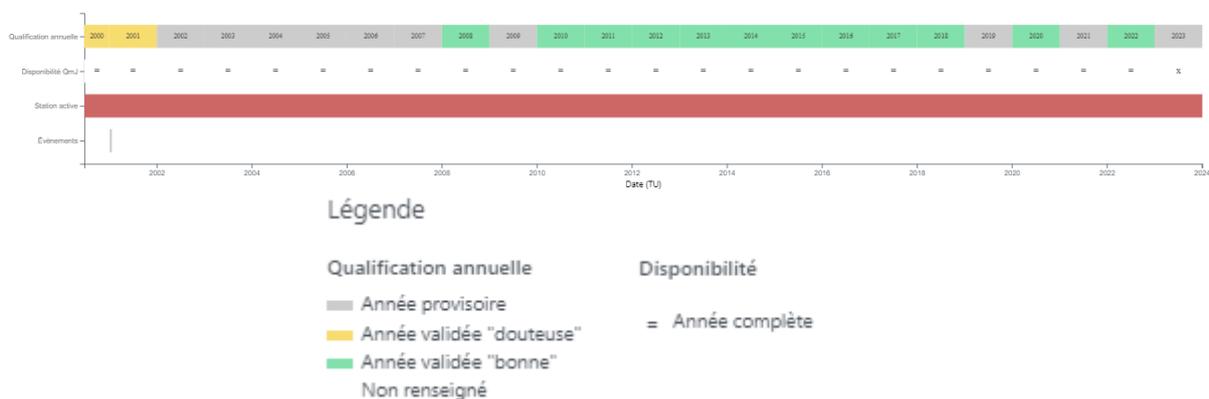


Figure 11 : Qualité et disponibilité des données hydrologiques au niveau de la station Doubs à Voujeaucourt (source : hydro.eaufrance.fr)

Sur base des données disponibles, la plage des débits à analyser a été sélectionnée.

3.2. Plage de débits pris en considération

La sélection de la plage de débit est un enjeu majeur pour la réalisation de l'avant-projet. En effet, les projections faites pour le futur au travers de l'avant-projet se basent sur des données mesurées dans le passé. La sélection doit donc permettre une bonne représentativité des conditions du milieu. La période de changement climatique doit également être prise en compte dans la sélection. Dès lors, la plage de débit ne doit pas être trop longue mais suffisante pour que tous les types d'hydrologie soit pris en considération (années sèches, années humides, répartition variable, etc.).

Du point de vue législatif, l'article L214-18 du code de l'environnement contraint de prendre en considération au moins 5 années consécutives pour la détermination du débit réservé.

Dans ce contexte, la sélection des données de débits porte sur une plage allant de 2003 à 2022, soit une durée de 20 années.

Ces données considèrent les prélèvements pour l'agriculture et sont proches de la situation actuelle, afin de considérer l'impact du changement climatique sur le régime hydrologique du Doubs.

3.3. Rapport de superficie de bassin versant et particularités du site

Les données de débits disponibles sont inhérentes au droit de la station de mesure. Pour adapter les données au site dont il est ici question, un coefficient de superficie de bassin versant est appliqué à chaque mesure. Ce coefficient est le rapport entre les superficies des bassins versants du cours d'eau concerné, au droit de la station et au droit du projet.

La superficie du bassin versant à la station de mesure est renseignée dans la fiche de la station. La superficie du bassin versant au droit du projet doit être déterminé au moyen d'un logiciel SIG (ArcGis, QGis, etc.).

La superficie au droit du projet est de 3800 km², la superficie au droit de la station de mesure est de 3490 km². Dès lors, chaque mesure de débit se verra appliqué le **coefficient 1,089** pour être adaptée au site

3.4. Analyse des données

3.4.1. Évolution des débits

Le tableau ci-dessous reprend les résultats principaux de l'analyse hydrologique au droit du projet. Les données caractéristiques sont reprises pour trois années, l'année sèche, moyenne et humide. Les années humides et sèches sont déterminées sur base de la valeur de leur module et de leurs extrêmes.

Tableau 2 : Débits minimums, maximums et moyens (en m³/s) sur le Doubs au droit du projet (source : Hydro.eaufrance.fr)

	Année moyenne (2003-2022)	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012 Année humide
Min	26,2	5,0	10,5	9,7	8,5	10,1	14,7	8,1	11,4	10,3	23,2
Max	196,1	465,0	772,1	482,4	833,1	663,2	524,9	433,4	670,8	372,4	655,6
Moy.	80,8	51,8	87,4	71,9	115,9	107,0	86,8	64,0	79,6	52,0	120,9
		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022 Année sèche
Min		10,4	13,4	5,7	8,5	5,6	4,6	7,4	6,0	12,9	6,02
Max		560,8	350,7	516,2	570,6	475,9	864,7	509,7	480,2	752,5	332,15
Moy.		103,5	83,2	69,5	97,8	55,8	79,3	69,0	61,1	99,6	59,18

Le module au droit du projet calculé sur les années 2003-2022 est de 80,8 m³/s, ce qui est plus faible que le module historique (calculé sur l'ensemble des données disponibles dans la banque de données hydro eau France). Cette diminution du module est à mettre notamment en lien avec le changement climatique.

Ces débits se répartissent annuellement comme sur le graphique ci-dessous, reprenant l'évolution des débits au cours d'une année sèche, pluvieuse ou moyenne. Le graphique ci-dessous permet ainsi d'apprécier la variation intra-annuelle saisonnière des débits observés sur le Doubs.

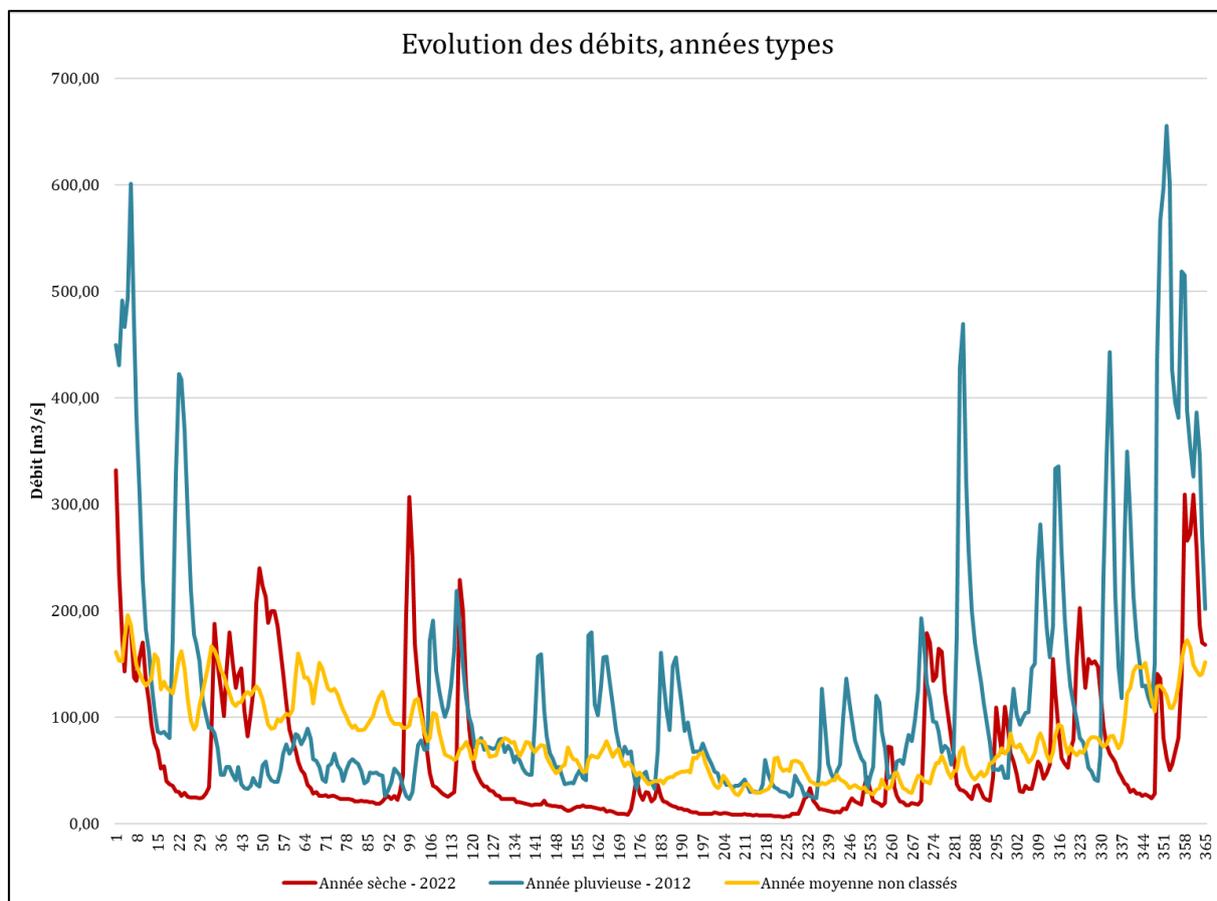


Figure 12 : Évolution annuelle des débits, pour une année sèche, humide et moyenne (source données : Hydro.eaufrance.fr)

Le graphique ci-dessous reprend les débits pour les trois années caractéristiques mais de manière classée, permettant de rendre compte de la variation interannuelle de la disponibilité en eau.

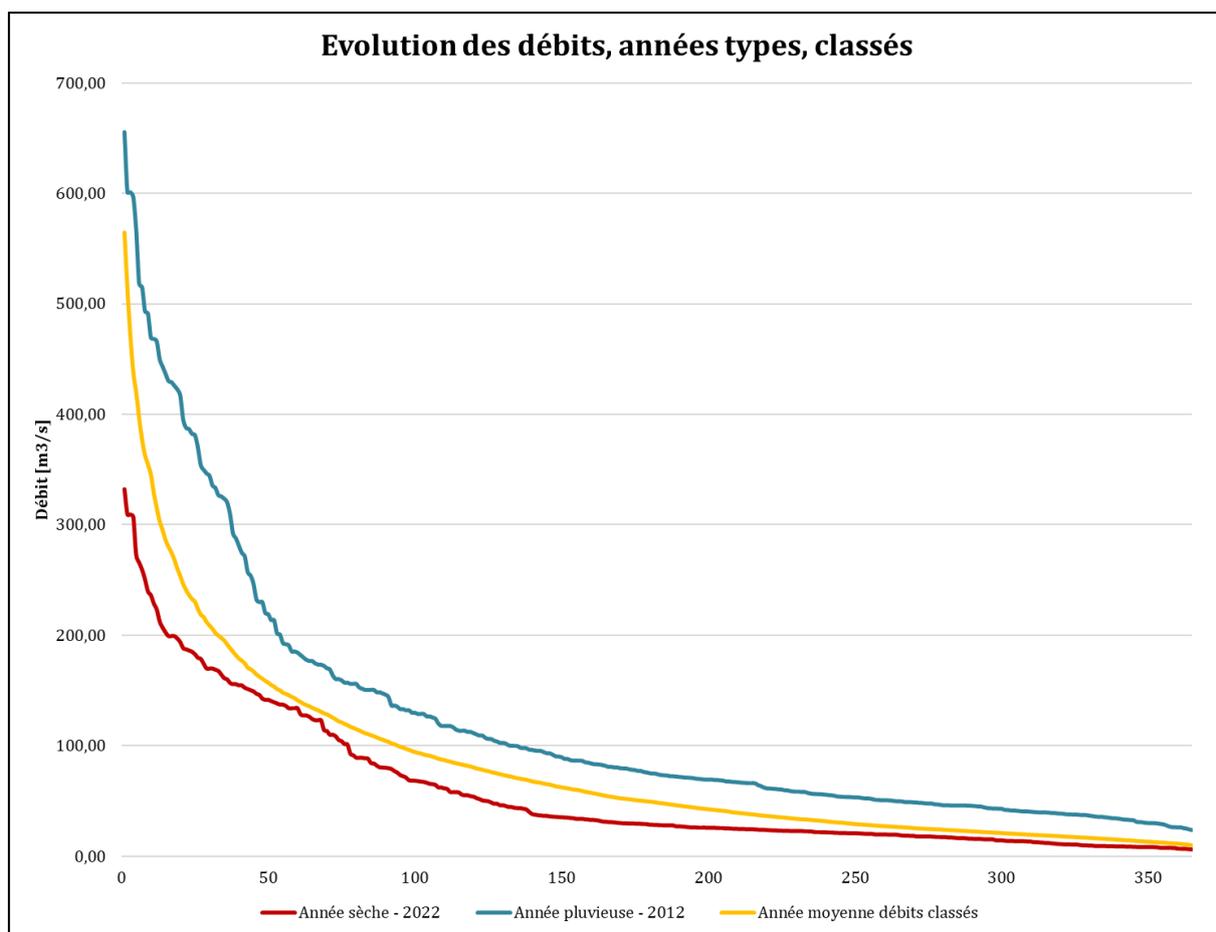


Figure 13 : Débits classés annuels, pour une année sèche, humide et moyenne (source : Hydro.eaufrance.fr)

3.4.2. Statistiques des données

Le tableau suivant présente les débits à l'étiage sur base de la fiche de synthèse de la station du Doubs à Voujaucourt. Ces débits sont caractéristiques des conditions hydrologiques basses du cours d'eau. Le QMNA (Débit Mensuel Minimal Annuel) représente les débits mensuels minimaux annuels sur la période considérée. Le QMNA quinquennal (QMNA5) est généralement la valeur de référence administrative utilisée pour définir la valeur d'étiage.

Tableau 3 : QMNA5 au niveau de la station de mesure de Voujaucourt et au droit du projet (données sur la période 11/1996 au 04/2022, source : Hydro.eaufrance.fr)

Périodicité	QMNA (m ³ /s) Voujaucourt	QMNA (m ³ /s) Projet
Biennale	14,1	15,3
Quinquennale	9,5	10,3

Directement en lien avec cette courbe, le tableau des percentiles présentés ci-dessous renseigne la fréquence d'apparition d'un débit minimal donné, c'est-à-dire le pourcentage de temps que ce débit est atteint ou dépassé sur l'année moyenne de la période d'étude (2003-2022).

Tableau 4 : Fréquences d'observation des débits moyens sur le Doubs au droit du projet (source : Hydro.eafrance.fr)

Percentile	Débit [m ³ /s]
1%	470,9
5%	268,3
10%	191,6
20%	123,8
30%	87,5
40%	64,7
50%	48,7
60%	36,6
70%	28,1
80%	22,1
90%	16,8
95%	13,7
99%	11,0

4. Situation projetée et objectifs visés

La situation projetée englobe l'ensemble des éléments et ouvrages nécessaires à la bonne réalisation des objectifs du projet. Cette situation est décrite dans le présent chapitre. Les principaux éléments sont :

- Restauration du seuil de dérivation et modification de sa crête ;
- Installation d'une passe de deux vannes basculantes de décharge sur le seuil de dérivation (côté droit) ;
- Installation de deux turbines de type vis hydrodynamiques au niveau de la prise d'eau des anciennes forges, pour un débit unitaire de $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Installation d'une passe de 2 vannes de décharge au niveau de la prise d'eau des anciennes forges ;
- Installation d'une turbine de type vis hydrodynamique au niveau du seuil secondaire (ancien moulin) dans le petit Doubs, pour un débit unitaire de $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Installation d'une vanne basculante de décharge au niveau du seuil secondaire du petit Doubs ;
- Installation d'une passe à poissons en rive gauche au droit du seuil principal ;

Pour rappel, le Doubs n'étant pas classé selon le 1 et 2 de l'article L214-17 du code de l'environnement au droit du projet, la restauration de la continuité écologique n'est pas une obligation légale. Toutefois, le porteur de projet propose de restaurer celle-ci. L'installation d'une passe à poissons sera donc considérée dans la suite du dossier comme une mesure d'accompagnement. Toutes les règles de dimensionnement de ce type d'ouvrage seront respectées.

Le travail d'avant-projet consiste à proposer une solution qui soit le plus en adéquation possible avec le milieu. En vue de remplir cet objectif, le projet a fait l'objet d'un long cheminement de développement sur le fonctionnement hydraulique global. La conclusion portée au terme de cette réflexion est que le niveau minimum de régulation à viser est de 288.69 mNGF. Chaque ouvrage a ensuite été dimensionné en ce sens. Les motivations développées ci-après justifient les choix en termes d'équipements.

Le seuil principal dérive une partie des eaux du Doubs vers le petit Doubs. Les eaux déviées sont restituées en deux points au Doubs, le premier après un linéaire de 400 m et le second après un linéaire de 750 m.

4.1. Seuil de dérivation

Le seuil de dérivation présente des irrégularités et des signes de détérioration. Pour assurer la stabilité de l'ouvrage et de bonnes conditions pour l'exploitation du projet (répartition des débits et débit réservé), il est nécessaire de le rénover. Pour des raisons de fonctionnement hydraulique, il est prévu de porter la crête du seuil à la cote suffisante pour atteindre un niveau de régulation amont de 288.69 mNGF tout en laissant passer un débit de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ sur sa crête. Le dispositif prévu

est une série de batardeaux de bois insérés dans des poutrelles type HEB fixées directement sur la crête du seuil. Les régimes de régulation des débits seront détaillés au chapitre 6.

En outre de ces batardeaux et de la rénovation, l'intervention sur le seuil comprendra une goulotte de dévalaison, une vanne de crue et une passe à Kayak.

La rénovation visera l'ensemble des points sur lesquels des détériorations sont constatées.



Figure 14 : Dégradation du seuil de dérivation

Les opérations mentionnées ci-dessus sont détaillées plus avant dans le document.

4.2. Seuil de retenue dans le petit Doubs

Le petit Doubs contient un seuil qui permet de retenir les eaux. Le projet prévoit de le remplacer partiellement par une vanne clapet. Une centrale prendra également place au droit de ce seuil. L'emprise restante sera comblée par un seuil reconstitué sur base du seuil historiquement présent. La cote de sa crête est prévue à une altitude de 288.70 mNGF pour une portée linéaire de 6.1 m.

4.3. Centrales

Le projet prévoit donc l'implantation de deux centrales en deux endroits distincts, une au droit des anciennes forges et une au droit du seuil de retenue au niveau de l'ancien moulin. Le tableau inséré ci-dessous reprend les caractéristiques principales de ces deux centrales.

Tableau 5 : Caractéristiques principales des centrales hydroélectriques

Dénomination	Centrale des forges	Centrale du moulin
Localisation	Droit des anciennes forges, au niveau du puits existant reliant le petit Doubs aux arches historiques	Droit du seuil historique de retenue au moulin
Implantation	Sous le niveau du terrain naturel. Centrale enterrée sous le parc communal.	Dans le lit mineur du petit Doubs et accolée à sa rive droite
Turbines	2 vis hydrodynamiques de 12.5 m ³ /s	1 vis hydrodynamique de 12.5 m ³ /s

4.4. Turbines

Au terme des études d'avant-projet, la solution la plus pertinente a été déterminée. Les caractéristiques des différentes turbines projetées sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6 : Caractéristiques techniques des turbines projetées (sources : constructeurs)

	Turbines
Type et diamètre	Turbine vis hydrodynamique - diamètre : 4.300mm
Débit max par turbine (m³/s)	12.5
Débit d'entonnement/d'amorçage (m³/s)	1.5
Hauteur de chute brute au débit d'équipement + réservé (m)	Centrale des forges : 1.77 Centrale du moulin : 1.88
Type de génératrice	Asynchrone
Puissance maximale brute (kW)	Centrale des forges : 434 Centrale du moulin : 231
Rendement mécanique au débit d'équipement (%)	78%
Ichtyocompatibilité	Turbines ichtyocompatibles
Espacement auge-pales en fonctionnement	5 mm
Vitesse de rotation	< 20 tours/min, vitesse tangentielle : 4,5m/s
Protection du bord amont des pales	Bumper compressible
Régime de pression	Pression atmosphérique
Moyens de régulation	Variateurs de fréquence

La puissance maximale brute du projet est donc de 665 kW.

Le choix de l'équipement est lié aux paramètres du site, parmi ceux-ci, on retrouve :

- Les enjeux paysagers et urbanistiques ;

- Le débit disponible et la valeur du débit attribuée aux fonctions écologiques de la rivière et à la continuité écologique ;
- La chute disponible et l'évolution des niveaux d'eau en fonction des variations de débits ;
- La biodiversité spécifique présente au droit du projet ;
- Le contexte et les risques de crues ;
- La disponibilité foncière ;
- Les contraintes géotechniques ;
- Le coût d'acquisition et d'exploitation des machines.

Le choix de l'équipement de production est motivé selon ces paramètres.

Pour plus d'information sur ce point, une note dédiée est disponible en annexe 12. Celle-ci reprend l'évolution de la réflexion ayant permis d'aboutir à ce choix de turbines. Le lecteur est invité à la consulter.

4.5. Vantellerie

Afin d'augmenter la maîtrise sur les flux d'eau des vannes sont prévues, les fonctions de ces vannes sont multiples :

- Maîtriser l'accès de l'eau aux turbines ;
- Accroître le champ d'action de la centrale sur l'élévation du niveau d'eau amont ;
- Favoriser le transit sédimentaire et l'évacuation des embâcles.

