
Rapport de stage individuel

5^{ème} année

Étude de la restauration de la continuité écologique sur le cours de la Juine

ISL Ingénierie
75 boulevard Mac Donald 75019 Paris



Tuteur entreprise :
Jean-Loïc Douard
Responsable d'Activité Rivières et Milieux Aquatiques

Amélie Lett
IMA
2022-2023

Tuteur académique :
Michel Bacchi

Remerciements

Je remercie mon tuteur en entreprise, Jean-Loïc Douard, pour son accompagnement, ses enseignements et sa confiance tout au long de mon stage.

Je remercie l'équipe d'hydrauliciens d'ISL qui ont été présents pour répondre à mes questions lors de la phase de modélisation hydraulique.

Je remercie enfin l'ensemble des mes collègues chez ISL avec qui j'ai eu l'opportunité de partager des journées de terrain et des échanges très enrichissants portant sur les divers domaines de l'ingénierie appliquée à la gestion des cours d'eau.

Table des matières

Remerciements	2
Introduction	4
Présentation de la structure d'accueil : ISL Ingénierie	5
Le cadre de l'étude	6
La maîtrise d'œuvre	6
Le site d'étude.....	6
Organisation du réseau hydrographique	6
Qualification du patrimoine lié à l'eau.....	7
Les objectifs et le déroulement de la mission	9
Etat des Lieux	9
Hydrographie et hydrogéologie	9
Hydrologie.....	10
Occupation des sols	11
Données piscicoles	12
Données relatives à la qualité de la masse d'eau.....	13
Diagnostic.....	13
Diagnostic hydromorphologique.....	13
Evolution hydromorphologique du cours de la Juine sur le site d'étude depuis le XIXème siècle.....	13
Analyse du profil en long et de la géométrie en travers actuels.....	14
Comparaison aux indicateurs morphologiques de référence	15
Caractérisation du substrat alluvial	16
Description des ouvrages	17
Analyse du fonctionnement hydraulique actuel du complexe du moulin des Clercs.....	17
Méthodologie	17
Résultats	21
Analyse du transport sédimentaire.....	22
Analyse de la franchissabilité piscicole	23
Méthodologie	24
Résultats	24
Synthèse des altérations et enjeux sur le site d'étude	26
Propositions de scénarios d'aménagement	26
Restauration hydromorphologique sur le site de l'ancien moulin de Bierville	26
Restauration de la continuité écologique au droit des brèches.....	27
Discussion.....	27
Conclusion	30
Bibliographie	30
Table des figures	31
Table des tableaux.....	31
Table des équations	32
Annexes.....	32
.....	47

Introduction

« L'eau n'est pas un bien marchand comme les autres mais un patrimoine qu'il faut protéger, défendre et traiter comme tel ».

Cette phrase constitue le principe fondateur introductif de la Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. La construction de ce texte à partir de la fin des années 80 se fait dans un contexte de croissance continue de la demande en eau de bonne qualité et en quantité suffisante pour toutes les utilisations (Rapport sur l'environnement dans l'Union européenne - Agence européenne de l'environnement, 1995). Elle repose sur la nécessité, du lancement d'un programme d'action visant à la gestion écologiquement viable et à la protection des ressources en eau douce, et l'établissement de procédures de contrôle et de surveillance qualitative et quantitative. La directive cadre européenne sur l'eau (DCE) fixe ainsi, à partir des années 2000, des objectifs environnementaux contraignants portant sur l'atteinte du « bon état des eaux » vers lequel doivent tendre tous les Etats membres de l'Union européenne. En France, la DCE est transposée dans la loi n°2004-338 du 21 avril 2004 et vient orienter la politique de l'eau vers des objectifs de résultats pour la préservation et la restauration de l'eau et des milieux aquatiques.

La définition de l'état ou potentiel écologique des eaux de surface repose sur l'évaluation de l'état chimique et écologique des masses d'eau. L'état écologique est déterminé à partir d'éléments de qualité et d'indicateurs biologiques et physico-chimiques dont les valeurs sont dépendantes de la qualité et de la diversité des habitats et donc des conditions hydromorphologiques des cours d'eau. L'hydromorphologie d'un cours d'eau définit l'ensemble de ses caractéristiques physiques : hydrologique (quantité et dynamique des écoulements), géomorphologique (dimension et mobilité du chenal, structure du lit, taille du substrat) et de continuité. La notion de continuité écologique peut être définie comme la libre circulation des organismes vivants et leur accès aux zones indispensables à leur reproduction, leur croissance, leur alimentation ou leur abri, le bon déroulement du transport naturel des sédiments ainsi que le bon fonctionnement des réservoirs biologiques d'après l'article R214-109 du code de l'environnement définissant un obstacle à la continuité écologique.

Le référentiel des obstacles à l'écoulement (ROE) en France recense plus de 60 000 obstacles sur le territoire métropolitain avec une absence d'usages avérés pour la moitié d'entre eux. Parmi ces ouvrages, on retrouve les moulins à eau utilisés pour la meunerie jusqu'au 19^{ème} siècle avec un essor important au moyen âge, les barrages hydroélectriques, les ouvrages d'alimentation de prises d'eau latérales (irrigation, pisciculture...), de régulation des niveaux d'eau pour la navigation, ou encore, de stabilisation du profil en long par blocage de l'érosion régressive ou progressive. Ces ouvrages ou seuils en rivière, sont liés à divers usages et enjeux, anciens ou modernes, et peuvent être associés à des systèmes hydrauliques de dérivation parfois complexes. L'étude et le diagnostic détaillés des impacts hydromorphologiques et écologiques des seuils en rivière sont ainsi nécessaires pour la conception et le dimensionnement de projets de restauration écologique.

Le présent sujet de stage de fin d'études s'inscrit dans la phase d'état des lieux et diagnostic de l'étude de restauration hydromorphologique et de la continuité écologique sur le cours de la Juine, réalisée par ISL Ingénierie pour le Syndicat mixte pour l'Aménagement et l'entretien de

la Rivière la Juine et de ses Affluents (SIARJA). L'étude porte plus particulièrement sur le complexe hydraulique du moulin des Clercs sur les communes de Boissy-la-Rivière et de Saclas dans le département de l'Essonne. L'objectif de cette première phase d'étude, est de collecter l'ensemble des données nécessaires pour établir un diagnostic du fonctionnement hydromorphologique du site, d'identifier les altérations et les pressions actuelles et passées sur le milieu naturel par rapport à une situation de référence et de mettre en évidence les différents enjeux associés au rétablissement de la continuité écologique.