Les vannes projetées sont reprises sur les plans en **annexe 2**.

4.5.1. Vannes de garde

Les vannes de garde sont prévues à la prise d'eau des turbines. Elles sont utilisées lorsque :

- Les turbines ne fonctionnent pas pour leur mise en sécurité ;
- Lors des visites d'entretien pour la mise à sec des chambres d'eau ;
- Lors des arrêts d'urgence en réponse à un dysfonctionnement de la centrale ou du réseau électrique.

Les caractéristiques des vannes de garde sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7 : Caractéristiques des vannes de garde

	Centrale des forges	Centrale du moulin
Type de vanne	Vanne clapet	Vanne gillotine
Moyen d'actionnement	Vérins hydraulique	Vérin hydraulique
Section de vanne utile à la cote min de régulation (m²)	20	9
Largeur prise d'eau (m)	2*4.5	4.5
Cote d'arase maximale (mNGF)	291.35	289.50
Cote de radier (mNGF)	286.40	286.50

4.5.2. Vannes de décharge

Le projet prévoit des vannes de décharges en deux endroits. Le premier ensemble sera situé dans le bajoyer gauche de la prise d'eau de la centrale des forges. Les eaux seront restituées directement dans le bief de restitution de cette centrale et donc au Doubs par ce bief. Le second dispositif sera situé à gauche de la centrale du moulin en lieu et place du seuil de retenue présent actuellement dans le petit Doubs. La largeur restante sera occupée par un seuil reconstitué.

Tableau 8 : Caractéristiques des vannes de décharge

	Centrale des forges	Centrale du moulin	Seuil de dérivation
Type de vanne	Vanne guillotine	Vanne clapet	Vannes clapet
Moyen d'actionnement	Vérins hydraulique	Treuil et câble	Treuil et câble
Section de vanne utile à la cote min de régulation (m²)	2*6	11	32
Largeur prise d'eau (m)	2*3	5.8	12
Cote d'arase maximale (mNGF)	287.55	288.70	286.67
Cote de radier (mNGF)	285.55	286.50	286

Il faut également mentionner 3 ouvertures, dont le seuil est placé à la cote 289,00 mNGF, et situées à l'aval des vannes de décharge de la centrale des forges, permettant l'évacuation passive de l'eau lors d'épisode de crue.

La vanne clapet placée sur le seuil de dérivation vise la décharge et l'évacuation des embâcles lors des épisodes de crues. Elle permettra un plus grand pouvoir de contrôle sur le niveau d'eau à l'amont du seuil.

4.6. Plans de grilles et prises d'eaux

Les turbines projetées sont considérées comme ichtyocompatibles, c'est-à-dire qu'elles ne présentent pas de risque pour l'intégrité physique des poissons qui seraient amenés à passer au travers de celles-ci. Dès lors, il n'est pas nécessaire d'entraver l'accès aux turbines pour les poissons.

Les prises d'eau sont dimensionnées de manière à laisser passer les poissons dans le sens de la dévalaison. Le rôle du plan de grille est donc de protéger la turbine des matériaux flottants de taille trop importante et de protéger l'accès aux turbines pour toute personne venant à tomber dans le canal d'aménée.

Tableau 9 : Caractéristiques des plans de grille

	Centrale des forges	Centrale du moulin
Hauteur immergée (m)	3	2.05
Cote radier (mNGF)	285.55	286.50
Niveau d'eau à la grille (mNGF)	288.55	288.55
Inclinaison par rapport à l'horizontal (°)	90°	90°
Inclinaison par rapport à la verticale (°)	0°	0°
Largeur entrefer (mm)	150	150
Largeur barreau (mm)	15	15

4.7. Éléments électromécaniques

Deux automates, un sur chaque centrale, intégreront l'ensemble des composantes électroniquement commandables, y compris le vannage et les freins des turbines. Ils permettront également l'envoi de l'électricité produite vers le réseau de distribution. Leurs rôles seront également de :

- Contrôler et commander l'ensemble des organes de la centrale pour son bon fonctionnement sur place ou à distance ;
- Protéger les machines, les auxiliaires et les personnes en cas de dysfonctionnement, panne ou accident ;
- Rompre la connexion avec le réseau lorsque l'énergie produite ne respecte plus les normes établies par son gestionnaire ou en cas de coupure du réseau ;
- Comptabiliser la quantité d'énergie produite.

Dans le cadre de cette autorisation, les différents organes ne sont pas détaillés. Toutefois, les fiches techniques peuvent être transmises sur demande.

4.7.1. Sondes de niveaux

Pour les besoins d'exploitation de la centrale projetée, des sondes mesurant en continu le niveau d'eau seront installées. Celles-ci permettront de transmettre à l'automate de gestion des centrales les niveaux d'eau en temps réel. Les sondes seront installées en 8 endroits :

- Passe à poissons (amont et aval) ;
- Vanne de décharge (amont et aval) ;
- Centrale des forges (amont et aval) ;
- Centrale du moulin (amont et aval).

L'automate sera programmé de manière à commander les différents organes pour respecter le programme de gestion des niveaux d'eau. Celui-ci est décrit ci-après dans ce document.

4.8. Circulation

Au sein du site, le projet prévoit d'installer les éléments permettant d'assurer les circulations nécessaires en conditions de sécurité. Pour partie, ces circulations seront assurées par des caillebotis et des garde-corps. Ceux-ci sont illustrés dans les plans d'avant-projet annexés au présent dossier.

4.9. Entretien et rectification du petit Doubs

Pour atteindre des objectifs de viabilité économique, il est nécessaire de viser un productible annuel moyen de 2500 MWh. Pour atteindre cette production, les simulations ont montré qu'il était nécessaire de prévoir un débit turbinable compris entre 35 et 40 m³/s. Il est donc indispensable que les biefs présentent des sections suffisantes pour faire transiter ce débit.

Le petit Doubs n'est plus en service depuis de nombreuses années. A présent, il constitue une zone de courants calmes. Ces zones sont propices au dépôt, sur le fond, de matériaux meubles. Les relevés bathymétriques sur cette zone ont montré, qu'effectivement, le petit Doubs a fait l'objet d'un dépôt important de matière au niveau de son lit.

Pour le bon fonctionnement hydraulique du site, les modélisations opérées ont montré qu'une rectification des biefs était nécessaire. En l'état actuel du seuil, les niveaux de fond à viser sont de 285.0 mNGF pour les biefs en amont des deux centrales et 284.0 mNGF pour les biefs en aval des centrales.

Les profils géologiques relevés par sondage montrent des formations calcaires à partir de la cote 285.5 mNGF au niveau des forges. Au niveau du moulin, des marnes sableuses apparaissent aux environs de la cote 285.0 mNGF. Pour une meilleure appréhension de ce diagnostic, le lecteur est invité à consulter le rapport de géotechnique présent en annexe 10.

Ces résultats montrent que les travaux à prévoir pour obtenir des sections hydrauliques suffisantes sont très importants. Il serait dès lors nécessaire de retirer l'ensemble des sédiments déposés ainsi qu'une épaisseur d'environ 0.5 m de sol dur sur l'ensemble du petit Doubs. Au vu des enjeux financiers et du contexte urbanistique, une solution alternative a été recherchée.

Par modélisation hydraulique, il est apparu qu'en observant une cote de régulation minimale de 288.69 mNGF, le retrait des sédiments et du sol meuble pouvait être limité. Les cotes de curages peuvent ainsi être fixées à 285.55 mNGF en entrée du petit Doubs, à 285mNGF à l'aval de la centrale des forges et à 284.5 à l'aval du moulin. La régulation à la cote 288.69 mNGF nécessite de porter la crête de seuil à une hauteur suffisante, tout en garantissant la consistance du débit réservé. Cette cote est située à l'altitude 288.67 mNGF.

En conclusion, il apparaît que les besoins du projet nécessiteraient des rectifications de bief très importantes. Au vu du contexte, ces rectifications ne paraissent pas raisonnablement réalisables. Pour conserver la viabilité du projet, il est donc nécessaire de porter la crête du seuil à la cote 288.67 mNGF. Cela permet de restreindre les zones de recalibration au sein des biefs et de n'intervenir que sur les parties meubles de ceux-ci.

4.10. Ouvrages de génie civil

En outre des éléments techniques, le projet prévoit l'implantation d'ouvrages de génie civil. Le rôle de ces ouvrages est multiple :

- Établir la structure du projet (pertuis de prise d'eau et de décharge) ;
- Accueillir et maintenir les éléments électromécaniques ;
- Diriger les flux d'eau pour la production électrique et pour la continuité écologique ;
- Établir des voies de passages piscicoles de part et d'autre du seuil ;
- Assurer la stabilité du site et des ouvrages.

Les ouvrages de génie civil se distinguent selon plusieurs types :

- Les radiers ;
- Les voiles ;
- Les dalles ;
- Les cloisons ;
- Les scellements.

Les ouvrages prévus pour le projet sont illustrés dans les plans en **annexe 2**. La stabilité de chacun de ces ouvrages sera assurée conformément aux normes définies au travers de l'Eurocode.

Les ouvrages de franchissement permettent de rétablir et/ou de conserver la libre circulation piscicole. Étant l'un des deux piliers de la continuité écologique, ces ouvrages font l'objet d'une attention particulière.

Dès lors, ce volet est un chapitre à part entière du présent mémoire technique et le lecteur peut retrouver le dimensionnement des ouvrages de franchissement et leur justificatif au chapitre 8 : continuité écologique.

5. Débit réservé

Le porteur de projet propose un débit réservé de 8 m³/s. Cela représente 10% du module. La législation lui impose un débit réservé minimum de 5% du module, soit 4 m³/s. Pour des raisons illustrées dans l'étude des incidences, il a pris la décision de proposer un débit réservé de 8 m³/s.

Nous renvoyons le lecteur à cette section pour plus de détails.

6. Allocation de débits et régime de gestion des niveaux d'eau

Le projet prévoit un nouveau régime de régulation du niveau d'eau permettant d'intégrer au mieux les différents enjeux et usages liés au cours d'eau. Il consiste en un niveau de régulation bas au seuil de 288,69 mNGF. Par ailleurs, cette cote de retenue demeure celle définie dans la cartographie du bassin du Rhône pour le sous-affluent le Doubs Pl8 (Figure 15). Il s'agit également du niveau d'eau observé en situation actuelle au module.

Quant à lui, le niveau haut de régulation du plan d'eau amont a été défini à 289,02 mNGF, ce qui correspond au niveau d'eau existant à 3 modules. Cette seconde régulation en hautes eaux se justifie par la prévention des risques en cas de crues et l'importance pour le projet de ne pas avoir d'incidence sur les niveaux de crues. Effectivement, les différents ouvrages de décharge ont été conçus afin que l'incidence de la rehausse soit nulle à partir de trois modules et au-delà de ce débit.

Le projet prévoit de nombreux organes au travers desquels il est prévu de faire passer un débit variable. Ces ouvrages de décharge ont été dimensionnés en adéquation avec les exigences de cette rehausse. Ils ont été intégrés au droit des deux centrales ainsi qu'au niveau du grand seuil.

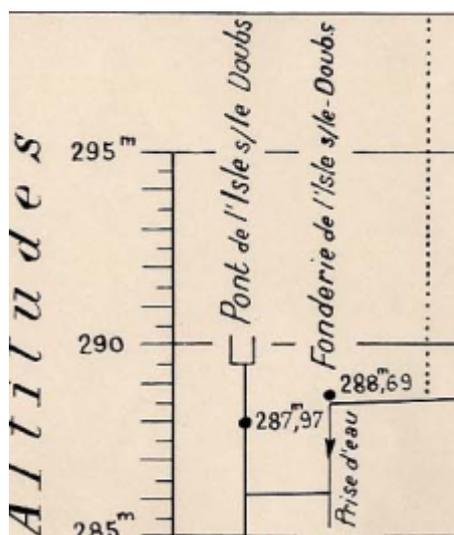


Figure 15 : Extrait de la cartographie du bassin du Rhône (Le Doubs) Pl.8

Le tableau présenté ci-dessous explique la manière dont seront répartis les débits sur le site entre

Le tableau inséré ci-dessous résume le régime de gestion des ouvrages et la régulation du niveau d'eau par le biais des différents ouvrages prévus.

Tableau 10 : Régimes de gestion des ouvrages et de régulation du niveau d'eau

Débit caractéristique	Débit m ³ /s	Commentaires
Débit réservé	8	<p>En condition de basses eaux, sous un débit dans le Doubs de 8 m³/s, le débit est entièrement réservé. Il est partagé entre la passe à poisson, l'échancrure de dévalaison, la passe à kayak et le seuil. Ce débit de 8 m³/s sera conservé jusqu'à ce que le Doubs alimente pleinement les trois turbines. Au-delà, le débit dans le TCC sera plus important.</p> <p>L'allocation de débit entre ces différents ouvrages est détaillée au Tableau 19. Au-delà de 8 m³/s, le débit supplémentaire sera turbiné à la centrale du Moulin.</p> <p>Le niveau d'eau moyen au seuil est maintenu à 288,69 mNGF.</p>
Q équipement -1 vis + réservé	20.5	<p>Il s'agit du débit auquel la centrale du moulin tourne à pleine puissance. Au-delà de ce débit, l'une des deux turbines à la centrale des Forges sera mise en fonctionnement</p> <p>Le niveau d'eau moyen au seuil est maintenu à 288,69 mNGF.</p>
Q équipement 2 vis + réservé	33.0	<p>A 33 m³/s, la centrale du moulin et une des deux turbines à la centrale des Forges sont à plein régime. Au-delà de ce débit, la deuxième turbine aux forges sera enclenchée.</p> <p>Le niveau d'eau moyen au seuil est maintenu à 288,69 mNGF.</p>
Q équipement 3 vis + réservé	45.5	<p>Ce débit correspond au stade où l'ensemble des ouvrages prévus sont pleinement alimentés. Cette situation correspond approximativement au débit médian (P50), de 48,7 m³/s.</p> <p>Le niveau d'eau moyen au seuil est maintenu à 288,69 mNGF.</p> <p>Au-delà de ce débit, le niveau d'eau commence à monter au droit du seuil puisqu'il débitera de plus en plus. La passe à poisson, l'échancrure de dévalaison et la passe à kayak verront également leur débit augmenter progressivement.</p>

Régulation du niveau d'eau – centrale OFF	137,76	<p>Lorsque les trois turbines sont à l'arrêt, le débit de 137,76 m³/s correspond au débit auquel le niveau d'eau au seuil atteint 289,02 mNGF.</p> <p>À partir de ce débit, la vanne du grand seuil est enclenchée afin de maintenir ce niveau jusqu'à un débit de 3 modules.</p>
Régulation du niveau d'eau – centrale ON	175,26	<p>Lorsque les trois turbines sont en fonctionnement, le débit de 175,26 m³/s correspond au débit auquel le niveau d'eau au seuil atteint 289,02 mNGF.</p> <p>À partir de ce débit, la vanne du grand seuil est enclenchée afin de maintenir ce niveau jusqu'à un débit de 3 modules.</p>
3 Modules	242,4	<p>Pour ce débit, le niveau de régulation correspond au niveau de la situation actuelle. Au-delà de ce niveau d'eau l'objectif est d'effacer toute incidence de la rehausse sur le niveau d'eau à l'amont du seuil.</p> <p>Les niveaux d'eau seront alors régulés conformément aux niveaux d'eau observés en situation actuelle. A cet effet, le débit « excédentaire », dû à la rehausse, est déchargé en priorité par la vanne du seuil puis par les vannes des Forges et du Moulin.</p>

7. Étude hydraulique

L'étude hydraulique est menée de manière à modéliser l'évolution des niveaux d'eau en fonction des différents débits. Les résultats de cette étude sont utilisés à plusieurs niveaux de l'avant-projet :

- Détermination de la puissance brute maximale ;
- Simulation des productibles ;
- Calage des ouvrages de production électrique ;
- Calage des ouvrages de franchissement ;
- Détermination du régime de gestion de la centrale ;
- Dimensionnement de la vantellerie ;
- Intégration des enjeux et usages liés au cours d'eau.

7.1. Données d'entrée

L'étude hydraulique est basée sur des données relevées sur le terrain. Ces données concernent la bathymétrie du lit mineur et des ouvrages existants ainsi que des campagnes de mesures de niveaux d'eau aux débits représentatifs de diverses situations hydrologiques.

7.1.1. Débits d'intérêts

La simulation des niveaux d'eau sera opérée :

- A l'étiage ;
- Au débit d'équipement (1 vis) + réservé ;
- Au débit d'équipement (2 vis) + réservé ;
- Au débit d'équipement (3 vis) + réservé ;
- Au percentile 50 ;
- Au module ;
- À 2 fois le module ;
- À 3 fois le module, centrales en fonctionnement ;
- À 3 fois le module, centrales à l'arrêt ;
- À 4 fois le module, centrales à l'arrêt.
- À 5 fois le module, centrales à l'arrêt.

Les valeurs des débits d'intérêts au droit du projet sont issues de l'analyse hydrologique détaillée au chapitre 3.

7.1.2. Données topographiques et bathymétriques

Les données topographiques et bathymétriques ont été mesurées lors de plusieurs campagnes :

- Les données bathymétriques des ouvrages et des profils en travers ont été relevées par la société GeoPlans SAS en 2020. Les résultats sur plan de ces relevés sont disponibles en **annexe 8**.
- Les données bathymétriques du tronçon court-circuité amont et du petit Doubs ont été relevés par la société Latitude Drone en 2023. Les résultats sur plan de ces relevés sont disponibles en **annexe 8**.

7.1.3. Campagne de mesure des niveaux d'eau

La campagne de mesure des niveaux d'eau est réalisée en vue d'obtenir une représentation de l'évolution des niveaux aux endroits clés du projet sur une plage de débit allant de l'étiage aux hautes eaux. La campagne de mesure a été opérée au moyen de capteurs hydrométriques par la société Balland Géomètre-Expert et Associés. L'emplacement des capteurs est illustré dans la

figure ci-dessous. Les capteurs ont enregistré les niveaux d'eau de manière hebdomadaire entre le 19/09/2022 et le 19/02/2023 à l'amont et entre le 12/09/2022 et le 20/02/2022 à l'aval.

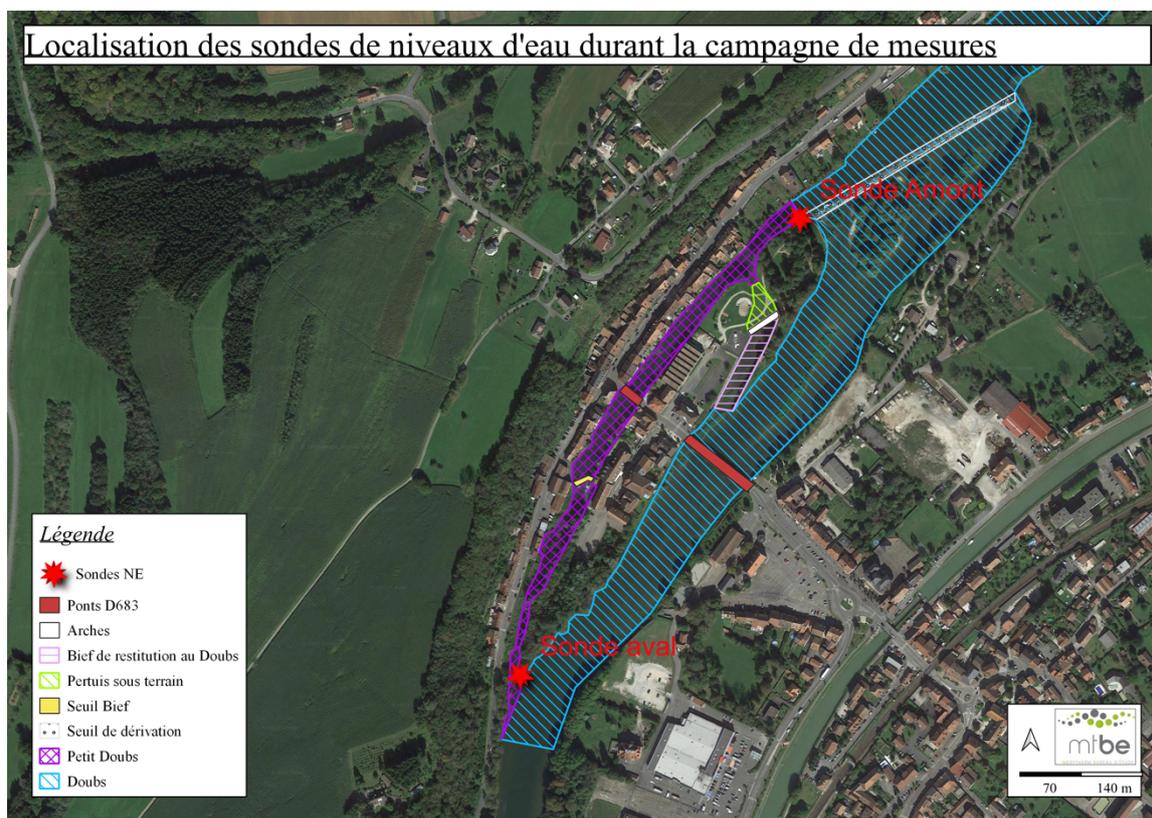


Figure 16 : Localisations des sondes de niveaux d'eau amont pour la campagne de mesure des niveaux d'eau

Les mesures de niveaux doivent être accompagnées d'une description hydrologique de la situation au moment de chaque mesure. Les résultats de la campagne sont repris aux figures ci-dessous.

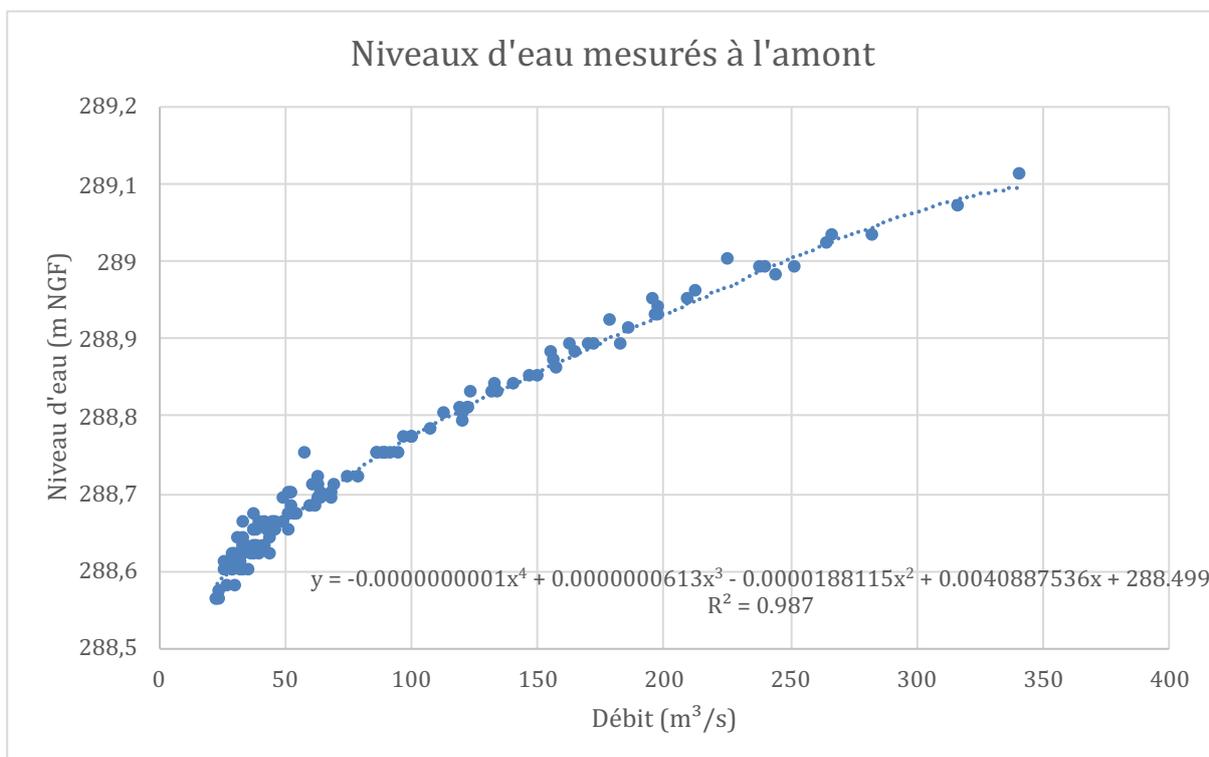


Figure 17 : Évolution du niveau d'eau amont mesuré

La Figure 17 montre que la plage de débit mesurée s'étend de 16,5 m³/s à 341 m³/s.

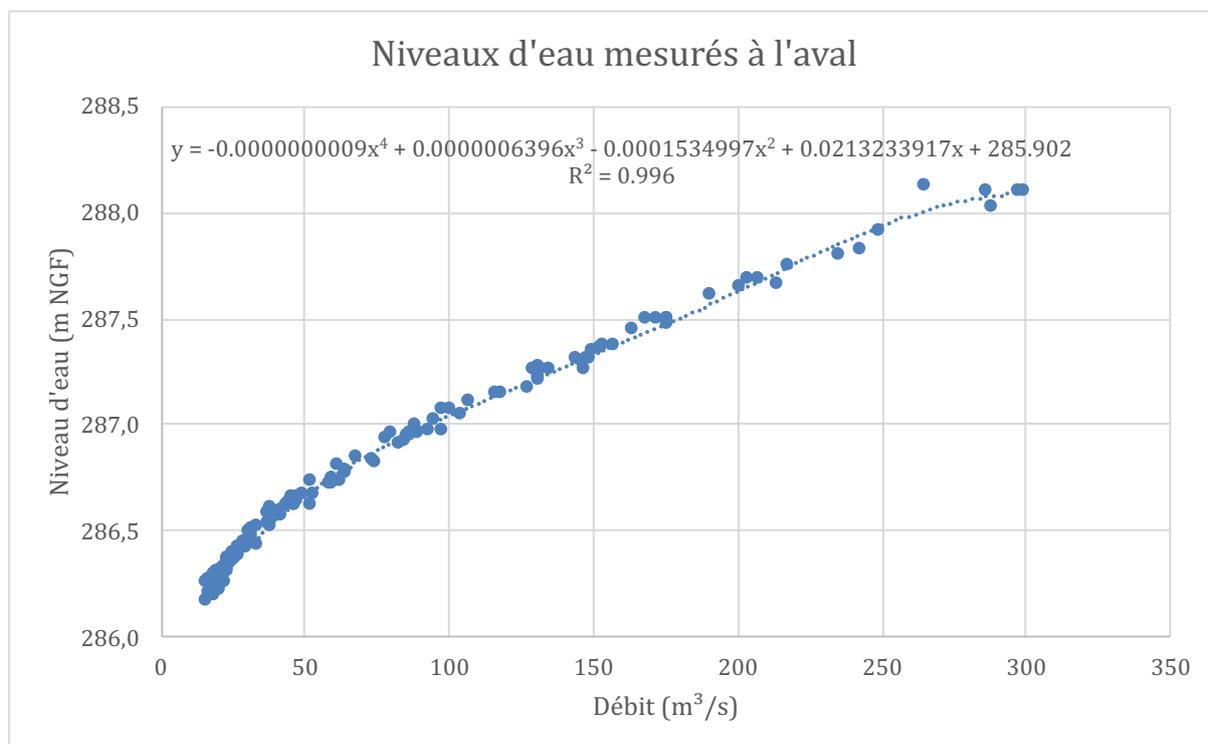


Figure 18 : Évolution du niveau d'eau amont mesuré

La Figure 18 montre que la plage de débit mesurée s'étend de 16,3 m³/s à 299,7 m³/s.

En outre de ces mesures, la campagne a été complétée par des mesures du niveau d'eau au sein du tronçon court-circuité. Les mesures ont été réalisées au niveau des profils topographiques relevés (Figure 19).

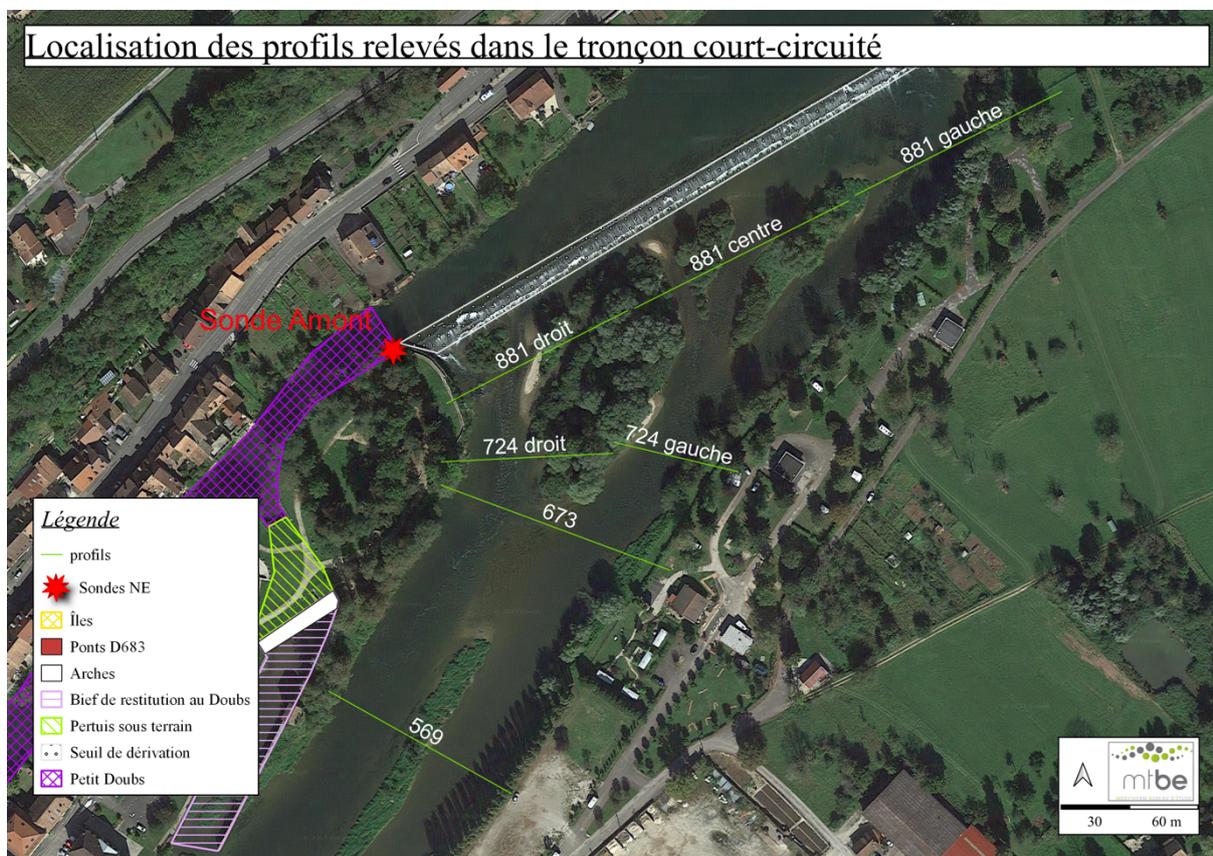


Figure 19 : Localisation des profils relevés dans le tronçon court-circuité

Tableau 11 : Relevés des niveaux d'eau dans le tronçon court-circuité

Opérateur	MTBE	Bathymétrie drone	Géoplans
Date	20-07-23	20-01-23	30-04-20
Débit	9.74 m ³ /s	122 m ³ /s	15.6
Profils	m NGF	m NGF	m NGF
881 gauche	286.88	287.95	287.14
881 centre	286.92	287.63	287.08
881 droite	286.75	287.63	286.7
724 gauche	286.26	287.63	
724 droite	286.26	287.56	286.28
673	286.23	287.53	286.25
569.00	286.10	287.52	286.17

7.2. Méthodologie

Les relevés réalisés *in situ* permettent la construction du modèle géométrique et hydraulique dans le logiciel HEC-RAS (version 6.3.1). La modélisation hydraulique est un outil incontournable dans la gestion de l'eau et le développement efficient des usages qui y sont liés. Elle permet, dans l'usage qui nous concerne, de déterminer les niveaux d'eau atteints pour différentes gammes de débits. En situation projetée, elle permet de définir l'impact de la modification du profil du cours d'eau ou de nouveaux ouvrages.

Plus spécifiquement, elle permet entre autres :

- De déterminer des hauteurs d'eau suivant différentes configurations du système étudié et à différents régimes de débits ;
- De dimensionner des ouvrages spécifiques, et d'optimiser le calage altimétrique de ceux-ci.

Le système intégré de calculs utilisé dans ce cadre par la cellule hydraulique de MTBE est le logiciel HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Centers River Analysis System*), développé par l'*US Army Corps of Engineers*. Les aptitudes de ce logiciel, toujours couplées à l'expertise de l'ingénieur, sont reconnues au niveau international. Il est en outre employé par de nombreux bureaux d'études et Administrations chargés d'études hydrauliques.

Il a été développé et testé pour réaliser des modèles de calculs hydrauliques en 1D pour un réseau hydrologique naturel ou artificiel complet. Dans le cas d'un cours d'eau, celui-ci est modélisé par la succession de profils 2D en travers du cours d'eau et des ouvrages qui le traversent. Les profils sont judicieusement choisis afin de représenter au mieux la complexité du site sur la portion étudiée.

A travers une interface graphique, le logiciel HEC-RAS développe une analyse détaillée des composantes du système et offre une gestion, un stockage et un traitement efficace des données ainsi qu'une présentation des résultats à travers des graphiques et des tableaux synthétiques.

Le modèle mathématique est basé sur la résolution des équations de continuité et de conservation de la quantité de mouvement en une dimension. Il repose sur la technique éprouvée des différences finies en utilisant des schémas numériques capables de résoudre les équations en eaux peu profondes de Saint Venant.

Les pertes de charge sont modélisées par les lois de frottement (de fond et latéral) de Manning-Strickler d'une part et de compression/expansion d'autre part. Des coefficients de débits sont également utilisés sur base de notre expertise et des valeurs régulièrement admises dans la littérature.

Une fois le modèle géométrique et les différents paramètres intégrés, un calibrage est effectué, ce qui permet d'affiner ces paramètres au moyen des mesures prises *in situ* pour les débits caractéristiques.

Une fois le modèle géométrique construit, les simulations d'écoulement en régime stationnaire sont réalisées.

Toute l'expertise du modélisateur se borne à la minimalisation des incertitudes liées aux données de construction des modèles (la topographie et la bathymétrie), au choix judicieux des hypothèses de la modélisation et des hypothèses de calibration (coefficients de frottement, apports intermédiaires, paramètres hydrauliques) et à l'exploitation opérationnelle des modèles hydrauliques (conditions initiales, conditions limites amont et aval, etc.).

La présente étude hydraulique reste donc une étude indicative qui permet, suivant les différents paramètres et hypothèses implémentés, une visualisation approchée de la réalité.

7.3. Modélisation de la situation existante

7.3.1. Considérations générales

La modélisation de la situation existante considère 47 profils représentant :

- Le tronçon de rivière vers l'amont depuis le vannage de 135 m ;
- Le seuil d'une longueur d'environ 272m.
- Le tronçon court-circuité, modélisé en 3 biefs au niveau des ilots (182m) puis en un seul bief jusqu'à la confluence avec le petit Doubs (594m).
- Le petit Doubs sur une longueur de 640m ;
- Le canal d'amenée des Forges, le pertuis sous le parc et le canal de décharge des Forges sur une longueur de 182m ;

Les ouvrages considérés sont les suivants :

- Le seuil délimitant le Doubs et le petit Doubs. La crête de seuil a été modélisée sur base de 34 points topographiques ;
- Le pont de L'Isle-sur-le-Doubs ;
- Le pont entre l'île et la rive droite ;
- Le pertuis passant sous le parc ;
- Les arches à la sortie des pertuis ;
- Le seuil du Moulin dans sa géométrie existante.



Figure 20 : Schématisation du modèle hydraulique utilisé

Le profil en long de la section concernée du Grand Doubs est présenté à la figure suivante.

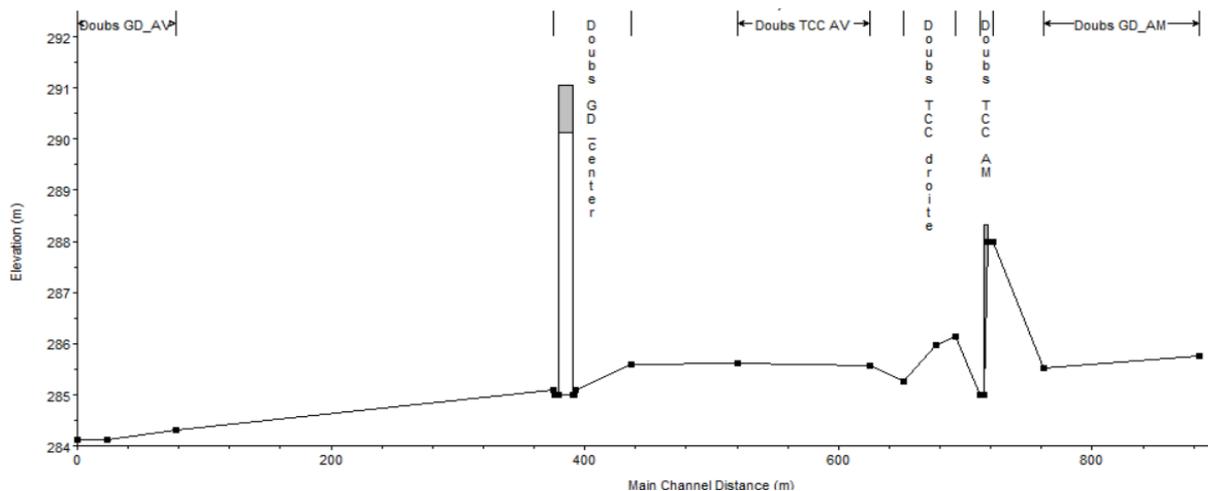


Figure 21 : Profil en long du segment concerné du Doubs

Le profil en long de la section reprenant l'amont du Doubs et le petit Doubs jusqu'à la confluence du petit et du Grand Doubs est présenté à la figure suivante.

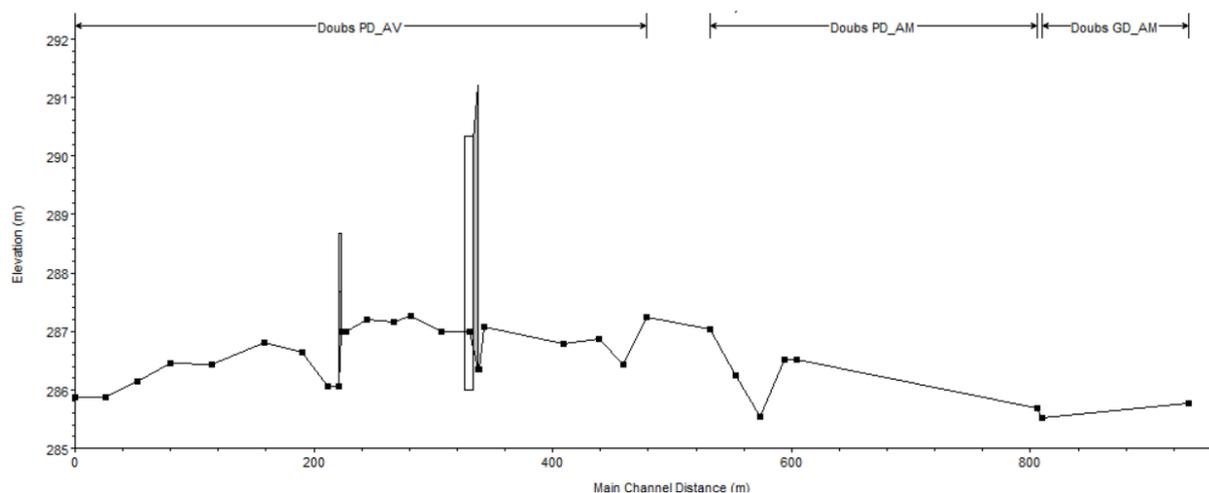


Figure 22 : Profil en long du segment concerné du Doubs

Les embâcles ponctuellement observés à l'entrée des buses existantes et au niveau du petit seuil sont totalement négligés. Cette hypothèse est soutenue par le fait que les embâcles ont été régulièrement retirés durant la campagne de mesure.

7.3.2. Calage de la condition aval

Une courbe d'évolution des niveaux d'eau de la situation existante au droit de la confluence a été dressée sur base des niveaux d'eau mesurés (7.1.3). Cette courbe de tarage a été utilisée pour estimer le niveau d'eau à la confluence pour chaque débit cible. Ces niveaux sont directement encodés dans HEC-RAS en tant que condition aval.

Tableau 12 : Niveaux d'eau interpolés à la confluence pour chaque débit cible

Débit caractéristique	Doubs	Niveau d'eau à l'aval du modèle
	m ³ /s	mNGF
Étiage	9.29	286.09
Q équipement - 1 vis	20.5	286.28
Q équipement - 2 vis	33	286.46
Q équipement - 3 vis	45.5	286.61
P50	48.7	286.65
Module	80.8	286.92
2 Modules	161.2	287.39
3 Modules	242.4	287.89
4 Modules	323.2	288.11
5 Modules	404	288.18

7.3.3. Calibrage du seuil

Une courbe d'évolution des niveaux d'eau de la situation existante au droit du seuil a été dressée sur base de la courbe de régression proposée au chapitre 7.1.3. Le coefficient de déversement du seuil a ainsi été calibré pour rencontrer les niveaux d'eau mesurés. Le coefficient de déversement (Cd) est ainsi estimé à 0,54 en l'état actuel.

Tableau 13 : Niveaux d'eau interpolés au seuil pour chaque débit cible

Débit caractéristique	Doubs	Niveau d'eau à l'amont du seuil
	m ³ /s	mNGF
Etiage	9.29	288.54
Q équipement - 1 vis	20.5	288.58
Q équipement - 2 vis	33	288.62
Q équipement - 3 vis	45.5	288.65
P50	48.7	288.66
Module	80.8	288.74
2 Modules	161.2	288.87
3 Modules	242.4	288.99
4 Modules	323.2	289.09
5 Modules	404	289.21

7.3.4. Calibrage de l'amont du tronçon court-circuité

Le tronçon court-circuité a été modélisé en 3 biefs sur 100m à l'aval du seuil puis en 2 biefs entre 100 et 200m à l'aval du seuil.