Ce rapport de stage vise à présenter dans un premier temps, le site d'étude, les outils et les méthodes employés et une synthèse des résultats obtenus au stade du diagnostic. Une seconde partie exposera les scénarios d'aménagement envisagés pour la restauration de la continuité écologique du complexe hydraulique du moulin des Clercs, qui pourront ensuite être développés au stage Avant-Projet et ce, après concertation avec le SIARJA et les différents acteurs et usagers concernés par le projet. Une dernière partie visera à discuter de la réussite du futur projet de restauration écologique, en plaçant l'analyse à l'échelle du bassin versant et en considérant l'ensemble des enjeux associés aux usages de l'eau et à l'occupation des sols. Cette analyse, appliquée à un projet de restauration écologique concret visera à répondre à la problématique suivante : *Dans quelle mesure les travaux localisés de restauration de la continuité écologique et hydromorphologique permettent de contribuer à l'atteinte du bon état pour les masses d'eau de surface au sens de la directive 2000/60/CE ?*

Présentation de la structure d'accueil : ISL Ingénierie



La société ISL Ingénierie a été créée en 1986 à Paris par les ingénieurs Freddy Isambert, Michel Salembier et Michel Lino. Originellement spécialisée dans le domaine des barrages, la société compte aujourd'hui sept domaines d'activités principaux (Figure 1) et divers services d'appui (bureau de dessin, simulation informatique, qualité/santé/sécurité, ressources humaines etc.). ISL est implanté en France métropolitaine avec 5 établissements (Paris, Lyon, Montpellier, Angers, Saint-Jean-de-Luz), 7 antennes et une filiale (WaterPower Ingénierie) répartis sur l'ensemble de territoire.

La société est également représentée par ses filiales en Nouvelle-Calédonie (ISL Pacifique) et à l'étranger : ISL Cameroun, ISL Côte d'Ivoire, ISL Togo, TE – ISL (Algérie), SIAA (Tunisie), BCN Hydro (Espagne), DN&T (Belgique). La direction opérationnelle de la société est assurée par une direction générale constituée d'un président et de deux directeurs généraux. Le président est élu par l'Assemblée générale constituée des actionnaires-salariés d'ISL. La société est également engagée dans une démarche de Recherche et Développement avec deux structures internes (ISL'Lab, Pôle Simulation Numérique) ayant pour mission de piloter la recherche et d'identifier les voies de progrès dans divers domaines tels que l'hydro-solaire, le développement de modules SIG ou encore l'intelligence numérique. ISL contribue également à des programmes de recherche tel que le projet international Polder2C's pour l'amélioration de la capacité d'adaptation de la région des 2 Mers (mer du Nord et mer Baltique) aux défis posés par le changement climatique.

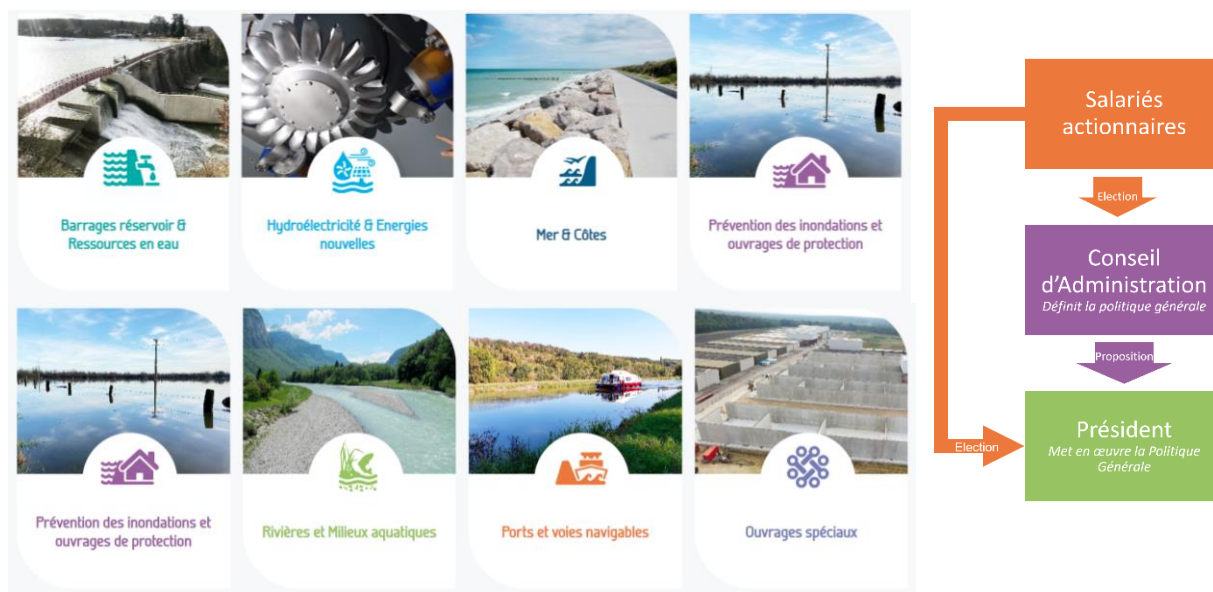


Figure 1. Secteurs d'activités et type de gouvernance au sein de la société ISL Ingénierie

Le cadre de l'étude

La maîtrise d'œuvre



L'étude de la restauration de la continuité écologique sur la Juine au droit de l'ancien moulin de Clercs est portée par le Syndicat mixte pour l'Aménagement et l'entretien de la Rivière La Juine et ses Affluents (SIARJA), compétent sur le territoire en matière de gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations. L'étude est en cohérence avec les orientations et les objectifs fixés par le SDAGE du bassin Seine-Normandie 2022-2027, le SAGE Nappe de Beauce et ses milieux aquatiques approuvé par arrêté inter-préfectoral du 11 juin 2013 et est également en accord avec les enjeux principaux définis par le Contrat Territorial « Eau, Climat et Trame Verte et Bleue 2020-2024 ».