Figure 23 : Schématisation du modèle à l'amont du TCC

Les coefficients de Manning de ces tronçons ont ainsi été calibrés avec un débit observé de 122 m³/s. Les coefficients de Manning assignés varient entre 0,04 et 0,055 d'un bief à l'autre.

Tableau 14 : Résultats des niveaux d'eau aux différents profils du tronçon court-circuité après calibrage des coefficients de Manning (Q =122 m³/s)

Profils en travers		Rive droite		Rive gauche	
n° HEC-RAS	n° levé géomètre	NE mesuré	NE modélisé	NE mesuré	NE modélisé
881	16	287.63	287.61	287.95	287.97
878	16-21	287.58	-	287.93	287.91
830	16-22	287.58	-	287.71	287.72
783	17-23	287.55	287.51	287.68	287.68
724	18-24	287.56	287.56	287.63	287.59
673	19	287.53	-	287.53	287.53
569	20	287.52	-	287.53	287.47

On remarque que les différences entre les niveaux d'eau observés et modélisés varient entre 0 et 5 cm. En effet, il est complexe de modéliser un cours d'eau divisé en plusieurs biefs, comportant des niveaux d'eau différents et des flux latéraux entre les biefs. Le modèle reste, pour ce tronçon du Doubs, une représentation simplifiée de la réalité. Nous estimons que les résultats obtenus sont tout à fait satisfaisants vu la complexité du cours d'eau à cet endroit.

7.3.5. Calibrage des ouvrages

Les coefficients des différents ouvrages n'ont pas pu être calibrés sur base de l'expertise de l'ingénieur, à l'aide des tables de références et sur base de la géométrie de chaque ouvrage.

Tableau 15. Coefficients des ouvrages

Coefficient de débit du seuil du Moulin	0,4
Coefficient d'entrée du pertuis et des ponts	0,5
Coefficient de sortie du pertuis et des ponts : 1 ;	1
Coefficient de Manning des ouvrages en béton	0.01

7.3.6. Calibrage des coefficients de Manning

Hormis au droit des îlots du tronçon court-circuité, les coefficients de Manning n'ont pas pu être calibrés. Des coefficients standards ont donc été utilisés sur base des observations sur site (rugosité du fond de rivière, état des berges). Un coefficient de 0,035 a été utilisé par défaut à l'exception d'un bief. En effet, le Doubs, entre la confluence avec le canal de décharge des Forges et le profil extrême aval du modèle a été affecté d'un coefficient de 0,03.

7.4. Modélisation de la situation projetée

7.4.1. Considérations générales

Les considérations générales de l'étude, font état de la consistance du projet. Il consiste à installer plusieurs nouveaux groupes de production hydroélectrique ainsi que les ouvrages de continuité écologique.

Les caractéristiques du groupe de production sont reprises dans le tableau inséré ci-dessous.

Tableau 16. Caractéristiques des groupes de production hydroélectrique

	Centrale des Forges	Centrale du Moulin
Type de turbines	Vis d'Archimède	Vis d'Archimède
Nombre de turbines à la centrale des Forges	2	1
Débit unitaire	12,5 m ³ /s	12,5 m ³ /s

La régulation proposée du niveau d'eau au seuil est de 288,69 mNGF. Pour ce faire, le seuil est rehaussé par des éléments en bois pour atteindre une crête de seuil de 288,67 mNGF.

La régulation du niveau d'eau amont proposé est la suivante :

- 1) 0 - 45,5 m³/s : Jusqu'au débit d'équipement des 3 vis, le niveau amont est régulé à 288,69.
- 2) 45,5 - 175,26 m³/s : Au-delà du débit de pleine puissance, le niveau d'eau augmente librement, au grès de la charge sur le seuil jusqu'au niveau actuellement atteint pour un débit égal à 3 fois le module. Ce niveau d'eau moyen au seuil est actuellement de 289,02 mNGF. Après la rehausse du seuil et la mise en fonctionnement de la centrale, le débit correspondant à ce niveau d'eau est de 175,26 m³/s. Ce qui correspond à un débit qui transite par le seuil (goulotte et passe à kayak compris) de 137,76 m³/s.
- 3) Au-delà de ce niveau d'eau, les ouvrages d'évacuation entrent en fonction afin de respecter l'évolution du niveau d'eau tel qu'observée en situation existante. La régulation proposée permet ainsi de ne pas avoir d'impact sur les risques de crues en hautes eaux.

Par rapport au modèle hydraulique de la situation existante, le modèle de la situation projetée a subi les adaptations suivantes :

- Implantation de la centrale des Forges en place des pertuis existants ;
- Implantation de la centrale du Moulin en place du seuil existant dans le petit Doubs ;
- Modification du seuil existant pour y aménager une vanne de décharge, une échancrure de dévalaison et une passe à kayaks ;
- Implantation d'une passe à poisson en rive gauche du Doubs, à l'amont du seuil ;
- Modification des niveaux de fond de rivière (retrait de sédiments).

7.4.2. Dimensionnement des ouvrages

Les ouvrages considérés dans le modèle hydraulique sont les suivants :

- Passe à poissons
- Au seuil existant :
 - o Vanne de décharge
 - o Échancrure de dévalaison
 - o Passe à kayak
- Centrale des forges
 - o Prise d'eau
 - o Turbines
 - o Vannes de décharge et canal de décharge
 - o Déversoir latéral
- Centrale du Moulin
 - o Vanne de décharge
 - o Déversoir de crue
 - o Turbines

Ces ouvrages sont présentés en détail dans le chapitre 4 ainsi que dans les plans. Ils ont été modélisés sur base des dimensions projetées sous forme de structures frontales ou latérales. Les ouvrages sont modélisés soit en tant que vanne soit en tant que déversoir dans le logiciel HEC-RAS.

Tout d'abord, les ouvrages ont été dimensionnés sur base des lois d'ouvrages suivantes.

Déversoir dénoyé

$$Q = Cd\sqrt{2g}Lh_{amont}^{3/2}$$

Avec,

- Q , le débit ;
- C_d , le coefficient de débit ;
- L , la largeur du déversoir ;
- h_{amont} , la hauteur d'eau au-dessus de la crête du déversoir ;
- g , l'accélération de la pesanteur.

Déversoir noyé

$$Q = C_d \sqrt{2g} L h_{\text{aval}} \sqrt{h_{\text{amont}} - h_{\text{aval}}}$$

Avec,

- h_{amont} , la charge sur le seuil à l'amont ;
- h_{aval} , la charge sur le seuil à l'aval ;

Vanne dénoyée

$$Q = C_d L W \sqrt{2g} \sqrt{h_{\text{am}}}$$

Avec,

- W , l'ouverture de la vanne ;

Vanne noyée

$$Q = C'_d L W \sqrt{2g} \sqrt{h_{\text{am}} - h_{\text{av}}}$$

Avec,

- C'_d , le coefficient de débit noyé, proche du coefficient de débit dénoyé ;

La loi d'ouvrage et le coefficient de débit utilisés pour dimensionner les ouvrages pour chaque ouvrage sont détaillés au Tableau 17. Les mêmes coefficients ont été paramétrés dans le modèle HEC-RAS.

Tableau 17 : Loi d'ouvrage et coefficients de débit de chaque ouvrage

Ouvrage	Loi d'ouvrage	Coefficient de débit dénoyé (-)	Coefficient de débit noyé (-)
Grand seuil	Déversoir noyé/dénoyé	0.5	0.9
Passé à kayak	Déversoir noyé/dénoyé	0.4	0.9
Vanne de décharge	Déversoir noyé/dénoyé	0,4	0,9
Échancrure de dévalaison	Déversoir noyé/dénoyé	0.4	0.9
Centrale des forges			
Vannes de décharge	Vanne noyée/dénoyée	0.6	0.8
Déversoir latéral	Déversoir noyé/dénoyé	0.4	0.9
Centrale du Moulin			
Vanne de décharge	Déversoir noyé/dénoyé	0.4	0.9
Déversoir de crue	Déversoir noyé/dénoyé	0.4	0.9

7.4.3. Curage

Les niveaux de retrait des sédiments ont été déterminés selon plusieurs objectifs :

- Afin de minimiser les pertes de charges et ainsi optimiser la chute exploitée au droit des turbines
- Afin de de minimiser l'ampleur des interventions de retrait des sédiments afin de restreindre les perturbations du milieu et le coût des travaux.

Les tronçons ainsi que la cote atteinte après retrait des sédiments sont repris au tableau suivant. Ces tronçons sont exprimés graphiquement en **annexe 5**.

Tableau 18 : Niveaux de reprofilage proposés

Tronçons	Niveaux atteints
1) Petit Doubs : entre la mi-hauteur du seuil et la prise d'eau de la centrale des forges	285,55 mNGF
2) Canal de restitution de la centrale des Forges	285,00 mNGF
3) Petit Doubs : entre la centrale du Moulin et la confluence	285,00 mNGF

7.4.4. Allocation des débits

La rehausse du seuil impose une régulation fine des niveaux d'eau en période de hautes eaux. Les nouveaux ouvrages de décharges ont été dimensionnés pour faire passer un débit suffisant et ne pas engorger le Doubs à l'amont du seuil. Il est donc proposé un régime d'évacuation au-delà d'une cote d'eau située à 289,02 mNGF, permettant de maintenir les niveaux d'eau observés à l'heure actuelle à l'amont du seuil pour un débit égal ou supérieur à 3 fois le module.

L'allocation des débits est reprise ci-dessous et détaillée au chapitre 6.

Tableau 19. Allocation des débits en situation projetée

Débit caractéristique	Doubs	Passé à poissons	Passé à kayaks	Échancrure de dévalaison	Total au seuil	Vis Forges	Vis Moulin	Ouvrages d'évacuation (petit Doubs et Forges)	Vanne du grand seuil
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Etiage	9.3	4.0	0.2	1.9	4.0	0.0	1.3	0	0
Q équipement - 1 vis	20.5	4.0	0.2	1.9	4.0	0.0	12.5	0	0
Q équipement - 2 vis	33.0	4.0	0.2	1.9	4.0	12.5	12.5	0	0
Q équipement - 3 vis	45.5	4.0	0.2	1.9	4.0	25.0	12.5	0	0
P50	48.7	4.0	0.2	1.9	7.2	25.0	12.5	0	0
Module	80.8	4.5	0.5	2.5	38.8	25.0	12.5	0	0
2 Modules	161.2	6	1.1	3.3	117.7	25.0	12.5	0	0
3 Modules	242.4	7.5	1.1	3.4	130.26	25.0	12.5	0	67.14

Passé à poissons : L'évolution du débit au sein de cet ouvrage a été calculé sur le logiciel Cassiopée. Le débit qui passe par la passe à poisson a ensuite été retranscrit dans le modèle HEC-RAS sous la forme d'une vanne de régulation. Le débit de la passe à poissons est fixé à 4 m³/s pour le niveau de régulation de 288,69 mNGF et évolue ensuite jusque 10,4m³/s lorsque le débit dans le Doubs atteint 2 fois le module.

Total au seuil : ce débit représente la somme du débit déversant sur le seuil, dans la passe à kayaks ainsi que dans l'échancrure de dévalaison.

Ouvrages d'évacuation : on entend les vannes et surverses implantées au droit des deux centrales.

Comme hypothèse à ce stade, à 3 fois le module et lorsque les centrales sont en fonctionnement, seuls la vanne de décharge du grand seuil est actionnée.

Pour le même débit, dans le cas où les centrales sont arrêtées, le débit supplémentaire, non turbiné et à évacuer, est partagé entre les vannes de décharges des Forges (25 m³/s) et du Moulin (12,5 m³/s).

Dans les deux cas, le déversoir de crue au Moulin est un ouvrage passif, débitant une faible partie du débit.

7.4.5. Résultats

Les tableaux suivants présentent les résultats d'évolution de niveau d'eau au droit des différentes sections d'intérêts en situation projetée. Ces résultats exposent le scénario où les centrales sont en fonctionnement, de l'étiage à 3 modules.

Tableau 20. Évolution des niveaux d'eau (NE) amont et aval et de la chute en situation projetée pour les débits caractéristiques et en condition de centrale en fonctionnement

Débit caractéristique	Débit Doubs	Entrée PAP	NE à la sonde AM (situation existante)	NE sonde AM (modélisé - sitproj)	NE moyen au seuil	Entrée canal Forges	Confluence canal de fuite - Grand Doubs	Confluence Petit Doubs - Grand Doubs - (NE modélisé)
	m ³ /s	[mNGF]	[mNGF]	[mNGF]	[mNGF]	[mNGF]	[mNGF]	[mNGF]
Etiage	9.3	288.69	288.54	288.68	288.69	-	-	286.09
Q équipement - 1 vis	20.5	288.69	288.58	288.69	288.69	-	-	286.28
Q équipement - 2 vis	33.0	288.69	288.62	288.68	288.69	288.68	286.50	286.46
Q équipement - 3 vis	45.5	288.69	288.65	288.68	288.69	288.66	286.67	286.61
P50	48.7	288.71	288.66	288.68	288.70	288.67	286.71	286.65
Module	80.8	288.84	288.74	288.83	288.84	288.82	287.03	286.92
2 Modules	161.2	289.02	288.87	288.99	289.01	288.98	287.58	287.39
3 Modules	242.4	289.04	288.99	288.99	289.02	288.92	288.11	287.89

Les Tableau 22 et Tableau 21 reprennent les résultats des mêmes simulations mais se concentrent sur la chute au droit de chaque centrale.

Les grilles ne sont pas intégrées dans le modèle géométrique de la situation projetée. Leur prise en compte se fait par l'ajout d'une perte de charge moyenne de 5 cm à l'entrée des vis. L'analyse de sensibilité réalisée montre que la prise en compte des pertes de charge à la prise d'eau et non en localisation exacte du plan de grille nous montre une variabilité de l'ordre de 0,003 m. Cette variabilité peut donc être négligée et cette hypothèse est validée.

Il est rappelé que les pertes de charge au sein de la grille sont principalement fonction de son encombrement par des embâcles. Son état de propreté est à conserver pour viser la meilleure efficacité possible.

Tableau 21 : Résultats hydrauliques à la centrale du Moulin (intégrant les pertes de charge à la grille)

Débit caractéristique	Débit Doubs	Amont Moulin	Amont Moulin après grilles	Aval Moulin	Chute Moulin
	m ³ /s	[mNGF]	[mNGF]	[mNGF]	[mNGF]
Etiage	9.3	288.68	288.68	286.09	2.59
Q équipement - 1 vis	20.5	288.59	288.54	286.35	2.19
Q équipement - 2 vis	33.0	288.59	288.54	286.51	2.03
Q équipement - 3 vis	45.5	288.58	288.53	286.65	1.88
P50	48.7	288.59	288.54	286.69	1.85
Module	80.8	288.77	288.72	286.97	1.75
2 Modules	161.2	288.95	288.90	287.46	1.44
3 Modules	242.4	288.99	288.94	287.96	0.98

On constate que la chute s'étend de 2,59m à 0,98m à la vis du Moulin.

Tableau 22 : Résultats hydrauliques à la centrale des Forges (intégrant les pertes de charge à la grille)

Débit caractéristique	Débit Doubs	Amont Forges	Amont forges après grilles	Aval Forges	Chute Forges
	m ³ /s	[mNGF]	[mNGF]	[mNGF]	[mNGF]
Etiage	9.3	-	-	-	-
Q équipement - 1 vis	20.5	-	-	-	-
Q équipement - 2 vis	33.0	288.66	288.61	286.53	2.08
Q équipement - 3 vis	45.5	288.58	288.53	286.76	1.77
P50	48.7	288.60	288.55	286.79	1.76
Module	80.8	288.75	288.70	287.09	1.61
2 Modules	161.2	288.92	288.87	287.62	1.25
3 Modules	242.4	288.94	288.89	288.17	0.72

Au droit de la centrale des Forges la première vis entre en fonctionnement après un débit dans le Doubs de 33 m³/s. La seconde vis est amorcée à partir d'un débit de 45,5 m³/s dans le Doubs. Les chutes s'étalent de 2,08m à 0,72m.

Le Tableau 23 présente une proposition de gestion du débit entre trois et cinq modules, lorsque les centrales sont à l'arrêt. Bien qu'ils aient une plus grande capacité, les ouvrages de décharge sont ouverts pour faire passer 25 m³/s aux Forges et 12,5 m³/s au Moulin. La vanne du grand seuil est alors ouverte pour y faire passer le débit « excédentaire », permettant de limiter le niveau d'eau amont au niveau existant.

Tableau 23 : Allocation de débit et niveaux d'eau au grand seuil - hautes eaux, centrales à l'arrêt

Débit caractéristique	Q Doubs	Q TCC	Q ouvrages d'évacuation (petit Doubs et Forges)	Q vannes du seuil	NE sonde AM (situation existante)	NE sonde AM (modélisé - situation projetée)
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[mNGF]	[mNGF]
3 Modules (OFF)	242.4	204.90	37.5	67.14	288.99	288.99
4 Modules (OFF)	323.2	285.70	37.5	93.36	289.09	289.09
5 Modules (OFF)	404	366.50	37.5	103.87	289.21	289.2

On constate que le niveau d'eau au seuil, au droit de la sonde est bien identique au niveau d'eau observé en situation existante. En conséquence de la rehausse, le niveau d'eau doit être régulé par la vanne du grand seuil à faire passer un débit de 67,14m³/s pour 3 modules à 103,87 m³/s à 5 modules. Pour ce dernier débit, la vanne du grand seuil est complètement ouverte et à pleine capacité.

Rappelons que les ouvrages de décharge du petit Doubs ne sont pas ouverts à pleine capacité pour leur part :

- La section de la vanne de décharge au Moulin permet d'évacuer un débit maximal d'environ 35 m³/s à la cote de retenue fixée. Nous limitons cette valeur à 12,5 m³/s (soit le débit nominal de la turbine du Moulin) pour l'étude de l'incidence ;
- La section des vannes de décharge aux Forges permet d'évacuer un débit maximal d'environ 40 m³/s à la cote de retenue fixée. Nous limitons cette valeur à 25 m³/s (soit le débit nominal des turbines des Forges) pour l'étude de l'incidence ;

Au total, la section des vannes de décharge installée est de 56 m², pour une diminution de section au seuil limitée à 48,6m².

La nouvelle passe à poissons, située en amont du seuil permet également l'évacuation d'un débit compris entre 4 et 10,4 m³/s, en fonction du débit de la rivière, constituant une nouvelle voie d'évacuation sur le site.

Le projet présente donc une marge de sécurité réel pour garantir un niveau d'eau inférieur ou égale à l'existant en cas de crue.

8. Continuité écologique

Cette section est destinée à présenter les éléments d'intégration de la continuité écologique au sein du projet. Pour rappel, la continuité écologique se définit selon les deux processus naturels suivants :

- Le transit sédimentaire
- La libre circulation piscicole

Il est à noter que la libre circulation piscicole est envisagée dans les sens de la montaison et de la dévalaison.

8.1. Transit sédimentaire

8.1.1. Situation existante

Le miroir du barrage semble s'étendre vers l'amont jusqu'à l'affluent situé au niveau du village de La Prétière, où plusieurs sauts hydrauliques sont observés. Cet affluent correspond à un canal de décharge de la centrale hydroélectrique de La Prétière.

La zone amont du seuil peut donc être considérée comme un bassin de décantation dans lequel les sédiments viennent s'accumuler, tandis qu'une zone d'érosion est présente à l'aval du seuil où l'énergie de l'eau est suffisante pour emporter les plus gros sédiments vers l'aval. Cette situation est classiquement rencontrée lorsqu'un seuil est présent en rivière. Dans le cas du site de L'Isle-sur-le-Doubs, la présence du Petit Doubs permet d'évacuer une partie de ces sédiments dans sa direction. Le phénomène d'accumulation et d'érosion est alors encore plus marqué au niveau du seuil secondaire.

Les profils en long permettent également d'illustrer cette dynamique, avec un creusement marqué à l'aval.

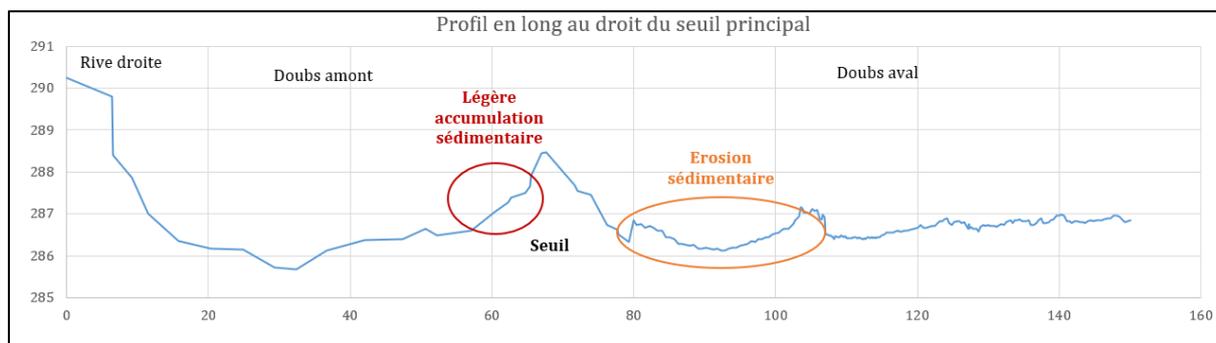


Figure 24 : Profil en long au droit du seuil principal issus des plans (annexe 8)

L'analyse granulométrique des sédiments met également en évidence un colmatage des sédiments à l'amont, avec 100% de sédiments de fraction inférieure à 2 mm tandis qu'à l'aval, cette fraction ne représente plus que 60%.

L'analyse sédimentaire a également permis de démontrer l'absence de pollution (métaux lourds, PCBs, HAP, selon la norme S1, annexe 10).

Actuellement, le transit sédimentaire est principalement confiné aux épisodes de crues par surverse sur le barrage.

8.1.2. Situation projetée

Actuellement, le transit sédimentaire est réalisé uniquement par l'ancienne petite vanne au droit du seuil secondaire limitant le transit sédimentaire. Le projet prévoit un rétablissement complet du transit sédimentaire par les ouvrages suivants :

- seuil principale : deux vannes clapet de décharge (32 m²) capable de s'abaisser jusqu'au radier
- seuil secondaire : un vanne clapet de décharge (11 m²) capable de s'abaisser jusqu'au radier
- centrale des forges : deux vannes de décharge (2x6 m²)

Le transport sédimentaire s'observe selon deux modes de transport.

Le premier est le charriage ou saltation qui s'observe lors des épisodes hydrologiques forts. Les matériaux présents dans la rivière sont entraînés vers l'aval en conséquence des forces qui leur sont appliqués par le flux d'eau. Plus le flux (vitesse d'écoulement) est important, plus le charriage sera marqué. Généralement, ce sont les sédiments les plus grossiers qui sont concernés par ce mode de transport.

Le deuxième mode est la suspension. La suspension regroupe les transports de sédiment qui flottent naturellement dans l'eau même lors de conditions hydrologiques ordinaires (absence de crue). Ces sédiments sont généralement nommés matières en suspension (MES). Il s'agit ici du transport des matériaux les plus fins.

8.1.3. Charriage

Le charriage nécessite des sections de passage importantes du fait de la taille des sédiments concernés par le charriage. En outre, il ne s'active que lors des épisodes hydrologiques forts. Dans ces conditions, le charriage sera pris en charge par les vannes des décharges installées en parallèle des centrale hydroélectriques et les vannes installées dans le seuil de dérivation. Comme illustré dans le tableau d'allocation des débits, les vannes commenceront à s'ouvrir pour conserver une cote amont de 289.02 mNGF. Au-delà de ce débit, les vannes continueront à s'ouvrir pour conserver cette cote amont jusqu'à être pleinement ouverte.

8.1.4. La suspension

La suspension concerne les éléments les plus fins qui ne sédimentent pas. Afin de laisser ce processus se dérouler, l'intérêt du projet par rapport à cet enjeu réside dans le type de grille de protection et le type de turbines qui ne bloquent pas les sédiments en suspension.

8.2. Continuité piscicole

Le présent chapitre rappelle le dimensionnement des ouvrages de franchissement (montaison et dévalaison), vérifie leur fonctionnement hydraulique à l'aide du programme Cassiopée et HecRas, justifie les choix opérés et démontre l'attractivité de ces ouvrages.

Le cours d'eau n'étant pas classé, les espèces cibles des ouvrages de continuité écologique sont issues de l'étude de Téléos Suisse en collaboration avec la Fédération de la Pêche (25) réalisée en 2015 (1).

Ainsi, les espèces holobiotiques recensées en 2015 sont nombreuses : Barbeau commun, Goujon, Vandoise, Spirlin, Chevesne, Toxostome, Loche franche, Gardon, Brochet, Perche, Ablette, Lamproie de Planer, Chabot, Vairon, Brèmes, Carpe, Tanche, la truite fario et le Rotengle. Les anguilles probablement issues de repeuplements piscicoles sont les représentants de l'espèce amphihaline présente.

Les ouvrages de franchissement piscicoles prendront en compte ce cortège piscicole.

8.2.1. Situation existante

Le seuil de L'Isle-sur-le-Doubs n'est pas franchissable en l'état par les espèces piscicoles en raison de la présence du seuil et de l'absence d'ouvrage de montaison spécialement dédiés.

La dévalaison est possible par surverse sur le seuil principal et secondaire lorsque l'hydrologie le permet ou via les buses de la prise d'eau des anciennes forges lorsque le niveau d'eau est suffisant.

L'ouvrage de L'Isle-sur-le-Doubs peut donc être considéré comme totalement infranchissable (Classe ICE = 0) en l'état actuel.

Réglementairement, le Doubs au droit de l'Isle-sur-le-Doubs n'est pas classés au sens de l'article L214-17 du code de l'environnement. Il n'est donc pas imposé par la législation d'installer une passe à poissons dans le cadre du projet.

8.2.2. Passe à poissons

Toutefois, le porteur de projet prévoit d'installer une passe à poissons en contournement du seuil par la gauche. Cette passe à poissons est donc présentée en tant que mesure compensatoire au sens de la séquence ERC.

¹ Rossignon Christian, Groubatch Thomas, Poulleau Thomas, Paris Jonathan, Périat Guy, 2015. Evaluation de l'état de conservation des peuplements piscicoles du Doubs Moyen (25) en 2015 - Diagnostic et perspectives.

Caractéristiques de la passe

Tableau 24 : Caractéristiques de la passe à poissons

Type de passe	Passe naturelle à enrochement régulièrement répartis
Zone d'implantation	Contournement du seuil par la gauche (parcelle AK 0400)
Débit de fonctionnement	4 m ³ /s
Considération piscicole	Passe multi-espèces
Chute considérée	2 m
Puissance dissipée maximale	200 à 300 W/m ³
Pente	3 à 4 %
Débit unitaire	Entre 0.20 et 0.45 m ³ /s/m
Hauteur d'eau	Entre 0.4 et 0.8 m
Vitesse débitante	0.8 à 1 m/s
Vitesse moyenne entre les blocs	1.3 à 1.5 m/s

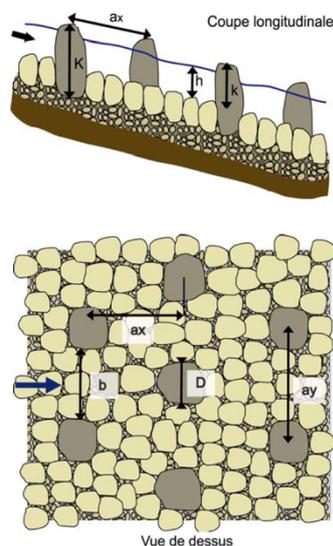


Figure 25 : Schéma d'une disposition régulière des enrochements et notations

Figure 25 : Représentation schématique d'une passe à enrochements régulièrement répartis

Implantation

Le projet bénéficie de la possibilité de s'implanter sur la parcelles cadastrale AK 0400. Il s'agit de la parcelle adjacente à l'extrémité gauche du seuil. La passe à poissons est prévue sur cette parcelle. Cette implantation permet de limiter au maximum les interventions sur le seuil et de ne pas entraver sa capacité débitante. La figure reprise ci-dessous illustre l'implantation de la passe.

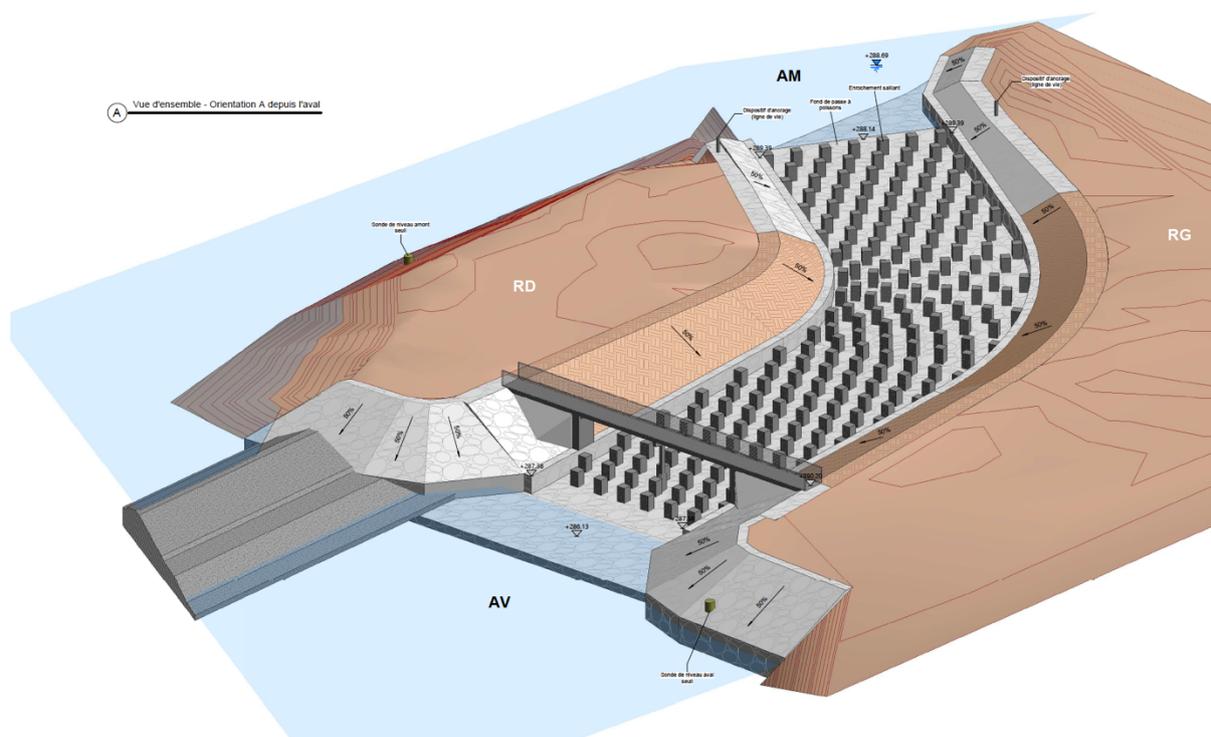


Figure 26 : Vue 3D de la passe à poissons

Cette implantation présente plusieurs avantages :

- L'entrée piscicole est située à proximité du pied du seuil situé à l'**amont**, cela favorise sa localisation par les poissons et réduit les risques de retard à la migration ;
- La sortie piscicole est implantée suffisamment loin du seuil pour éviter les risques de réabsorption des poissons vers l'aval ;
- L'ouvrage ne s'implante pas sur le seuil, ce qui permet à ce dernier de conserver ses capacités d'évacuations ;
- Les travaux seront implantés majoritairement en dehors du lit mineur, cela permettra de limiter les incidences sur la rivière en phase travaux ;
- La mise à sec et les moyens d'entretien à mettre en œuvre seront limités ;
- L'accès sera plus facile et rendra les opérations de maintenance plus facile et plus sûrs.

Évolution des niveaux d'eau

La passe est dimensionnée en fonction des niveaux d'eau présents en amont et en aval du seuil et de leur évolution en selon le débit du Doubs. Pour faciliter la compréhension du lecteur, le tableau présenté ci-dessous reprend les mesures réalisées sur le TCC dans le cadre de l'avant-projet pour réaliser ce calage.

Tableau 25 : Évolution des niveaux d'eau dans le TCC

Opérateur	MTBE	Bathymétrie drone	Géoplans
Date	20-07-23	20-01-23	30-04-20
Débit	9.74 m ³ /s	122 m ³ /s	15.6
Profils	mNGF	mNGF	mNGF
881 gauche	286.88	287.95	287.14
881 centre	286.92	287.63	287.08
881 droite	286.75	287.63	286.7
724 gauche	286.26	287.63	
724 droite	286.26	287.56	286.28
673	286.23	287.53	286.25
569.00	286.10	287.52	286.17

L'entrée piscicole sera située au droit du profil 881 gauche, voir Figure 19. L'étude se concentre donc sur les niveaux d'eau au droit de ce profil.

La chute à considérer est limitée à l'aval par le niveau d'eau **286.88** mNGF en conditions d'étiage. Toutefois, l'implantation de la passe viendra modifier les conditions d'écoulement à cet endroit. Les nouveaux écoulements pourraient localement provoquer des modifications sur le fond de rivière par remise en suspension de sédiments. Ces modifications pourraient être à l'origine d'un abaissement du niveau d'eau aval. Afin d'anticiper ce risque, nous proposons ici d'intégrer une marge de sécurité de 20 cm et de porter le niveau d'eau aval minimal à prendre en considération à la cote **286.68** mNGF. Pour une passe à bassins, cette prise de sécurité pourrait poser des problèmes dans les écoulements et des difficultés de localisation. S'agissant d'une passe à enrochements régulièrement répartis, ces problèmes ne se posent pas, en effet, l'homogénéité globale de la passe permet d'absorber les remontées de niveaux d'eau aval sans perte d'efficacité. Toutefois, afin de limiter les évolutions du lit mineur, il est prévu de stabiliser localement le fond de rivière par un enrochement au pied de la passe.

Le niveau d'eau amont considéré est celui prévu pour la régulation dans le cadre de la situation projetée, à savoir **288.69** mNGF. Le projet prévoit une montée du niveau d'eau amont selon le débit. La passe doit présenter des conditions de fonctionnement favorable pour un débit allant jusqu'au percentile P10, à savoir, 191.6 m³/s. Pour un tel débit, le niveau sera de **289.02** mNGF. Il s'agit donc là de la plage de niveau d'eau amont à considérer. Comme illustré dans le chapitre consacré à l'hydraulique, ce niveau d'eau amont sera conservé jusqu'à 3 modules (242 m³/s). Le calage est donc valable sur une plage de débit allant au-delà du minimum requis.

Caractéristiques dimensionnelles

Le tableau inséré ci-dessous reprend les caractéristiques dimensionnelles principales de la passe. Il est issu du dimensionnement réalisé au moyen du logiciel Cassiopée.

Tableau 26 : Caractéristiques dimensionnelles de la passe à poissons

Paramètres fixés	Valeurs
Cote de fond amont (mNGF)	288.14
Longueur (m)	57
Largeur (m)	12.33
Pente (m/m)	0.035
Rugosité de fond (m)	0.1
Concentration de blocs	0.1
Diamètre (m)	0.6
Hauteur (m)	1.05
Forme (1 pour rond, 2 pour carré)	2

Fonctionnement hydraulique

Pour rendre compte du fonctionnement de la passe, les paramètres de fonctionnement sont communiqués dans le tableau ci-dessous. Nous pouvons nous apercevoir que ces paramètres respectent les critères de fonctionnement pour une passe considérée multi-espèces.

Tableau 27: Paramètres de fonctionnement hydraulique de la passe selon plusieurs profondeurs

	Profondeur	Débit (m ³ /s)	Cote de fond aval (m)	Vitesse débitante (m/s)	Vitesse moyenne entre les blocs (m/s)	Froude	Vitesse maximale (m/s)	Puissance volumique dissipée (W/m ³)	Type d'écoulement	Strickler équivalent (SI)
288.69	0.55	3.99	286.15	0.59	0.86	0.370	1.34	202.01	Émergent	4.685
288.79	0.65	5.13	286.15	0.64	0.94	0.371	1.45	219.76	Émergent	4.559
288.89	0.75	6.30	286.15	0.68	1.00	0.367	1.55	233.81	Émergent	4.41
288.99	0.85	7.48	286.15	0.71	1.04	0.361	1.62	245.00	Émergent	4.251
289.09	0.95	8.67	286.15	0.74	1.08	0.354	1.68	254.00	Émergent	4.092
289.19	1.05	9.86	286.15	0.76	1.11	0.347	1.72	261.30	Quasi-émergent	3.938

La passe montre un bon fonctionnement pour des hauteurs d'eau allant jusque 105 cm. Pour une telle hauteur d'eau dans la passe, le niveau d'eau amont sera de 289.19 mNGF. Le débit considéré en situation projeté pour un tel niveau d'eau amont est supérieur à 243 m³/s (trois modules) dans le Doubs. La passe fonctionnant depuis l'étiage et au-delà de 3 modules, nous pouvons considérer que la plage de fonctionnement est suffisante par rapport aux objectifs habituellement définis.

8.2.3. Dévalaison

La dévalaison est rendue possible pour les poissons en plusieurs endroits du projet. Les ouvrages prenants en charge la dévalaison sont les suivants :

- Turbines Ichtyocompatibles (vis hydrodynamiques) à la centrale du moulin et la centrale des forges ;
- Goulotte de dévalaison sur le côté droit du seuil ;

De manière épisodique, nous pouvons également citer le seuil comme moyen de dévalaison. En effet, lors des épisodes hydrologiques forts, la lame d'eau sur le seuil sera suffisante pour que les poissons puissent dévaler sans dommage corporel.

Turbines

Une vis hydrodynamique est ichtyocompatible sous certaines conditions, ces conditions sont reprises dans le tableau présenté ci-dessous.

Tableau 28 : Caractéristiques des vis hydrodynamiques

Type de turbines	Vis hydrodynamique (d'Archimède)
Nombre de turbines – nombre de spires	3 - 5
Débit nominal unitaire	12.5 m ³ /s
Vitesse de rotation des turbines – vitesse tangentielle	< 20 RPM – Vt < 4,5 m/s
Protection du bord amont des pales	Bumpers compressibles
Espacement entre les pales et l'auge en fonctionnement	5 mm
Pressions de fonctionnement	Atmosphérique
Mode de régulation	Vitesse variable et vannes de gardes
Protection	Grilles verticale et entrefer 150 mm
Mode de mise à sec	Batardage au moyen des rainures prévues à cet effet



Figure 27 : Protection du bords amont des pales

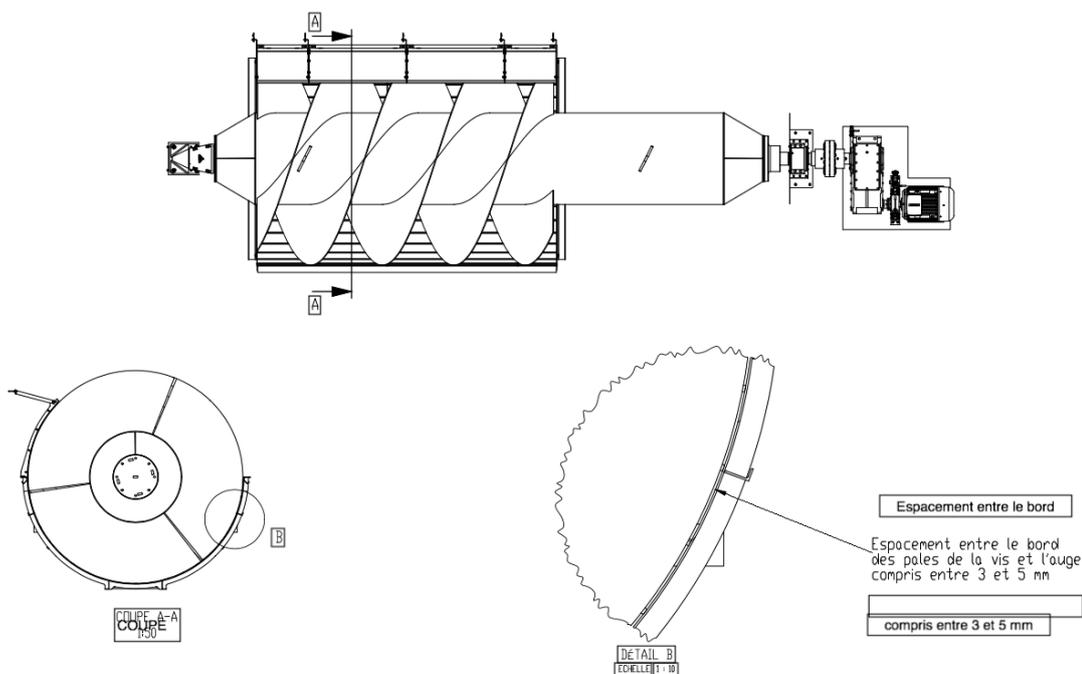


Figure 28 : Assemblage de la vis et de l'auge

Les caractéristiques de ce type de turbines leur permettant d'être qualifiées d'ichtyocompatibles sont les suivantes :

1. Vitesse de rotation réduite pour limiter le risque d'impact d'un poisson avec les pales. Si toutefois un choc devait se produire, la vitesse réduite de rotation permet de limiter la force de l'impact.
2. Protection des bords amont des pales par un bumper en caoutchouc compressible. Ces bumpers sont prévus pour garantir l'intégrité physique en cas de d'impact avec un poisson.
3. Un espacement réduit entre le bord des pales et l'auge. Cet espacement permet d'endiguer les risques de pincement (pitching) des poissons entre ces deux éléments. En outre, le mode transit de l'eau qui est rectiligne et parallèle à l'axe des turbines permet également de limiter ce risque. Si l'écoulement était concentrique, l'effet centrifuge induit serait de nature à emmener les individus vers l'auge. Dans le cadre des vis hydrodynamiques ce n'est pas le cas.
4. Un fonctionnement à pression atmosphérique permet de réduire les risques induits par de fortes variations de pressions (phénomène de cavitation).