Le site d'étude

Organisation du réseau hydrographique

La zone d'étude s'étend de l'aval du moulin des Clercs jusqu'à la route des Nations, soit un linéaire de 1.2 km environ en suivant le tracé du bief du moulin des Clercs. L'Eclimont conflue avec la Juine sur la partie amont de la zone d'étude. En aval proche de cette confluence, un ouvrage répartit les eaux entre le bief de l'ancien moulin de Bierville à l'Ouest, qui se poursuit par le cours naturel de la Marette en fond de vallée, et le bief du moulin des Clercs à l'Est perché en pied de coteau Est. Les ouvrages du moulin de Bierville ont été effacés. Des brèches sont apparues en rive gauche du bief du moulin des Clercs, lesquelles contribuent à soutenir l'alimentation de la Marette en fond de vallée et compromettent à terme et en l'absence d'interventions particulières la tenue du niveau d'eau sur le bief et l'alimentation du moulin. Elles ne permettent pas pour autant de rétablir des conditions de franchissement piscicole satisfaisantes à leur niveau. Les propriétaires du moulin des Clercs n'exploitent plus la force motrice de l'eau mais tiennent à maintenir le site en bon état de fonctionnement. Il est également à noter la présence de retenues d'eau d'agrément en lit majeur.



Figure 2. Ouvertures des brèches en rive gauche du bief du moulin des Clercs et aménagements de fortune

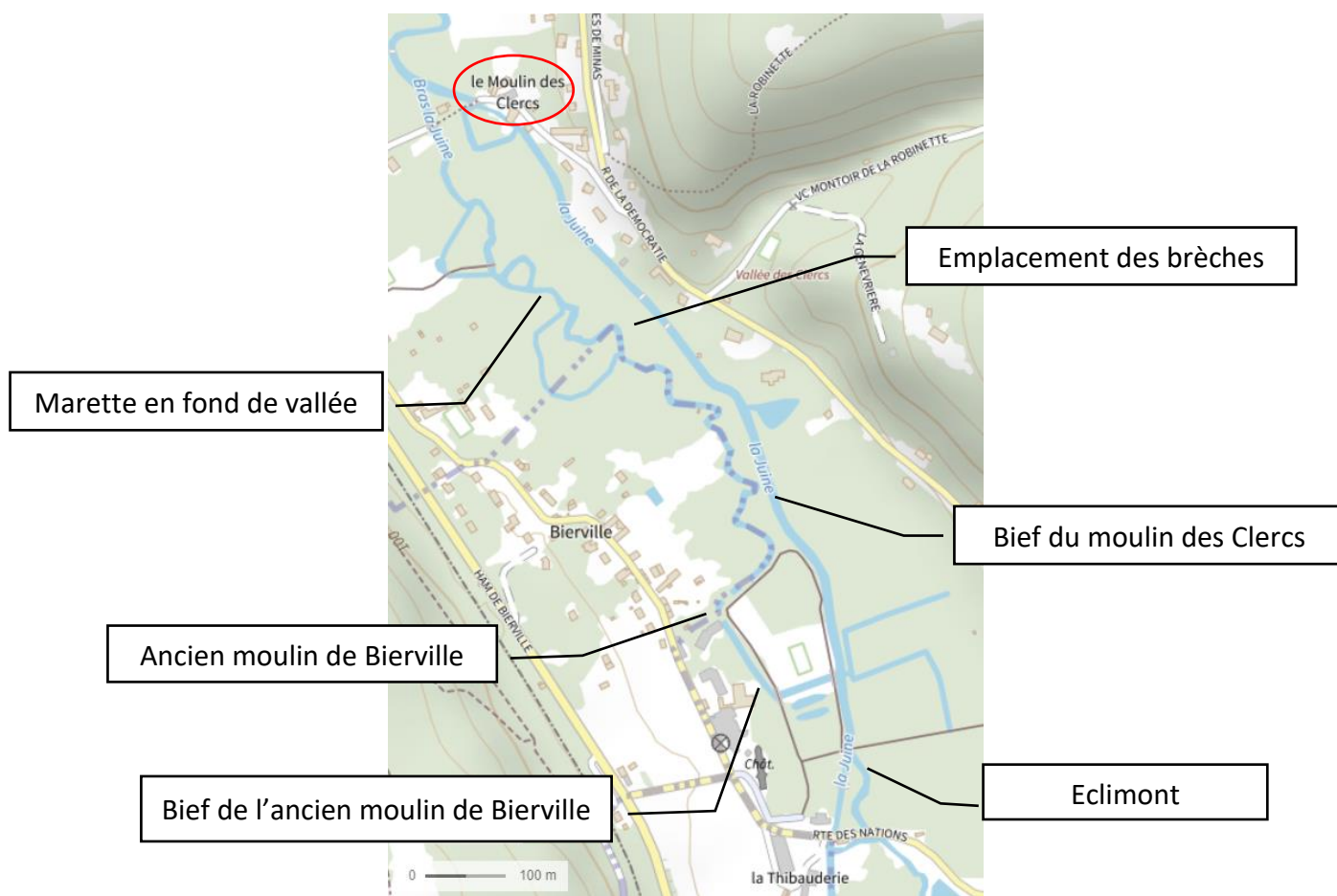


Figure 3. Carte de l'organisation du réseau hydrographique sur le site d'étude – Source : Plan IGN

Qualification du patrimoine lié à l'eau

Le site du moulin des Clercs présente un intérêt patrimonial à rayonnement local sur les plans paysager (diversité des paysages liés à l'eau associés au complexe hydraulique, Figure 4), architectural (ancienneté, originalité et bon état de conservation du bâti réhabilité en habitation) et historique (conservation d'ouvrages anciens directement liés au moulin telles que les maçonneries anciennes constitutives des ouvrages hydrauliques et les vannes). Les propriétaires du moulin sont très attachés à leur patrimoine ainsi qu'à sa transmission.



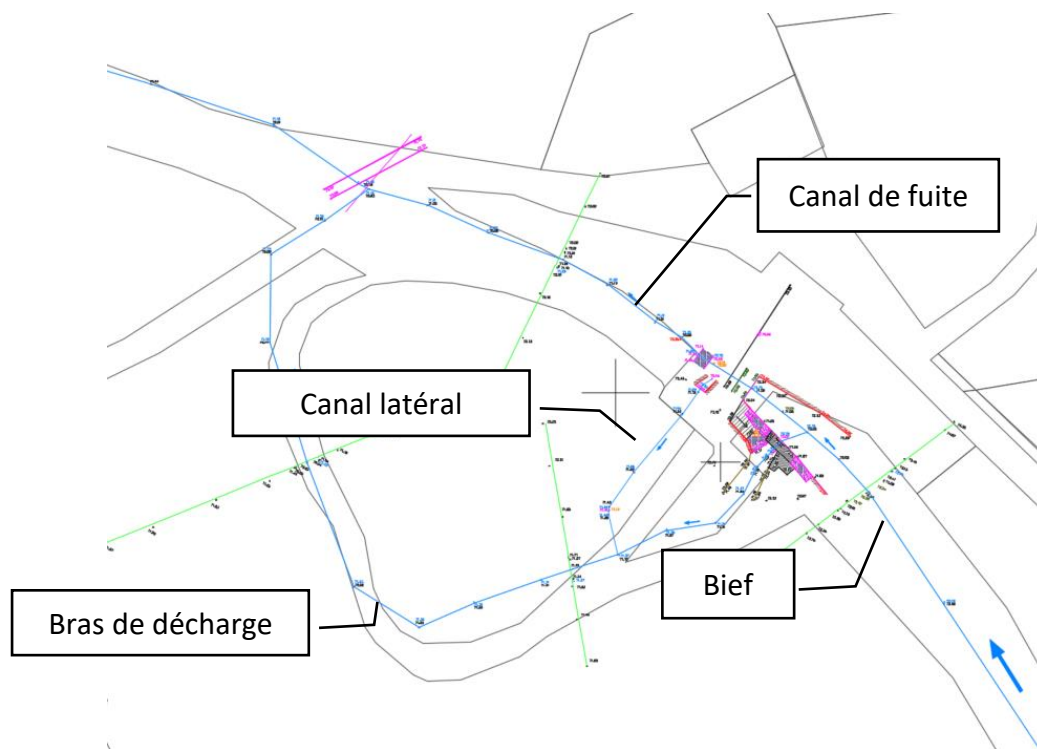


Figure 4. Organisation du complexe hydraulique du moulin des Clercs

Le moulin des Clercs apparaît sur la carte de Cassini (Figure 5), ce qui atteste de son existence avant la Révolution française de 1789 (abolition des droits féodaux). La présence et l'état de conservation actuels des éléments essentiels à l'usage de la force motrice de l'eau pourraient permettre à l'administration, à la demande du propriétaire, de reconnaître le droit fondé en titre de l'ouvrage (bien que la roue ait été démontée). Toutefois, les archives collectées par la DDT de l'Essonne ne permettent pas de préciser si le moulin des Clercs a fait l'objet par le passé d'un règlement d'eau (fondement sur titre). De ce fait et en l'absence de repère particulier sur le site, la consistance légale de l'ouvrage, et notamment la cote légale de retenue, ne peuvent donc être données avec certitude. Aucune preuve officielle d'existence du moulin de Bierville n'a pu être identifiée. Seul le cadastre napoléonien terminé en 1831 sur la zone d'étude, atteste de l'existence d'une filature à l'endroit de l'ancien moulin de Bierville.



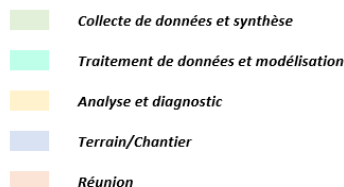
Figure 5. Identification du moulin des Clercs sur la carte de Cassini

Les objectifs et le déroulement de la mission

Les objectifs de l'étude sont de rétablir la continuité écologique au droit des passages d'eau actuels formés par les brèches et de restaurer dans la mesure du possible l'hydromorphologie de la partie amont de la Murette sur la propriété du château de Bierville, tout en tenant compte du patrimoine naturel et paysager et des usages associés actuels et projetés. L'étude doit apporter tous les éléments permettant de guider la réflexion du maître d'ouvrage sur le choix des aménagements ou modalités de gestion les plus appropriés pour répondre aux objectifs visés, et de mettre en œuvre les travaux retenus sur le site. Les objectifs du stage sont de recueillir et produire les éléments de la phase Etat des lieux et Diagnostic nécessaires pour la conception des scénarios d'aménagement et la définition et le chiffrage des solutions retenues aux stades Avant-Projet et Projet. Le détail et la temporalité des missions réalisées sont décrites dans le tableau suivante :

Tableau 1. Planning de déroulement du stage et des missions réalisées

Missions	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
Collecte et synthèse des données existantes (environnementales, patrimoniales, administratives et réglementaires etc.)						
Investigations de terrain et mesures de débits sur la Juine						
Diagnostic hydromorphologique						
Construction, calage et mise en œuvre du modèle hydraulique (HEC-RAS)						
Evaluation des impacts hydromorphologiques et analyse de la franchissabilité piscicole						
Synthèse des enjeux, contraintes et opportunités						
Définition des propositions de scénarios d'aménagement au stade Avant-Projet						
Participation à la réunion de présentation de la phase d'Etat des Lieux et Diagnostic						
Réalisation des cartographies (QGIS)						
Travaux complémentaires réalisés pour d'autres études/projets						
Relevés topographiques à Dollot						
Traitement et analyse de données topographiques (QGIS)						
Collecte et synthèse de données sur l'Orvanne à Dollot						
Accompagnement en suivi de chantier de grands ouvrages hydrauliques (barrage de Poses, écluse de Méricourt)						



Etat des Lieux

L'étude des cours d'eau requiert une phase préalable d'état des lieux visant à identifier les variables de « contrôle » imposées par le climat et la géologie du bassin versant telles que le débit liquide, le débit solide, la géométrie de la vallée ou encore l'occupation des sols, qui vont influencer l'hydromorphologie des cours d'eau et son évolution dans le temps et dans l'espace. Cette première partie constitue un état des lieux des variables de contrôle sur le bassin versant de la Juine et une synthèse des données hydrobiologiques existantes.