Dès lors les caractéristiques reprises ci-dessus seront imposées au turbinier pour la production des machines.

En termes de durée de fonctionnement, les turbines seront pourvues de variateurs de fréquence. Cet équipement permet, en faisant varier la vitesse de rotation, d'abaisser le débit nécessaire pour démarrer une turbine. La plage de débit de fonctionnement d'au moins une turbine sera plus large. Pour favoriser la dévalaison lorsque le débit faible (fonctionnement d'une seule machine), la priorité sera donnée à la centrale du moulin. Selon ce mode de fonctionnement, la création de cul de sac sera limitée au maximum et les retards de déplacement seront donc aussi limités.

Échancrure de dévalaison

Afin d'offrir une voie de dévalaison vers le tronçon court-circuité, le projet prévoit l'installation d'une échancrure de dévalaison sur le seuil. L'emplacement prévu est situé sur la partie droite du seuil. Le projet prévoit de profiter de l'effet d'aubaine en considérant les besoins de réparation du seuil et l'emplacement de la vanne de décharge. En effet, une brèche dans le seuil s'est produite au cours du temps. L'objet de l'opération serait donc d'aménager cette brèche pour en faire un ensemble composé de la vanne de décharge et de l'échancrure permettant la dévalaison dans de bonnes conditions. Les caractéristiques principales de la goulotte sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Tableau 29 : Caractéristiques de la goulotte de dévalaison

Largeur utile	2.5 m
Radier à l'entonnement	288.00 mNGF
Radier en fin de goulotte	287.94
Pente du radier	1%
Tirant d'eau en régime uniforme	0.40 m
Pertes de charges à l'entonnement	0.28 m
Débit de fonctionnement	2 m ³ /s
Niveau d'eau aval étiage	286.70 mNGF
Niveau d'eau en fin de goulotte	288.74 mNGF
Chute en sortie de goulotte (étiage)	2.04 m
Aménagement fond naturel au droit de retombée du jet	285.70 mNGF
Tirant d'eau fosse de réception	1 m

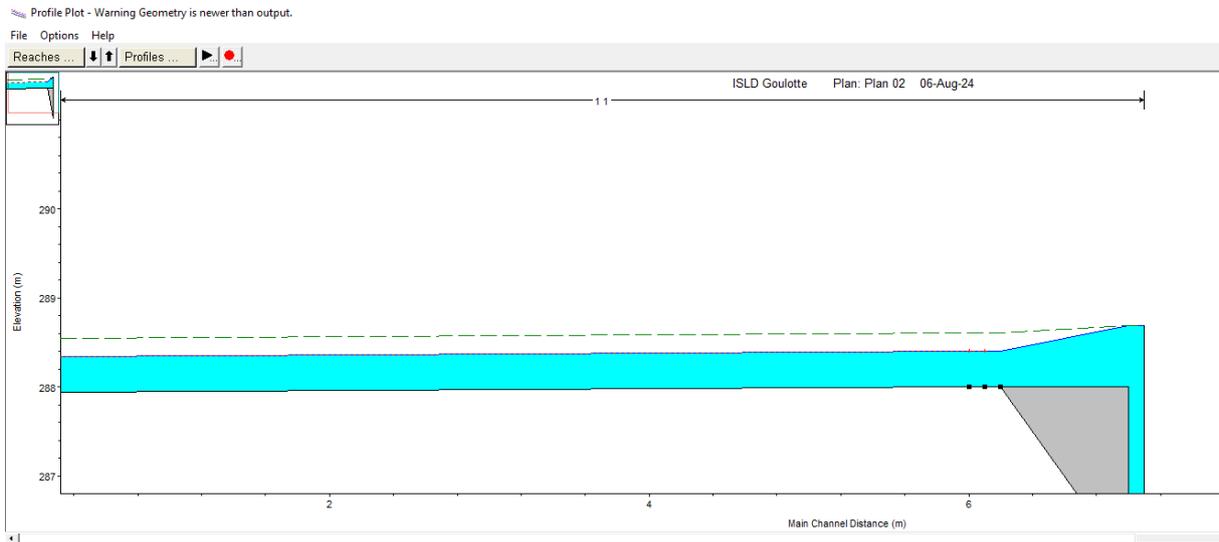


Figure 29 : profil de simulation hydraulique de la goulotte (HEC-Ras)

9. Méthodologie de mise en œuvre

La mise en œuvre d'un projet hydroélectrique se déroule en plusieurs étapes. A chacune de ces étapes, une attention particulière est portée sur les incidences du chantier par rapport à l'environnement. Le présent mémoire étant en grande majorité descriptif, la présente section se contentera de décrire ces différentes étapes. La mise en lumière et la justification des considérations pour l'environnement durant le chantier seront opérées au travers de l'étude d'incidence.

La mise en œuvre du projet se déroulera selon les étapes ci-dessous :

L'accès aux chantiers se fera à partir de la Rue du Maréchal de Lattre de Tassigny et ensuite à gauche de la Mairie de L'Isle-sur-le-Doubs au niveau du parc municipal. L'accès à la zone de la passe à poissons se ferait par le chemin de la station de pompage qui mène directement à la parcelle concernée par les travaux.

Étant donné l'accès au parc communal qui doit être maintenu en période touristique (mi-juin à mi-septembre), l'organisation du chantier est découpée en plusieurs étapes tant temporellement que spatialement. En effet, le chantier des forges et du seuil sera exécuté au niveau du parc communal hors période touristique tandis que l'installation de la passe à poissons, la mise en œuvre de la centrale du moulin et la remise en état du seuil secondaire seront réalisées lors de la période touristique, afin d'éviter une mise en chômage du chantier prolongée. De plus, la période touristique correspond également à la période d'étiage, dont les conditions hydrologiques sont les plus favorables à la mise en œuvre du projet.

Les chapitres suivants décrivent les différents éléments du chantier.

9.1. Chantiers principaux - Centrales

9.1.1. Installation de chantier

La première phase de réalisation du chantier vise l'aménagement de la zone en dehors du cours d'eau sur laquelle se dérouleront les travaux. Un espace suffisant est prévu pour permettre une mise en œuvre aisée et sécurisée. La zone de chantier sera séparée selon les besoins (zones de stockage des matériaux, zone de travail hors cours d'eau, zone de repos pour le personnel, zone de parcage, plateforme pour les engins de manutention, etc.).

Cette base de vie sera installée dans un bâtiment appartenant au porteur du projet, située en rive droite du petit Doubs au niveau de la parcelle cadastrale AI/0326 (l'ancienne parcelle AI/179 est maintenant cadastrée section AI parcelles n° 325 et n° 321).

Sur site, une partie de la parcelle cadastrale n° AK/0346 appartenant à la commune de L'Isle-sur-le-Doubs sera utilisée pour le stockage des matériaux et des déblais. Un accord entre le porteur de projet et la commune existe (**annexe 3b**). Cette parcelle est actuellement non-aménagée et est sécurisée par un grillage.

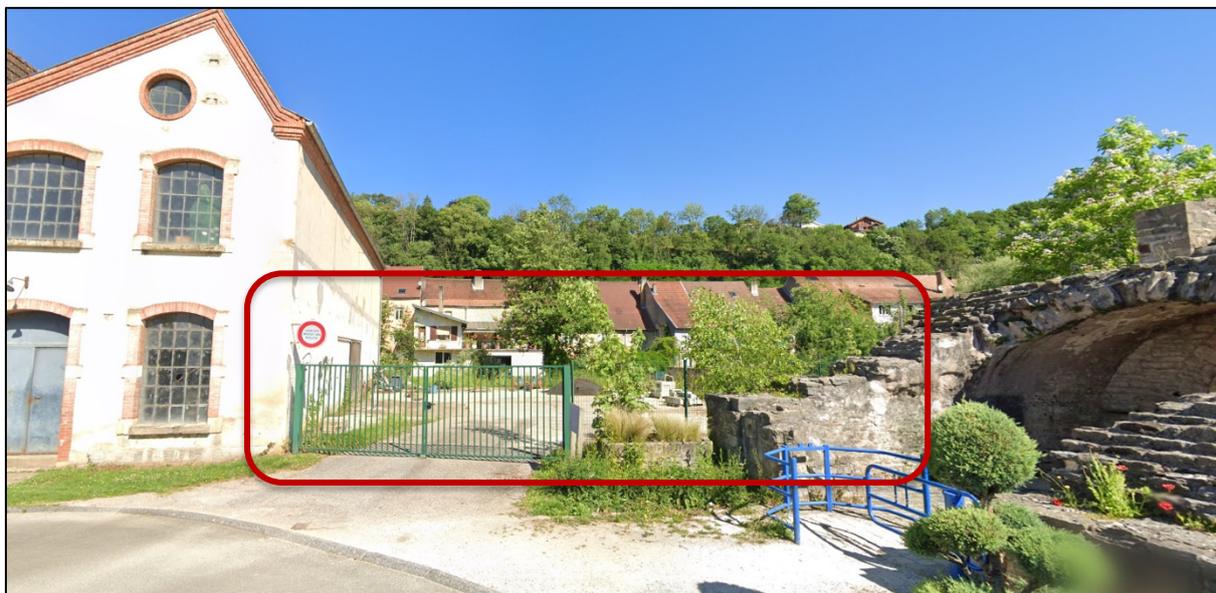


Figure 30 : Vue sur la parcelle cadastrale n°AK/0346 et la zone de stockage sécurisée (source : Google StreetView, 2022)

Toutefois, ces zones sont inondables et les éléments sources de pollutions potentielles ne doivent pas y être stockés. L'approvisionnement en hydrocarbures et en huiles diverses de fonctionnement des engins de chantier doit donc se faire de manière ponctuelle, sans stockage sur site. Ce point est abordé plus en détail dans l'étude d'incidences sur l'environnement du présent projet. La zone de parking présente le long de la rue du moulin au niveau du seuil de retenue est située en dehors de l'aléa d'inondation. Elle pourrait servir au stockage des de ces produits. Des discussions sont à mener avec la commune pour l'occupation de ce terrain.

En situation de chômage, les engins seront stockés en bordure de la rue du Moulin. Cette zone est située hors aléa d'inondation au regard du PPRI du Doubs central.

Ces zones sont accessibles directement pour tout type de véhicules.

9.1.2. Aménagement des accès

L'accès au chantier des forges ne nécessite pas d'aménagement particulier jusqu'au le parking de la mairie. Au-delà de ce parking, un aménagement temporaire pour le passage des engins de chantier sera installé afin d'éviter l'impact du passage des engins sur le parc communal.

9.1.3. Mise en place des batardeaux

La zone de travail au sein du lit mineur du cours d'eau doit être délimitée par une barrière physique. Cette barrière permet de :

- Entraver l'arrivée d'eau vers la zone de travail et ainsi de travailler dans une zone à sec sous conditions que l'eau présente à l'intérieur des batardeaux soit pompée et rejetée vers l'aval du cours d'eau ;

- Créer une piste autour du chantier qui soit empruntable par des véhicules et engins de chantier lorsque le batardeau est en place ;
- Protéger le chantier des crues.

La méthodologie de mise à sec est envisagée selon les contraintes imposées par le milieu, les conditions hydrologiques et hydrauliques. Enfin, la sobriété d'implantation intervient également dans le choix porté sur le type de batardeau à mettre en place.

Centrale du moulin → Barrage autogonflant (type Aquadam)

Ce choix se justifie par le faible tirant d'eau (< 2m), la limite d'accès et l'intérêt présenté par rapport à la réduction de mise en suspension de matière.

Centrale du moulin - Entretien rectification embouchure du Doubs → Batardeau en terre

Le batardeau prévu en amont de l'embouchure du petit Doubs, sera réalisé en terre. Ce choix se justifie par la taille de celui-ci, son emplacement et le manque d'accessibilité. En effet, ces trois éléments imposent la contrainte de créer des accès carrossables pour les engins de chantier. Seul le batardeau en terre offre cette possibilité. De plus, il sera utilisé comme voie d'accès entre les deux côtés de la centrale projetée. Sa largeur de crête sera donc de 3 m.

Centrale des forges → Amont : Big-bags, Aval : Barrage autogonflant

Les big-bags seront installés pour la période hivernale, ils devront donc faire face à de plus gros épisodes de crues. Leur robustesse et leur hauteur utile devront donc être plus importante. Par rapport à un batardeau en terre, ils présentent une facilité de mise en place plus intéressante et une meilleure solution par rapport à l'augmentation de la concentration en matière en suspension. A l'aval, un barrage autogonflant trouve son intérêt par sa facilité de mise en place et la sobriété de l'intervention.

Passe à poissons → Barrage autogonflant

Ce choix se justifie par le faible tirant d'eau (< 2m), la sobriété de l'intervention et l'intérêt présenté par rapport à la réduction de mise en suspension de matière.

Entretien rectification entrée du petit Doubs → Piste d'accès en terre

La rectification de l'embouchure du Doubs sera réalisée depuis la rivière. Une piste d'accès sera réalisée depuis le parc en partant vers l'amont jusqu'au tier droit du seuil. Cette piste servira pour mettre à sec ce tier droit de seuil. Une fois à sec, les travaux prévus (crête et échancrure de dévalaison) seront réalisés. La piste devra donc être dimensionnée de manière suffisante par rapport au niveau d'eau amont en permettant une circulation sur sa crête sans contact avec l'eau. De ce fait, cette piste devra se calculer en fonction de sa cote de crête. Cette cote est déterminée en fonction de l'hydrologie du cours d'eau. Le batardeau doit être suffisamment haut pour protéger le chantier des montées de niveaux d'eau, mais il ne doit pas être à l'origine d'un risque supplémentaire par rapport aux crues.

Les données de débits observés sur la période de chantier envisagée sont reprises sur le graphique ci-dessous, pour chaque année de la période 2003-2022. L'observation de celui-ci mène à la conclusion, que l'ensemble des débits ne peut être absorbé dans le cadre de la protection des chantiers par rapport aux crues. Cela est en grande partie dû à la période hivernale de chantier pour la centrale des forges. Il faut néanmoins remarquer que même durant la période estivale, des

débits allant jusque 300 m³/s sont régulièrement observés. Dès lors, il ne sera pas possible d'éliminer totalement le risque d'ennoiement des chantiers au moyen de batardeaux. En effet, les batardeaux devraient être montés trop haut pour une telle protection.

En conséquence de cela, le porteur de projet fait la proposition de prévoir des batardeaux amont de 2m de hauteur utile pour les Aquadam. Pour le batardeau en big-bags, la cote de 289.50 mNGF sera visée. Celle-ci permettra d'absorber les crues allant jusque (450 m³/s). Pour le batardeau en terre, la cote proposée sera de 290 mNGF afin d'absorber des crues plus importantes et de compenser la réduction de la longueur de déversement du seuil.

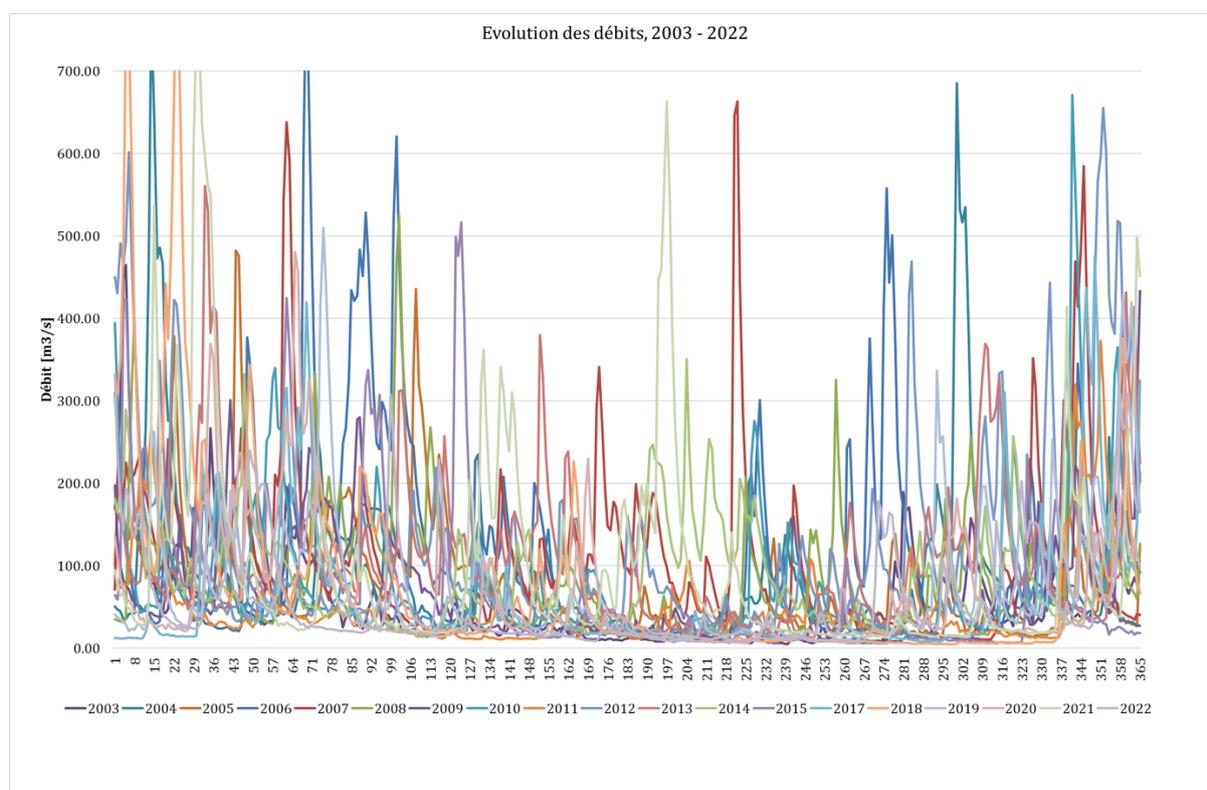


Figure 31 : Évolution des débits journaliers 2003-2021 observés au niveau du site en projet, pour la période de travaux (source : hydro.eaufrance.fr)

9.1.4. Mise à sec de la zone de chantier

Pour poursuivre la mise en œuvre, il est nécessaire de mettre la zone de chantier à sec. Délimitée par les batardeaux, il faut pomper l'eau présente à l'intérieur de ces batardeaux. L'eau pompée est restituée au plan d'eau aval. Le pompage sera effectif durant toute la durée du chantier. Dans les faits, il est pratiquement impossible d'avoir une zone totalement étanche. Le chantier est soumis aux infiltrations au travers des batardeaux et aux remontées de nappes phréatiques. Le débit de pompage sera adapté en fonction du besoin de pompage pour maintenir la zone à sec.

Pour limiter la concentration en matières en suspension des eaux pompées, il est prévu d'implanter un bassin de décantation au sein de chaque zone de travail. Les eaux pompées

transiteront ensuite par ce bassin où la décantation sera effective et les eaux de ce bassin seront ensuite restituées au chenal aval par surverse dans des conduites cylindriques.

Les dimensions du bassin de décantation sont fonction de trois paramètres :

- La concentration en matière en suspension des eaux à décanter ;
- Le débit d'eau à décanter ;
- La concentration maximale en MES des eaux à restituer.

Ces paramètres sont difficiles à déterminer en phase d'avant-projet. Un exemple de dimensionnement reprenant des hypothèses habituellement rencontrées est présenté ci-dessous.

Tableau 30 : Exemple de dimensionnement type d'un bassin de décantation

Données de site			
Débit	q	0.055	[m ³ /s]
Diamètre particule	d	0.2	[mm]
Données de choix / contrainte			
Largeur utile	B	1.00	[m]
Hauteur utile	h	1.50	[m]
Vérification compatibilité largeur & hauteur			
Vérif $B \leq 2 \cdot h$	$1 \leq$	3	OK
Largeur fixée => hauteur min	h_min	2	[m]
Hauteur fixée => largeur max	h_max	3	[m]
Détermination longueur minimale dessableur - critère géométrique $B \leq L/8$			
Longueur dessableur tel que $B \leq L/8$	L1	8	[m]
Détermination longueur minimale dessableur - critère de vitesse ($V_t \leq V_{cr}$)			
Surface section	A	1.5	[m ²]
Périmètre mouillé	P	4	[m]
Rayon hydraulique	Rh	0.38	[m]
Vitesse translation critique	v_cr	0.16	[m/s]
Vitesse de translation dans dessableur	v_t	0.04	[m/s]
Vérif OK $v_t < v_{cr}$		OK	
Vitesse de chute en eau calme (Abaque Bouvard, 1984)		0.02	[m/s]
Vitesse de chute en eau calme (formule de Zanke ; $\rho_s/\rho_{eau} = 2,65$; $T = 20^\circ\text{C}$)		0.03	[m/s]
=> Vitesse moyenne (min-max)	v_D0	0.024	[m/s]
Facteur de réduction eau agitée	α	0.11	[1/m ^{0.5}]
Vitesse de chute en eau agitée (min)	v_D	0.020	[m/s]
Longueur minimale dessableur	L2	5.0	[m]
Vérif $B \leq L/8$	$1 \geq$	0.63	NOK
Détermination longueur minimale dessableur - critère géométrique $B \leq L/8$			
Critère dimensionnant		Critère géométrique	
Longueur minimale dessableur		8.0	[m]

Le dimensionnement du bassin de décantation se basera sur cet exemple en prenant en compte les valeurs mesurées lors du chantier.

Le bassin de décantation sera placé de manière à pouvoir collecter les eaux pompées à l'amont et à l'aval. La restitution se fera via un exutoire de surface jusqu'au plan d'eau aval. L'emplacement exact du batardeau ne saurait être défini tant que la sélection du prestataire de terrassement n'a pas été réalisée.

Une fois les batardeaux installés et un pompage partiel réalisé, une pêche de sauvegarde sera réalisée afin de sauvegarder les individus piscicoles. Cet aspect est développé dans l'étude d'incidences du présent projet.

9.1.5. Excavations

Lorsque la zone est à sec, les travaux de préparation du fond de rivière pour la réception des ouvrages de génie civil peuvent être opérés. Il s'agit principalement d'excavation et de terrassement d'une part et de démolition d'ouvrages d'autre part. Les niveaux à atteindre sont renseignés dans les plans. Ces opérations nécessitent des engins de manutention et excavation tels que des pelles mécaniques, des dumpers, des camions de transports, etc.

Ces opérations comprennent les points suivants :

- La préparation du terrain ;
- Les déblais mécaniques ;
- Les déblais manuels ;
- Les talus, les blindages ;
- Le compactage et l'égalisation du fond de fouille ;
- Le nivellement du fond de fouille (après déblai) ;
- L'évacuation des matériaux impropres et des décombres.

Ces opérations prendront place directement depuis le parc communal, au niveau du moulin et de la passe à poissons. Pour la centrale du moulin, la dépose des ouvrages existants est prévue. Pour la centrale des forges, une ouverture du terrain sera réalisée directement au-dessus des buses existantes. L'excavation du terrain progressera au fur et à mesure, en parallèle à la dépose des buses et de leur radier. Les dimensions finales projetées sont reprises sur les plans en **annexe 2**.

L'ensemble des terres de déblais et des éléments de décombres (buses et radiers) sera stocké au niveau de la parcelle cadastrale n° AK/0346 en attendant d'être renvoyé vers des filières de revalorisation. Une grande majorité des terres de déblais sera réutilisée directement pour stabiliser les ouvrages et pour les recouvrir afin de favoriser leur intégration paysagère dans le parc communal.

En parallèle à l'excavation nécessaire à l'installation de la centrale, un remaniement du canal de fuite est nécessaire afin de permettre l'évacuation uniforme des eaux turbinées. Pour ce faire, le canal de fuite sera reprofilé et les sédiments extraits seront rendus à la rivière ou exportés vers des filières de revalorisation selon leur granulométrie.

Les sédiments de la rivière extraits lors du chantier seront, dans l'ordre :

- Entreposés pour ressuyage sur les parcelles A529 et A511, proche du chantier (+/- 800m) ;
- Criblés pour séparer la partie morphogène ;
- Restitués pour partie (morphogène) à la rivière ;

- Mise à disposition pour partie (morphogène) pour une recharge en sédiment en d'autres point du bassin versant du Doubs ;
- Revalorisés dans d'autres filières pour la partie non morphogène.

Pour la partie morphogène restituée au site, les sédiments seront déposés en tas relativement compacts sous forme de chapelets sur l'île centrale du site (n° cadastral ZC/0019) et en bordure de rivage, et seront dès lors réactivés au fur et à mesure des épisodes hydrologiques forts. Cette méthodologie évite la descente de camions dans le cours d'eau, limite le colmatage en laissant la majorité du lit du cours d'eau disponible pour l'écoulement des eaux et n'engendre pas un pic unique important de MES, mais plusieurs pics plus réduits et espacés dans le temps.

9.1.6. Mise en œuvre des ouvrages de génie civil

Lorsque la zone est prête, la mise en œuvre des ouvrages de génie civil peut être entamée. Cette mise en œuvre se déroule comme suit :

- Coulage du béton de propreté ;
- Coulage de la couche de forme ;
- Coulage du radier et mise en place du ferrailage de reprise des voiles ;
- Mise en place du ferrailage et coffrage des voiles et cloisons ;
- Coulage des voiles et cloisons ;
- Mise en place du ferrailage et coffrage des dalles ;
- Coulage des dalles.

L'agencement de chacun de ces éléments est consultable sur les plans.

9.1.7. Installation des éléments électromécaniques

Lorsque le génie civil de première phase est achevé et réceptionné, les éléments électromécaniques peuvent être installés. Les principaux éléments sont installés en premier lieu, à savoir ; turbines, vannes, grilles, etc. Cette installation se fait au moyen d'engins de manutention. Le scellement de ces éléments se fait directement dans le génie civil de première phase par coulage du béton de seconde phase.

Les éléments électriques et de régulation sont installés par la suite au sein du local technique. Un contrôle des installations par un organisme agréé est prévu lorsque l'installation sera achevée.

9.1.8. Génie civil de seconde phase

Le génie civil de seconde phase est principalement constitué par les bétons de scellement qui sont par définition mis en œuvre ultérieurement à la pose des éléments électromécaniques.

Les éléments électromécaniques concernés par le génie civil de seconde de phase sont listés au point 9.1.7.

9.1.9. Remise en état du site

Afin d'assurer la disponibilité du site en période touristique, le site sera remis en l'état dès le génie civil de seconde phase achevé. L'installation du local technique et du raccordement électrique sera réalisée ultérieurement.

Le site sera remis en l'état dès mi-juin, comprenant :

- La dépose des batardeaux ;
- Le terrassement de remise en état ;
- Les gazonnements.

Des travaux seront encore à réaliser ultérieurement et la remise en l'état sera donc minimale.

9.2. Finalisation des chantiers

9.2.1. Installation des locaux techniques

Une fois la période touristique terminée, le chantier principal pourra être achevé. L'achèvement du chantier principal inclut principalement l'installation du local technique accueillant les tableaux électriques permettant la jonction entre les turbines et le réseau électrique. Certains éléments pourraient également être achevés en seconde phase, selon l'avancement du chantier avant la pause de la période touristique.

Le site sera ensuite remis en état de manière définitive.

9.2.2. Mise en service et raccordement électrique

Le raccordement électrique et la mise en service pourront être effectués dès lors que les installations seront réceptionnées par un organisme agréé. Les premiers kilowattheures sont injectés sur le réseau. Le bon fonctionnement des organes de contrôle-commande est également vérifié et ajusté si nécessaire. Il s'agit de la mise en service des installations.

9.3. Travaux d'entretien du seuil principal et de l'entrée du petit Doubs

Une fois les centrales et la passe à poissons construites et fonctionnelles, la zone amont du site fera l'objet de travaux. Ceux-ci prévoient :

- Installation d'une goulotte de dévalaison ;
- Installation d'une passe à kayak ;
- Installation d'un dispositif de crête du seuil ;
- Entretien et réparation du seuil ;
- Entretien et rectification du fond naturel à l'embouchure du petit Doubs.

Ces travaux d'entretien sont réalisés en accord et sous la supervision des Voies Navigables de France (VNF), propriétaire du seuil.

9.3.1. Mise à sec du seuil

Ces travaux seront réalisés en deux phases. Dans un premier temps, un batardeau sera installé en amont de l'embouchure du petit Doubs. Il sera placé au niveau du tier aval du seuil en reliant la berge droite du Doubs et le seuil. La mise en œuvre de ce batardeau nécessitera de construire une piste reliant le parc à l'emplacement du batardeau. Celui-ci permettra de baisser le niveau d'eau à l'embouchure tout en conservant un niveau d'eau normal à son amont et un courant faible dans le petit Doubs. Avec ce niveau d'eau baissé, il sera possible de réaliser l'entretien de l'embouchure, la mise en œuvre de la vanne et de l'échancrure de dévalaison et le premier tier de la crête du seuil.

Une fois ce lot de travaux réalisé, le batardeau et la piste d'accès seront déposés. Le niveau d'eau amont sera baissé au moyens des différents ouvrages permettant le passage et la maîtrise du flux (centrales hydroélectriques, passe à poissons et échancrure de dévalaison). La cote d'abaissement visée sera de de 288,30 mNGF afin d'assurer la mise à sec totale du seuil.

Une fois cet abaissement effectif, les travaux réalisés seront :

- Entretien et réparation du seuil ;
- Crête du seuil ;
- Passe à kayak ;

A l'aval, la mise en place de batardeaux souples ou de sacs de sable selon l'étendue des affaissements est envisagée. Ces systèmes de mise à sec seront installés au fur et à mesure des réparations et déplacés au fur et à mesure de l'avancement de ces dernières. Ils auront pour objectif principal la protection du lit du cours d'eau à l'aval du seuil de toute pollution accidentelle. En effet, au vu de la situation de l'ouvrage sujet aux réparations, la mise à sec se fera naturellement (écoulement de l'eau vers l'aval du seuil).

Tous les déplacements depuis la berge vers la zone de mise à sec seront effectués directement sur le seuil pour éviter tout passage d'engins dans le lit de la rivière en dehors des zones de travaux.

9.3.2. Inspection des affaissements

Une fois la mise à sec du seuil réalisée, le seuil sera inspecté afin d'adapter les travaux de réparation à la situation existante à ce moment-là. Sur base de ce diagnostic, plusieurs techniques pourront être mises en place selon l'état du seuil.

9.3.3. Réparation des affaissements

Une fois le diagnostic réalisé, les réparations débiteront. La méthodologie de mise en œuvre de celles-ci dépendra de l'entrepreneur.

Actuellement, deux méthodes sont envisagées :

- Un béton grossier simple sera coulé dans les zones d'affaissements superficielles sur la face supérieure du barrage ;
- Pour les zones d'affouillements sous et sur la partie aval du seuil, un terrassement sera effectué directement en aval du seuil, suivi de la mise en place d'un géotextile en fond de fouille et de la pose d'enrochement directement par-dessus. Les zones de vide sous le barrage et entre les enrochements seront comblées avec du béton. Les zones de terrassement et leur profondeur dépendront de l'état de l'affouillement sous le barrage aux divers endroits concernés.

Dans les deux cas, l'utilisation de béton colloïdal (capable de sécher en milieu humide) est préconisée.

Les services de la DDT seront avertis de la réalisation des travaux d'entretien du seuil principal deux semaines avant la mise en œuvre de ceux-ci.

9.4. Constat d'huissier et remise en état des sites

Le projet prévoit l'ouverture de trois zones de chantier. Préalablement à celles-ci, le porteur de projet prévoit d'établir un diagnostic de situation existante avant travaux par constat d'huissier. De cette manière, il possèdera les éléments suffisant pour définir la consistance de la mission de remise en état de chacun des sites. Cette approche permettra de limiter au maximum les situations de litige éventuel dû aux travaux.

9.5. Planning

La réalisation des travaux est prévue à partir de la période d'étiage 2025. La planification des différentes étapes décrites ci-dessus sont reprises dans le planning ci-dessous.

Tableau 31 : Planning général estimé de mise en œuvre

2023-02 ISLD Méthodologie de mise en œuvre

Grille Tableau Chronologie Graphiques Personnes Objectifs

1 janv. 2025 - 27 nov. 2026

Nom	Début	Fin	Durée
1 <input type="radio"/> Abattages	1/1/2025	13/3/2025	52 jours
2 <input type="radio"/> Terrassement - enrochement passe à poissons	14/4/2025	14/5/2025	23 jours
3 <input type="radio"/> Centrale du moulin	1/5/2025	31/10/2025	132 jours
4 <input type="radio"/> Installation de chantier	1/5/2025	15/5/2025	11 jours
5 <input type="radio"/> Mise à sec et pêche de sauvegarde centrale du moulin	16/5/2025	16/10/2025	110 jours
6 <input type="radio"/> Construction centrale du moulin	19/5/2025	17/10/2025	110 jours
7 <input type="radio"/> Entretien et rectification du petit Doubs aval	18/8/2025	12/9/2025	20 jours
8 <input type="radio"/> Mise en service vanne de décharge remise en eau et retrait installations de chantier	20/10/2025	31/10/2025	10 jours
9 <input type="radio"/> Enrochement de protection de la passe à poissons	31/10/2025	13/11/2025	10 jours
10 <input type="radio"/> Centrale des forges	15/9/2025	12/6/2026	195 jours
11 <input type="radio"/> Installation de chantier, mise à sec et pêche de sauvegarde	15/9/2025	26/9/2025	10 jours
12 <input type="radio"/> Construction centrale des forges	29/9/2025	15/5/2026	165 jours
13 <input type="radio"/> Entretien rectification du canal des forges	29/9/2025	14/11/2025	35 jours
14 <input type="radio"/> Mise en service vanne de décharge remise en eau et retrait installations de chantier	18/5/2026	12/6/2026	20 jours
15 <input type="radio"/> Passe à poissons	13/4/2026	25/9/2026	120 jours
16 <input type="radio"/> Installation de chantier, mise à sec et pêche de sauvegarde	13/4/2026	24/4/2026	10 jours
17 <input type="radio"/> Mise en oeuvre passe à poissons	27/4/2026	11/9/2026	100 jours
18 <input type="radio"/> Mise en service passe à poissons, remise en eau et retrait installations de chantier	14/9/2026	25/9/2026	10 jours
19 <input type="radio"/> Embouchure petit Doubs et interventions sur le seuil	14/9/2026	27/11/2026	55 jours
20 <input type="radio"/> Installation piste d'accès et mise en place batardeau	14/9/2026	25/9/2026	10 jours
21 <input type="radio"/> Entretien de l'embouchure, mise en oeuvre goulotte de dévalaison et rehausse (1/3)	28/9/2026	16/10/2026	15 jours
22 <input type="radio"/> Retrait Batardeau et piste d'accès	19/10/2026	30/10/2026	10 jours
23 <input type="radio"/> Rehausse crête du seuil (2/3)	2/11/2026	13/11/2026	10 jours
24 <input type="radio"/> Retour niveaux d'eau réglementaires et exploitation du site	16/11/2026	27/11/2026	10 jours

L'agencement des différents chantiers a été défini en fonction des enjeux et impositions lié au projet. Parmi- ceux-ci, nous pouvons citer l'hydrologie et la maîtrise du risque de crue, l'avifaune et sa nidification, le publique et la plaisance dans le parc, etc.

10. Phase d'exploitation

Une fois le chantier terminé, le projet passe en phase d'exploitation. Cette phase est d'une durée beaucoup plus longue que la mise en œuvre et est régie par la durée d'autorisation accordée au travers de la présente démarche. L'objectif de la phase d'exploitation est ainsi d'exploiter de manière optimale le potentiel énergétique du site tout en mettant en œuvre l'entièreté des bonnes pratiques nécessaires à la préservation de l'environnement.

L'exploitation prévoit le pilotage de la centrale et l'entretien de tous ses éléments. Ces deux moyens d'actions suffisent à l'atteinte le double objectif d'exploitation.

10.1. Le pilotage

Le pilotage de la centrale est une action permanente qui pilote les différents organes en fonction de l'évolution des paramètres liés au site et aux éléments électromécaniques. En fonctionnement ordinaire, le pilotage est prévu pour se faire automatiquement sans intervention de l'homme. Il est bien sûr prévu qu'à n'importe quel moment, la main puisse être reprise par l'exploitant, sur site ou à distance.

L'évolution de ces paramètres est transmise par des capteurs de différente nature. La réaction de la centrale en réponse à cette évolution est commandée par l'automate. Celui-ci est préalablement programmé pour apporter une réponse qui soit en adéquation avec le double objectif d'exploitation. La mission de l'automate consiste donc à traduire les informations fournies par les capteurs pour piloter les organes de régulation présents sur la centrale.

La présente section est destinée à présenter les moyens d'actions pour la bonne exploitation du projet. La teneur du régime d'exploitation est présentée dans la sections **Erreur ! Source du r envoi introuvable.** et « régime de gestion du niveau d'eau amont ». Le système de pilotage peut être schématisé comme suit.

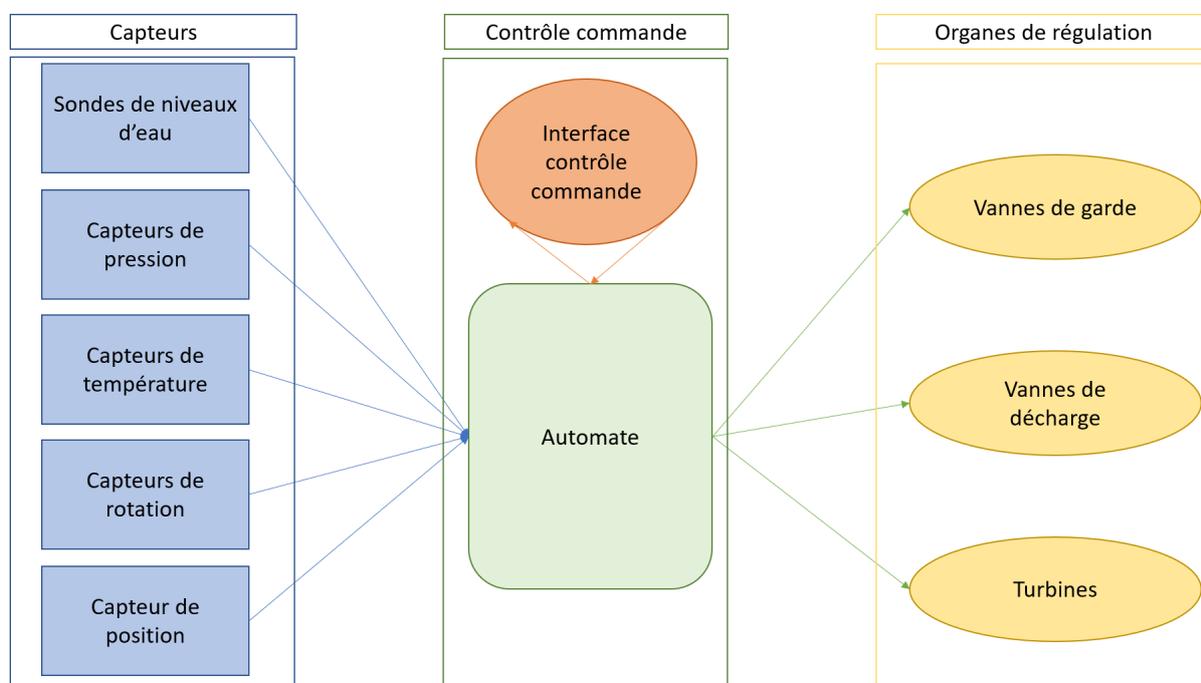


Figure 32 : Schématisation du fonctionnement par automate d'une centrale hydroélectrique

10.1.1. Capteurs

Des capteurs de différente nature sont prévus pour le projet. La nature des capteurs est fonction du type de paramètre qu'ils sont destinés à mesurer. Le tableau ci-dessous reprend les différents capteurs prévus pour la centrale projetée.

Tableau 32 : Catégories de capteurs prévus pour la centrale

Capteur	Paramètres mesurés
Sonde de niveau d'eau Hydrostatiques ou RADAR/ultrason	Les sondes de niveaux d'eau sont prévues pour mesurer l'évolution des niveaux d'eau à différents endroits de la centrale. Généralement, on en installe au minimum deux, une pour le plan d'eau amont et une pour le plan d'eau aval. La mesure du niveau d'eau amont permet de déterminer le débit qui peut être turbiné en fonction de la lame d'eau calculée sur le barrage. On peut en installer plus pour avoir une meilleure visibilité sur l'évolution hydraulique au site. Par exemple une sonde après la grille permet d'évaluer la perte de charge à la grille et donc de détecter un colmatage partiel ou complet de la grille.
Capteur de pression	Les capteurs de pressions sont installés sur les éléments animés par un réseau oléo-hydraulique. Il s'agit principalement des vérins qui servent à l'actuation des organes mobiles tels que les vannes et le dégrilleur. Ils permettent de détecter des seuils de pressions qui peuvent être dus à un disfonctionnement ou à un respect de consigne . Par exemple : un rondin coincé en dessous d'une vanne qui l'empêcherait de se fermer complètement, la mise en pression du groupe hydraulique à l'allumage ou le bon gonflage d'un accumulateur de sécurité (par exemple).
Capteur de température	Les capteurs de températures sont installés sur les éléments de transformation de l'énergie qui sont les plus susceptibles de chauffer du fait des pertes liées à la transformation de l'énergie (augmentation d'entropie). Ils sont généralement installés sur les roulements, le multiplicateur, la génératrice, etc.
Capteur de rotation	Les capteurs de rotation permettent de mesurer les vitesse de la turbine. En fonction de la vitesse transmise par le capteur, l'automate peut ordonner un ordre de couplage à la vitesse de synchronisme ou un ordre d'arrêt de la turbine en cas de survitesse.
Capteur de position	Les capteurs de position sont installés sur certains élément dont les mouvements doivent être réalisés avec précision. Ces mouvements précis sont généralement effectués par les vannes, les organes de régulation de turbines et le dégrilleur. Ils permettent de commander les actionneurs qui sont à l'origine du mouvement et de détecter des blocages ou dysfonctionnements.

L'ensemble de ces capteurs permet à l'organe de gestion de la centrale (automate) d'avoir une bonne visibilité sur l'évolution des paramètres environnementaux.