Hydrographie et hydrogéologie

La rivière La Juine prend sa source à Autruy-sur-Juine dans le Loiret au lieu-dit « le Bois de la Muette » et se jette dans l'Essonne à Vert-le-Petit. Son bassin versant couvre une superficie d'environ 780 km² et concerne 91 communes réparties sur 3 départements : l'Essonne, l'Eure et Loir et le Loiret. Le réseau hydrographique comprend 200 km de cours d'eau principaux composés de la rivière Juine et de ses affluents. D'une longueur de 52 km, La Juine reçoit les eaux de 4 principaux affluents : l'Eclimont en rive droite et la Murette de Guillerval ainsi que la

Rivière d'Etampes, elle-même formée de la Louette et de la Chalouette, en rive gauche. La zone d'étude se situe sur la partie amont de la Juine à Boissy la Rivière, à environ 18 km en aval de sa source et intègre la confluence avec l'Eclimont (Figure 6).

La Juine, est une rivière qui a été largement anthropisée lors de l'implantation historique des moulins. La rivière a été divisée en biefs, c'est-à-dire en tronçons compris entre deux chutes d'eau, et son cours a été modifié par recalibrage, rectification ou curage. On dénombre 40 biefs sur le lit principal de la Juine et 45 biefs sur ses 4 affluents. Les 85 biefs artificiels surplombent l'ancien lit en fond de vallée. La Juine est une rivière de nappe, elle est alimentée à 80% par l'eau issue de nappes souterraines dont la plus importante est la nappe de Beauce. La nappe de Beauce est très vulnérable à la pollution sur la zone d'étude car elle repose sur des calcaires de Pithiviers et de Beauce qui ne protègent pas géologiquement les faciès aquifères.

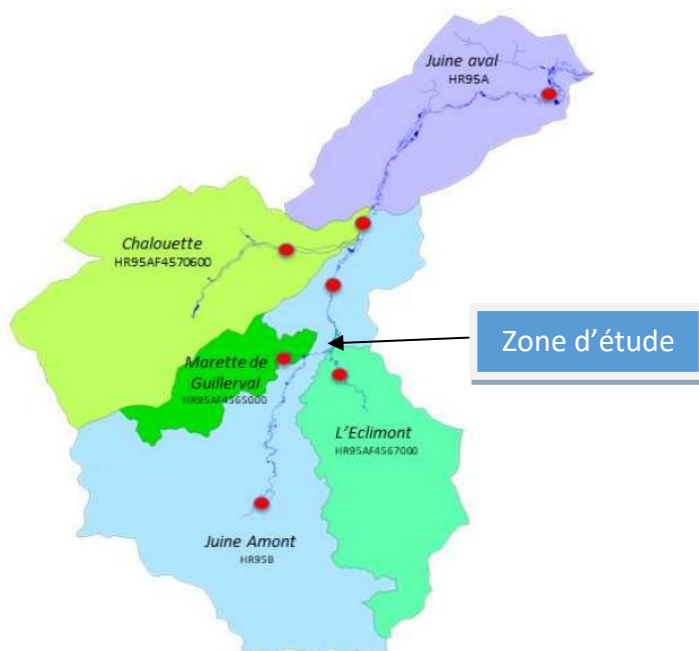


Figure 6. Réseau hydrographique de la Juine – Source : SIARJA

Hydrologie

Le régime hydrologique de la Juine est de type pluvial et se caractérise par une alternance de hautes eaux hivernales et de basses eaux estivales, avec une variabilité des débits très faible toutefois. Le régime hydrologique du cours d'eau est en effet particulièrement stable au cours de l'année, car le volume de la nappe "tamponne" et lisse les variations mensuelles de pluviométrie. Cette corrélation étroite entre les débits du cours d'eau et la nappe de Beauce est également à l'origine d'un régime hydrologique singulier alternant des périodes de hautes eaux et de basses eaux caractéristiques des cycles pluriannuelles de remplissage et de vidange de la Nappe de Beauce.

Les débits de références de la Juine au droit de la zone d'étude ont été déterminés par homothétie de bassin versant à partir des débits de références statistiques de la Juine à la station hydrométrique de Saclas (station F456042001 à 3km en amont de la zone d'étude, données disponibles pour la période 2014-2023), en tenant compte d'un facteur correctif basé sur la comparaison des mesures de débits réalisées sur site les 17 janvier et 28 mars 2023 et enregistrées au même moment à la station de la Juine à Saclas. Il a ainsi été apparu que les débits mesurés sur le site d'étude (superficie de bassin versant de 396 km²) étaient à deux reprises 1.4 fois supérieurs à ceux enregistrés à la station de la Juine à Saclas (superficie de bassin versant de 257 km²), soit un ratio très proche du rapport de surface de bassin versant (1.5) bien que légèrement moindre ce qui traduit probablement une plus forte abondance des apports de la Juine en tête de bassin versant et/ou d'une plus faible abondance de l'Eclimont. Les débits de référence ordinaires de la Juine sur le site d'étude ont été estimés en multipliant les débits

de références connus à la station de Saclas par un facteur de 1.4. Considérant toutefois que les ruissellements de surface jouent un rôle plus important dans la genèse des débits de crue, ces derniers ont été estimés de façon plus classique au droit de la zone d'étude par approche régionale en employant la méthode de Meyer (coefficient d'abattement spatial retenu de 0.8). Les débits caractéristiques estimés en amont du secteur d'étude et intégrant l'Eclimont sont détaillés en Annexe 1. L'analyse de ces données met en évidence :

- Une très faible variabilité annuelle des débits de la Juine amont, traduisant l'effet régulateur de la nappe de Beauce. Le débit moyen mensuel maximal est atteint en décembre avec 1.72 m³/s et le débit moyen mensuel minimal est atteint en août avec 1.41 m³/s ;
- Une alternance de hautes eaux hivernales de novembre à juin, et de basses eaux estivales de juillet à octobre traduisant le régime hydrologique pluvial de la Juine. Le débit moyen mensuel est de 1.68 m³/s en moyenne sur la période hivernale et de 1.45 m³/s en moyenne sur la période estivale.

Le module interannuel, soit 1,61 m³/s est statistiquement atteint ou dépassé environ 50% du temps et se confond donc quasiment avec le débit médian. Le débit plancher réglementaire correspondant à 1/10^{ième} du module, soit 0.16 m³/s, est quant à lui statistiquement toujours dépassé ce qui est révélateur d'un régime hydrologique particulièrement stable et soutenu par la nappe. Le QMNA5, débit d'étiage de référence correspondant au débit mensuel minimum ayant une chance sur cinq d'être observé tous les ans, s'établit à 1.27 m³/s, soit un débit statistiquement atteint ou dépassé près de 95% du temps. Les débits de crue journaliers varient quant à eux de 2.77 m³/s à 4.21 m³/s respectivement pour la crue biennale et décennale.

Occupation des sols

L'analyse de l'occupation des sols sur le bassin versant de la Juine en limite amont du site d'étude met en évidence la dominance quasi exclusive des territoires agricoles qui recouvrent 99.6% du territoire. La répartition des 0.4 % restant est présentée en Figure 7. L'occupation des sols de la vallée de la Juine sur le site d'étude est caractérisée par des boisements, des terres agricoles et les zones urbaines de Boissy-la-Rivière et Saclas.

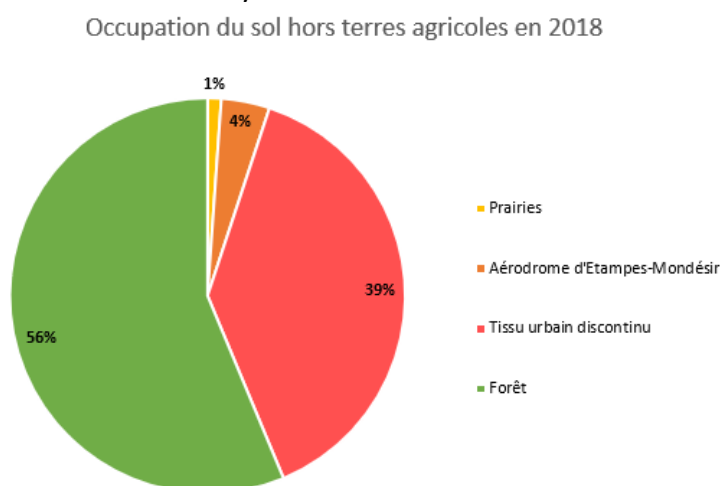


Figure 7. Répartition de l'occupation du sol hors terres agricoles du bassin versant de la Juine en limite amont du site d'étude
– Source : Corine Land Cover 2018

Données piscicoles

La Juine amont est classée en 1^{ière} catégorie piscicole au titre de l'article L.436-5 du Code de l'Environnement. Le Plan Départemental pour la Protection des milieux aquatiques et la Gestion des milieux aquatiques (PDPG) réalisé par la Fédération de l'Essonne pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique évalue la Juine amont comme **contexte salmonicole perturbé pour la truite fario** qui constitue l'espèce repère bioindicatrice pour l'état du milieu. La qualité du contexte piscicole est appréciée



selon « *sa capacité ou non de permettre la réalisation des trois phases du cycle biologique de l'espèce repère, que sont la reproduction, l'éclosion et la croissance* ». Elle est évaluée sur la disponibilité et la qualité des habitats et la comparaison entre les peuplements piscicoles en place et les peuplements théoriques calculés par l'indice de Verneaux (1977).

Les résultats de pêches électriques réalisées par la Fédération Départementale de Pêche de l'Essonne entre 2012 et 2017 font état d'un **peuplement dominé par des cyprinidés** (gardon, chevaine, vandoise, goujon, vairon) accompagnés de petites espèces peu exigeantes telles que la loche franche et l'épinochette. **L'anguille européenne**, poisson migrateur amphihaline, **est également recensée**. Les espèces manquantes par rapport au peuplement potentiel sont l'ombre et l'omble chevalier. Les résultats d'Indices Poisson Rivière (IPR) aux stations de suivi de la Juine en amont proche de la zone d'étude (Tableau 2) indiquent une bonne qualité piscicole en 2017 à la station de la Juine à Méreville avec une nette amélioration par rapport aux années précédentes et une qualité piscicole bonne et stable à la station de l'Eclimont à Boissy-la-Rivière sur la période 2012-2017. **Les résultats d'IPR récents à la station de suivi de la Juine à Autruy-sur-Juine présentent une bonne qualité piscicole** pour les deux opérations de prélèvement les 9 juillet 2020 et 22 juin 2022.

Tableau 2. Résultats d'IPR aux stations de suivi situées en amont proche de la zone d'étude sur la période 2012-2022 – Sources : Fédération Départementale de Pêche de l'Essonne, <https://naiades.eaufrance.fr/>

Stations	2012	2014	2017	2020	2022
La Juine à Méreville	29.84	23.67	15.19		
L'Eclimont à Boissy-la-Rivière	12.72	7.99	8.82		
La Juine à Autruy-sur-Juine				7.30	9.66

Le cours de la Juine amont sur le secteur d'étude est concerné par un classement en liste 1-poissons et en liste 2p-poissons d'après l'inventaire des zones de frayères, des zones de croissance ou d'alimentation de la faune piscicole définies par l'arrêté préfectoral n°2021-DDT-SE-634 du 28 décembre 2012. Ceci implique que le cours d'eau est susceptible d'abriter des frayères de chabot, lamproie de planer, truite fario et vandoise au regard de ses caractéristiques de pentes et de largeur (liste 1) et que la dépose et la fixation d'œufs ou la présence d'alevins de brochet ont été constatées au cours de la période des dix années précédentes (liste 2). Les reconnaissances de terrain ont montré que les **zones de frayère potentielles restent rares** toutefois à l'échelle de la zone d'étude compte tenu de l'envasement significatif des fonds sur l'ensemble des bras d'écoulement.

Données relatives à la qualité de la masse d'eau

La masse d'eau superficielle de « La Juine de sa source au confluent de la Chalouette inclus » (FRHR95A) présentait en 2019 au sens de la DCE, un état écologique jugé moyen et un état chimique avec ubiquistes jugé mauvais (état chimique sans ubiquiste jugé bon). Le paramètre déclassant de l'état physico-chimique est le nitrate et le paramètre déclassant de l'état biologique est l'indice I2M2 relatif aux macro-invertébrés. Les pressions significatives recensées sont les nitrates diffus en provenance des sols agricoles du bassin versant et l'hydromorphologie avec un risque fort d'altération de la continuité. La réévaluation de la masse d'eau en 2022 fait état d'un état écologique moyen (mêmes paramètres déclassant) et d'un bon état chimique avec ubiquistes.