10.1.2. Contrôle commande

Le contrôle commande de la centrale peut être assuré de deux manières différentes : soit par automate programmé, soit manuellement au travers d'une interface.

Le rôle de l'automate est de traduire l'information transmise par les capteurs et de donner les ordres d'actions vers les organes de régulation de la centrale. La traduction est régie par la programmation, faite au préalable, de l'automate. Cette programmation intervient lors de la mise en service.

Il s'agit donc de l'organe de contrôle qui permet à la centrale d'évoluer en autonomie. Toutefois, cette autonomie n'est pas totale. En effet, l'action humaine reste nécessaire et est prioritaire par rapport à l'action automatisée.

L'action humaine se fait au travers d'une interface de contrôle commande qui permet un pilotage de chaque élément. L'interface de contrôle commande est disponible sur site avec un écran tactile et à distance au moyen d'une application.

En cas de dysfonctionnement, de la centrale, celle-ci est mise en sécurité par l'automate qui commande son arrêt. Le redémarrage de celle-ci n'est possible que par une intervention humaine au travers de l'interface ou directement sur place. L'automate caractérise et enregistre également tout type de panne ou d'alarme survenue lors de la phase d'exploitation de la centrale.

10.1.3. Organes de régulation

Le pilotage se concrétise par l'action des organes de régulation. Ces organes de régulation sont de plusieurs types :

- Le pilotage des variateurs de fréquence/vitesse qui sont utilisés pour la régulation fine du débit turbiné ;
- La régulation des turbines qui permet d'utiliser l'eau disponible pour la production d'électricité tout en respectant les besoins parallèles en eau du milieu et notamment, le respect du débit de la passe à poissons ;
- La vanne du seuil secondaire qui permet d'évacuer une partie du débit lorsque le niveau d'eau amont augmente.

Le commandement des organes de régulation par l'automate permet de répondre aux informations récoltées par les capteurs, le tout dans l'objectif de maximiser la productivité tout en respectant les contraintes liées à l'environnement.

10.2. Régime hydraulique en situation projetée

Les centrales hydroélectriques installées au fil de l'eau ont la particularité d'avoir une influence sur le niveau d'eau du tronçon situé directement à l'amont de la centrale. L'étendue du tronçon influencé est fonction de la morphologie du cours d'eau. Sur le niveau d'eau aval l'influence de la centrale est liée aux pertes de charges conséquentes au volume d'eau turbiné.

Cette influence doit donc être prévue pour intégrer les enjeux et usages liés au cours d'eau au droit du tronçon influencé. La motivation et la justification de cette prise en compte est traitée au travers de l'étude des incidences du projet.

Le régime hydraulique en situation projetée est géré par les ouvrages selon le tableau suivant.

Tableau 33 : Moyens de régulation du niveau d'eau amont

Débit Q	Moyen de régulation	Représentation temporelle (%)
Q ≤ Débit réservé (Petit Doubs + Doubs + PAP)	Aucune régulation, tous les organes de production électrique et de décharge sont fermés	<< 1%
Débit réservé < Q ≤ débit d'équipement + débit réservé	Régulation au moyen des turbines	46 %
Débit d'équipement + débit réservé < Q ≤ 3 * Modules	Régulation au moyen des turbines, des vannes de décharges et surverse des deux seuils	48 %
Q ≥ 3 * Modules	Régulation par surverse des seuils et vannes décharges ouvertes (voir §6)	~ 6%

L'utilisation d'ouvrages de régulation permet de maintenir les niveaux d'eau tels que décrits dans les résultats de l'étude hydraulique.

La gestion des niveaux d'eau a été déterminée de manière à respecter les enjeux et usages liés au site. L'alimentation des ouvrages de continuité écologique est toujours assurée, les turbines fonctionnent dans la mesure du débit disponible pour la production électrique. Le transit sédimentaire est pris en charge lors des épisodes de crues. Le risque d'inondation n'est pas augmenté durant les périodes de fortes crues.

La gestion du niveau d'eau amont est directement liée à l'allocation des débits du fait que la centrale soit installée au fil d'eau et que le marnage ne soit aucunement prévu.

10.3. Entretien et suivi de la centrale

Durant sa phase d'exploitation, la centrale sera suivie de manière régulière. Le suivi sera opéré in situ et à distance.

Le suivi in situ consistera en plusieurs visites hebdomadaires de la centrale par un personnel spécialement dédié à l'exploitation du projet. Durant ses visites, la mission confiée au personnel consistera en :

- L'examen visuel et auditif de tous les ouvrages et éléments électromécaniques ;
- Le graissage de tous les éléments électromécaniques devant être lubrifiés (roulements, génératrices, multiplicateurs, etc.) ;
- Le maintien de l'ordre et de la propreté des installations ;
- La réalisation des opérations ordinaires d'entretien ;
- La gestion des déchets ressortis par le dégrillage ;
- La vérification du libre écoulement au sein des ouvrages de franchissement ;
- L'entretien de la pleine fonctionnalité des accès au site ;
- La communication auprès des services de la police de l'eau de tout incident survenu sur la centrale.

Le personnel d'exploitation, ainsi que le maître d'ouvrage et le maintenancier disposeront d'un accès à distance sur le tableau de bord de la centrale. Cet accès se fera via un smartphone et/ou un ordinateur relié à internet. Une alarme sera activée pour tout dysfonctionnement apparu sur la centrale. En fonction de la nature du dysfonctionnement, une intervention sera mise en œuvre sur place ou à distance pour relancer la centrale hydroélectrique. Le signal d'alarme sera envoyé aux trois entités précitées.

10.4. Moyens d'interventions en cas d'incident

Comme expliqué ci-dessus, la centrale sera reliée via internet et sera en mesure d'envoyer des alarmes pour tout dysfonctionnement apparaissant à n'importe quel niveau de celle-ci. L'envoi d'alarme est synonyme d'arrêt automatique de la centrale. Si l'alarme concerne une panne qui nécessite une intervention d'urgence, les dispositions nécessaires seront prises dans les plus brefs délais, ces dispositions étant des interventions extraordinaires.

Parmi les dysfonctionnements nécessitant une intervention extraordinaire, on retrouve :

- Les casses mettant en péril l'intégrité des différents éléments ;
- L'encastrement de matériaux volumineux sur la centrale ;
- Une panne majeure sur la chaîne cinématique (génératrice, multiplicateur, freins, etc.) ;
- Une surchauffe des machines ;
- Une panne majeure des vannes
- Une rupture de ferronnerie.

Dès la phase de dimensionnement, les interventions extraordinaires et ordinaires sont intégrées dans la réflexion pour en faciliter la mise en œuvre. Parmi les éléments intégrés pour faciliter la maintenance et les interventions, nous pouvons citer :

- Les accès et passerelles pour accéder aux différents éléments de la centrale ;
- Les échancrures pour batardeaux placées de manière à pouvoir mettre les chambres d'eau et la passe à poissons à sec.

Pour résumer, la centrale est équipée des éléments suffisants pour une mise en sécurité immédiate dès la perception d'un dysfonctionnement. Les réparations et remises en service nécessaires sont facilitées par les éléments prévus à cet effet.

10.5. Production électrique

La production électrique projetée de la centrale hydroélectrique a été calculée à partir des études hydrologique et hydraulique du site ainsi que sur base des caractéristiques techniques des ouvrages projetés. Les capacités de production des turbines, déterminées par le fabricant, sont également intégrées aux calculs.

Le productible tient compte :

- De l'installation de 3 turbines de type vis hydrodynamique, d'un débit unitaire de 12,5 m³/s, pour un débit nominal total de 37,5 m³/s ;

- Une première turbine, fonctionnant en priorité sur les autres, est située au droit du Moulin, dans le petit Doubs ;
- Les deux autres turbines, sont installées dans le nouvel ouvrage enterré dans le parc, entre le petit Doubs et le Doubs.

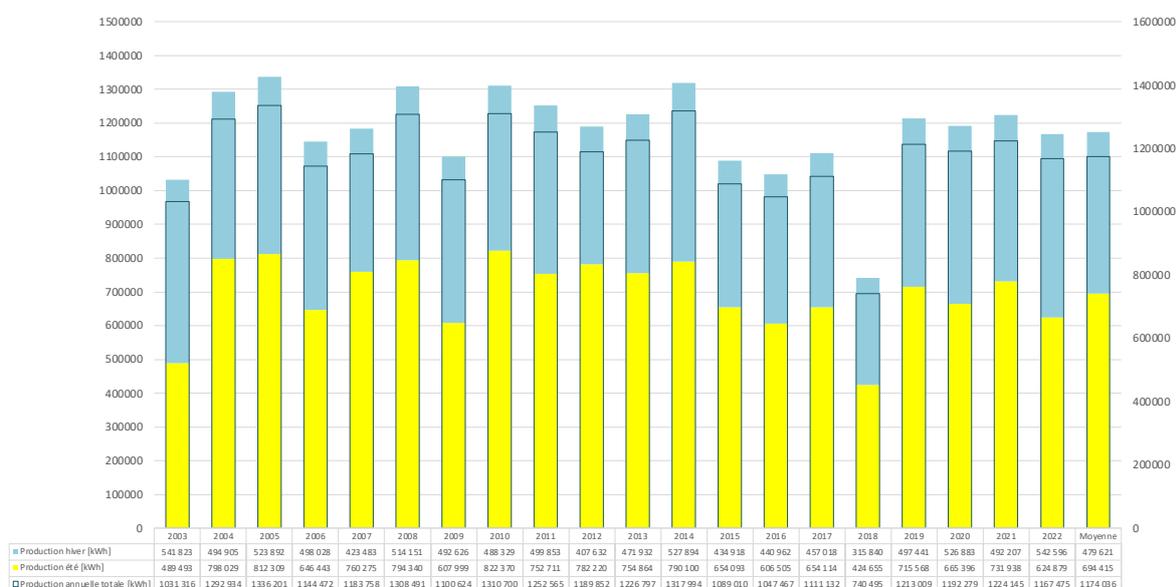
La production est analysée sur des séries de données couvrant la période 2003 à 2022, issues de la station de mesure située en amont du site et adaptée au bassin versant (voir plus haut).

En termes d'allocation de débit et de régulation, il est prévu :

- Un débit réservé de 8 m³/s réparti dans les différents ouvrages dédiés (voir plus haut) et un niveau d'eau au seuil régulé à la cote 288,69 mNGF ;
- Un démarrage de la première turbine, au Moulin, dès que le débit dans le Doubs est suffisant ($Q_r + Q_{\text{amorçage}} \text{ Moulin}$) et en priorité sur les turbines aux Forges ;
- Le démarrage successif des turbines aux Forges une fois que le débit dans le Doubs est suffisant ($Q_r + Q_{\text{nominal}} \text{ Moulin}$) ;
- Lorsque les 3 turbines sont pleinement alimentées, soit pour un débit dans le Doubs supérieur à 45,5 m³/s, le niveau au seuil est laissé libre jusqu'à atteindre la cote de 289,02 mNGF. Ce point est atteint pour un débit d'environ 192 m³/s dans le Doubs ;
- A partir de 192 m³/s, la vanne de décharge est progressivement ouverte ;
- Lorsque la réduction de chute, provoquée par les remontées du niveau aval sont telles que les turbines ne sont plus aptes à produire, elles sont successivement arrêtées alors que leurs vannes de décharge respectives sont ouvertes pour compenser et la production s'arrête.

Tenant compte de ces éléments, les productibles au Moulin et aux Forges sont présentés dans les figures et tableaux ci-dessous.

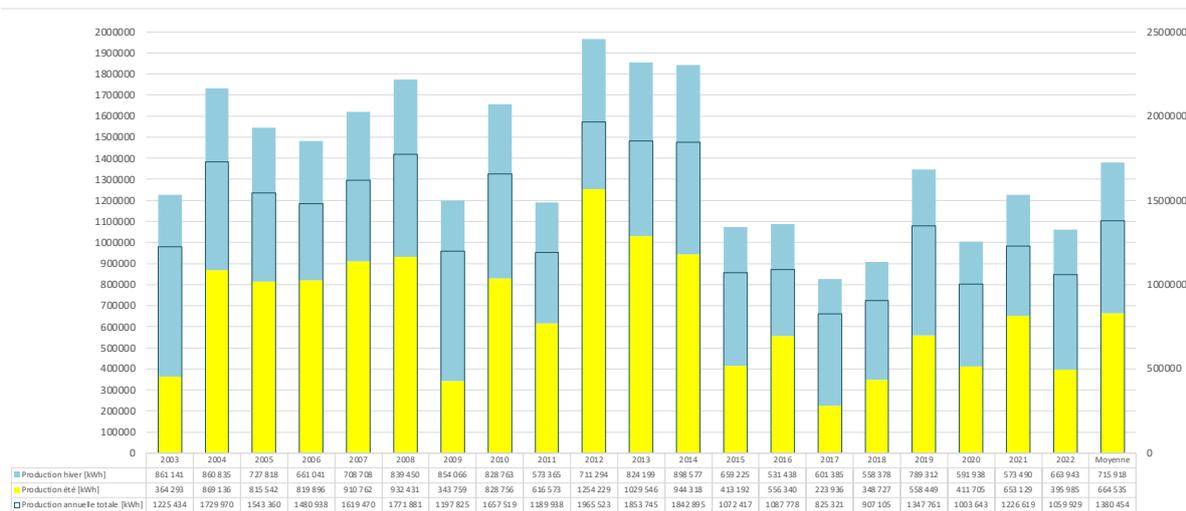
10.5.1. Productibles escomptés au Moulin



Année étudiée	Production annuelle totale [kWh]	Production été [kWh]	Production hiver [kWh]	Taux d'utilisation [%]	Puissance [kW]
2003	1 031 316	489 493	541 823	72%	195
2004	1 292 934	798 029	494 905	94%	195
2005	1 336 201	812 309	523 892	95%	195
2006	1 144 472	646 443	498 028	88%	195
2007	1 183 758	760 275	423 483	92%	195
2008	1 308 491	794 340	514 151	98%	195
2009	1 100 624	607 999	492 626	79%	195
2010	1 310 700	822 370	488 329	95%	195
2011	1 252 565	752 711	499 853	85%	195
2012	1 189 852	782 220	407 632	93%	191
2013	1 226 797	754 864	471 932	95%	195
2014	1 317 994	790 100	527 894	98%	195
2015	1 089 010	654 093	434 918	77%	195
2016	1 047 467	606 505	440 962	80%	195
2017	1 111 132	654 114	457 018	75%	195
2018	740 495	424 655	315 840	57%	195
2019	1 213 009	715 568	497 441	86%	195
2020	1 192 279	665 396	526 883	82%	195
2021	1 224 145	731 938	492 207	88%	195
2022	1 167 475	624 879	542 596	82%	195
Moyenne	1 174 036	694 415	479 621	86%	195

Figure 33 : Productibles escomptés au Moulin pour la période 2003-2022

10.5.2. Productibles escomptés aux Forges



Année étudiée	Production annuelle totale [kWh]	Production été [kWh]	Production hiver [kWh]	Taux d'utilisation [%]	Puissance [kW]
2003	1 225 434	364 293	861 141	50%	323
2004	1 729 970	869 136	860 835	72%	323
2005	1 543 360	815 542	727 818	65%	323
2006	1 480 938	819 896	661 041	69%	323
2007	1 619 470	910 762	708 708	74%	322
2008	1 771 881	932 431	839 450	77%	323
2009	1 197 825	343 759	854 066	52%	323
2010	1 657 519	828 756	828 763	70%	322
2011	1 189 938	616 573	573 365	48%	322
2012	1 965 523	1 254 229	711 294	86%	323
2013	1 853 745	1 029 546	824 199	83%	322
2014	1 842 895	944 318	898 577	79%	323
2015	1 072 417	413 192	659 225	48%	320
2016	1 087 778	556 340	531 438	55%	320
2017	825 321	223 936	601 385	37%	323
2018	907 105	348 727	558 378	44%	320
2019	1 347 761	558 449	789 312	57%	323
2020	1 003 643	411 705	591 938	44%	322
2021	1 226 619	653 129	573 490	56%	323
2022	1 059 929	395 985	663 943	46%	322
Moyenne	1 380 454	664 535	715 918	61%	322

Figure 34 : Productibles escomptés aux forges pour la période 2003-2022

Le productible total moyen escompté est donc de **2.554 MWh**.

10.6. Analyse financière succincte

Pour déterminer le chiffre d'affaires escompté, il est tenu compte d'un tarif H16bis, index 2024, en une et deux composantes.

Tableau 34 : Analyse financière succincte

Analyse financière succincte		Solution vis d'Archimède 3x12,5 m3/s
Chiffre d'affaire		
Estimation de la production électrique moyenne (kWh)		2 554 489
Production hiver (kWh)		1 358 950
Production été (kWh)		1 195 539
Chiffre d'affaire, H16bis 1C (P<=400 kW)		424 045,23 €
Chiffre d'affaire valorisation hiver	166,00 €	225 585,76 €
Chiffre d'affaire valorisation été	166,00 €	198 459,47 €
Chiffre d'affaire, H16bis 2C (P<=400 kW)		455 859,85 €
Chiffre d'affaire valorisation hiver	229,00 €	311 199,64 €
Chiffre d'affaire valorisation été	121,00 €	144 660,21 €
Estimation des coûts d'exploitation	17%	72 087,69 €
Chiffre d'affaire total net - Simple composante :		351 957,54 €
Chiffre d'affaire total net - Double composante :		383 772,16 €
Investissements		
Estimation investissement total :		5 150 000,00 €
Estimation investissement électromécanique		1 600 000,00 €
Estimation investissement génie civil		3 350 000,00 €
Estimation études et assistance à la maîtrise d'ouvrage		200 000,00 €
Investissement spécifique par kW installé :		
Rentabilité		
Subsides PAP		- €
Investissement à charge du client :		5 150 000,00 €
Temps de retour sur investissement (années)		
Simple composante :		14,63
Deux composantes :		13,42
Prix de revient du MWh sur 40 ans :		79 €

Le taux d'OPEX (coûts d'exploitation) est estimé à 17% du chiffre d'affaires bruts, tenant compte :

- Des frais d'exploitation et de maintenance,

- Des coûts de location/concession du site,
- Du coût d'assurances exploitation.

Le montant estimés des **OPEX s'élève à 72.000 € annuellement.**

Les CAPEX (coûts d'investissement) sont estimés à ce stade sur base de budgets transmis par les prestataires et d'estimations basées sur les quantités.

Le montant estimé de l'investissement est estimé à 5,15 M€.

Le temps de retour sur investissement, pour un financement total sur fonds propres est de **13,5 années** (tarif H16bis 2024 à deux composantes).

Le prix de production de l'énergie, sur une période de 40 ans, est de **79 €/MWh.**

11. Conclusions

Le présent mémoire technique du projet de centrale hydroélectrique au droit du parc communal et du moulin de L'Isle-sur-le-Doubs permet de détailler l'ensemble des choix opérés pour sa revalorisation technique.

En situation existante, aucune centrale n'est installée au droit du projet. Le site du moulin est toujours présent, dans un état de délabrement avancé (seuil et vannes). Au niveau du parc communal, une forge était installée dont des reliquats des prises d'eau subsistent sous forme de buses enterrées traversant le parc communal. En entrée du petit Doubs, un seuil de dérivation permet l'aménée des eaux vers ces deux sites. Des affaissements existent au droit de ce seuil de dérivation. Aucun ouvrage de franchissement piscicole ne permet actuellement la migration des poissons.

Le projet vise l'implantation de deux nouvelles centrales hydroélectriques à vis hydrodynamiques ainsi que d'ouvrages visant le rétablissement de la continuité écologique : passe à poissons, prise d'eau ichtyocompatible et échancrure de dévalaison, vannes de décharge pour le transit sédimentaire et la gestion des crues

Les vannes de décharges prévues ont été dimensionnées pour qu'en période de crue, le niveau d'eau soit inférieur ou égal au niveau d'eau existant. Les modélisations hydrauliques de la situation projetée concluent que le projet n'aura pas d'incidences sur l'hydraulique du Doubs.

La méthodologie de mise en œuvre du projet est également synthétisée dans le présent document. Les travaux sont prévus sur une période de 23 mois. Des opérateurs habilités à travailler dans les lits des cours d'eau seront en charge de l'exécution du projet. La méthodologie et le planning de mise en œuvre ont été réfléchies de manière à limiter les incidences du projet sur l'environnement. Cet aspect du projet est détaillé dans la troisième partie du dossier de demande d'autorisation (étude des incidences sur l'environnement).

Une fois les travaux achevés, la gestion des centrales est prise en charge par un automate, dont la reprise par l'humain est possible à distance et sur site. La gestion par l'automate se fera à l'aide d'un ensemble de données environnementales mesurées via diverses sondes et capteurs. Des protocoles de mise en sécurité (arrêt de la centrale) sont prévus en cas de défaillance du système (bug, inondations de la centrale, etc.).

En conclusion, le projet de centrale hydroélectrique et de restauration de la continuité écologique à L'Isle-sur-le-Doubs se justifie des points de vue techniques et financiers. Le point de vue environnemental est abordé dans le troisième volet du dossier de demande d'autorisation environnementale.