Diagnostic

Face aux variables de « contrôle » définies précédemment, les cours d'eau s'ajustent grâce à un certain nombre de variables de réponses ou grandeurs hydromorphologiques. La phase de diagnostic présentée dans la section suivante vise dans un premier temps à décrire l'hydromorphologie de la Juine et son évolution conditionnées par les variables de contrôle de son bassin versant et par les travaux hydrauliques passés. Le diagnostic se portera dans un second temps sur le fonctionnement hydraulique et l'évaluation de la franchissabilité piscicole au droit du complexe hydraulique du moulin des Clercs.

Diagnostic hydromorphologique

Evolution hydromorphologique du cours de la Juine sur le site d'étude depuis le XIX^{ème} siècle

Le cours de la Juine sur le site d'étude a été très anciennement déplacé vers l'Est en pied de coteau de façon à permettre la formation d'une chute exploitable au droit du moulin des Clercs. Le cadastre napoléonien (1831) fait apparaître sous leur forme et emplacement actuels le bief et le site du moulin des Clercs avec le bras de décharge, le canal de régulation latéral et le canal de fuite [1] (Figure 8). Sur le domaine du château de Bierville, le cadastre napoléonien fait apparaître un linéaire plutôt naturel en milieu de parcelle qui pourrait constituer le bras originel de la Marette en fond de vallée [4] (Figure 9). Les photographies aériennes mettent en évidence le recalibrage et la rectification de ce bras à partir de 1968 [6]. Il est à noter la présence d'un réseau de trois bassins au lieu de deux à l'heure actuelle [5] et une division du cours du bief de la Juine en deux bras au niveau de l'actuel système de répartition des eaux [3]. Enfin, l'analyse du tracé en plan, témoigne d'une grande stabilité du cours de la Marette en fond vallée depuis le XIX^{ème} siècle et jusqu'à nos jours [2].



Figure 8. Comparaison du cadastre napoléonien de 1891 et avec la configuration actuelle du site d'étude – Sources : <https://archives.essonne.fr/> ; <https://www.geoportail.gouv.fr>



Figure 9. Comparaison du cadastre napoléonien (1891) avec une photographie aérienne (1968) sur le domaine du château de Bierville – Sources : <https://remonterletemps.ign.fr/>, <https://archives.essonne.fr/>

Analyse du profil en long et de la géométrie en travers actuels

Les reconnaissances de terrain et l'analyse des données topographiques et photographies aériennes anciennes et récentes permettent d'identifier les principaux segments homogènes. L'Annexe 2 donne une vue d'ensemble reportant les principaux segments sur le secteur d'étude. Les représentations graphiques des profils en long de la Juine et du bief du moulin des Clercs réalisées à partir des données topographiques relevées sur le site d'étude les 17 et 18 janvier 2023, sont présentées en Annexe 3 et 4. Les principales variables hydromorphologiques d'intérêt extraites de ces données sont résumées dans le Tableau 3 suivant.

Tableau 3. Principales grandeurs hydromorphologiques sur le site d'étude

Principales grandeurs hydromorphologiques moyennes	La Juine et la Marette en fond de vallée (1503 m)	Le bief en amont du moulin des Clercs (835 m)
Pente (m/m %)	0.14	-0.1
Epaisseur de vase (m)	0.2	0.6
Epaisseur maximale de vase (m)	1.06	1.0
Hauteur de berge (m)	1.4	1.6
Largeur à plein bord (m)	7.2	10
Rapport Largeur/Hauteur à plein bord	5.1	6.3

L'analyse de ces éléments permet de mettre en évidence le **caractère perché du bief à l'Est en pied de coteau** dont le profil de fond dur se situe continuellement au-dessus du fond de la Marette en fond de vallée. Le dénivelé de fond entre le bief du moulin des Clercs et la Marette en fond de vallée s'établit au maximum à 2.1 m au droit du profil transversal à la vallée passant par le moulin des Clercs. L'**envasement** du fond du lit sur le cours de la Juine et de la Marette en fond de vallée **est continu** à l'exception des zones de rétrécissement de la section et d'accélération des écoulements notamment au niveau des ouvrages. **Le rapport Largeur plein bord / Hauteur** varie entre 4.9 sur le cours de la Marette en fond de vallée et 7.0 sur le cours de la Juine aval avec une valeur moyenne de l'ordre de 5.2 sur l'ensemble du profil en long et **témoigne d'une morphologie du lit probablement impactée par des travaux hydrauliques passés**. En effet, le rapport de forme des cours d'eau de référence dans l'Hydro-Eco-Région des Tables Calcaires est de l'ordre de 8.3 pour un bassin versant de surface équivalente. Les 17 et 18 janvier 2023 (régime hydrologique médian), un dénivelé d'eau de 0.5 m a pu être observé au droit de l'ancien moulin de Bierville.

En amont du moulin des Clercs, le bief présente une faible contrepente de l'amont vers l'aval ce qui reflète le relèvement progressif du fond du point de défluence amont jusqu'au moulin en lien avec l'**accentuation du caractère perché du bief à l'approche du moulin**. En aval du moulin des Clercs, le canal de fuite présente une faible pente de 0.01% jusqu'à l'atteinte du fond existant à la confluence avec la Marette en fond de vallée. Le profil de fond dur alluvionnaire du bief présente des oscillations marquées et irrégulières autour du profil de fond moyen qui sont très probablement liées aux terrassements réalisés anciennement lors du creusement du bief du moulin des Clercs. Le profil de fond décroche au droit du Moulin des Clercs avec un dénivelé observé de 1.57 m et une chute d'eau observée (janvier 2023) de 1.5 m. L'analyse de la ligne d'eau met en évidence l'**important remous liquide du moulin des Clercs même en position ouverte des vannes**. De ce fait, **la pente de ligne d'eau est quasi-nulle et la ligne d'eau quasi-identique entre l'amont et l'aval du bief** (72.87 m NGF au point de défluence contre 72.76 m NGF en amont du moulin les 17 et 18 janvier 2023).

Comparaison aux indicateurs morphologiques de référence

L'interface d'Exploitation des Données IED du projet national de Caractérisation Hydromorphologique des Cours d'Eau (CARHYCE) permet de connaître les principaux indicateurs morphologiques de référence dans une Hydro-Eco-Région (HEC) donnée. Une HEC se définit comme une entité géographique dans laquelle les écosystèmes d'eau courante présentent des caractéristiques communes (Wasson *et al.*, 2002). Les indicateurs de référence sont déterminés à partir de mesures réalisées sur des cours d'eau peu anthropisés de l'HEC considérée. Le site d'étude se situe dans l'HEC des Tables Calcaires. Le Tableau 4 présente les écarts bruts des indicateurs morphologiques mesurés sur le site d'étude par rapport aux indicateurs de référence pour une taille de bassin versant équivalente. Le niveau d'altération peut être considéré comme faible pour la pente de la ligne d'eau et la profondeur maximale à plein bord. En revanche, le cours de la Juine et du bief sur la zone d'étude semble significativement moins large et profond que ce qui pourrait être attendu en contexte naturel.

Tableau 4. Comparaison des indicateurs morphologiques de référence dans l'HEC des Tables calcaires avec ceux observés sur le site d'étude

	Largeur moyenne à plein bord à cote de berge moyenne (m)	Rapport largeur / profondeur à plein bord à cote de berge moyenne	Profondeur maximale moyenne à plein bord à cote de berge moyenne (m)	Pente de la ligne d'eau (%)	Surface mouillée moyenne à plein bord à cote de berge moyenne (m ²)
Référence pour une taille de bassin versant équivalente	17.6	8.3	1.7	0.13	15.7
Segment 4 : Marette en fond de vallée	7.1	5.0	1.4	0.08	7.5
Ecart brut à la référence	-10.5	-3.3	-0.3	-0.05	-8.2
Segment 1 Bief : Amont du moulin des Clercs	9.6	6.0	1.6	0.01	11.3
Ecart brut à la référence	-8.0	-2.3	-0.1	-0.12	-4.4

Caractérisation du substrat alluvial

Les observations de terrain réalisées dans le cadre de l'étude ont permis de mettre en évidence sur le cours de la Juine : un substrat sablo-limoneux dominant recouvert d'un dépôt quasi continu de vases formées de matériaux fins cohésifs (limons/argiles) mêlés à des débris de matière organique d'une épaisseur moyenne de 0.2 m ; Un substrat caillouteux (2-128 mm) localement sur des zones de relèvement du fond dur et d'écoulement plus courant sur le cours du bief de l'ancien moulin de Bierville ; Quelques banquettes sableuses localement en intrados de méandre sur le cours de la Marette en fond de vallée.

Sur le bief du moulin des Clercs : un substrat sablo-limoneux dominant recouvert d'un dépôt continu et très épais de vase d'une épaisseur moyenne de 0.6 m sur le cours du bief en amont du moulin ; un substrat sablo-limoneux en amont de la chute, recouvert par un dépôt de vase sans aggradation observée en amont du moulin ; Un substrat gravelo-caillouteux (2-128 mm) décolmaté sur le cours du canal de fuite en aval de la confluence avec le bras de décharge et jusqu'à la confluence avec la Marette en fond de vallée.

Le caractère fin du substrat alluvial peut notamment être expliqué par les faibles apports en provenance du bassin versant associés à de faibles ruissellements, à une infiltration importante dans la nappe de Beauce et à la géologie du fond de vallée constituée d'alluvions modernes à dominante sableuses et tourbeuses reposant sur des sables du Stampien.



Figure 10. Caractérisation du substrat sur la zone d'étude

L'analyse hydromorphologique présentée ici est complétée par une analyse descriptive par segments homogènes permettant notamment l'évaluation localisée des conditions d'érodabilité des berges, leur végétalisation ou éventuelle stabilisation, la qualité de la ripisylve, l'occupation des sols en lit majeur et de relever toutes autres singularités telles d'éventuelles habitats aquatiques (débris ligneux, caches sous-berges). L'Annexe 5 présente un exemple de cartographie détaillant ces observations à l'échelle du segment.

Description des ouvrages

Le complexe hydraulique formé par le moulin des Clercs se compose des ouvrages régulateurs suivants :

- Une vanne usinière au droit du moulin poursuivie par le canal de fuite ;
- Une vanne de décharge latérale en rive gauche en amont immédiat du moulin (OH33) poursuivie du bras de décharge principal ;
- Une vanne de décharge latérale à l'intérieur du moulin, en amont immédiat de la vanne usinière, poursuivie par un petit bras de décharge confluant rapidement avec le bras de décharge principal.

Il est à noter également la présence :

- D'un ouvrage répartiteur en amont du bief du moulin des Clercs ;
- De divers ouvrages de franchissement et d'aménagements de fortune au droit des brèches et dans leur environnement proche aval, notamment dans le but de contenir l'évolution de celles-ci ;
- De divers ouvrages de franchissement sur les différents bras d'écoulements lesquels peuvent parfois présenter une section d'ouverture relativement restreinte (OH1, OH2, OH3, OH4, OH5, OH6, OH7, OH8, OH30, OH34).

Les Annexes 2 et 6 présentent des photographies et donnent une vue d'ensemble reportant les principaux ouvrages sur le secteur d'étude.

Analyse du fonctionnement hydraulique actuel du complexe du moulin des Clercs

L'analyse hydraulique est réalisée par la construction d'un modèle 1D sur l'ensemble du linéaire d'étude à l'aide du logiciel de simulation d'écoulements à surface libre HEC-RAS de l'US Army Corps of Engineers. Elle vise à caractériser les principales variables d'écoulement actuelles (hauteurs d'eau, vitesses, contraintes tractrices) pour les régimes hydrologiques ordinaires non débordants.

Méthodologie

1. Positionnement des profils en travers

La construction du modèle hydraulique 1D repose sur la représentation de la géométrie du lit mineur et de l'évolution du tracé en plan du cours d'eau vers l'aval, à partir d'une succession de profil en travers. Ces profils en travers sont positionnés au niveau des points d'inflexion entre deux sinuosités sur des tronçons hydro-morphologiquement homogènes. L'Annexe 7 présente l'étendue du modèle et le positionnement des profils en travers et des ouvrages intégrés au modèle.

2. Recueil des données de terrain

a. Campagne de relevés topographiques

Les données topographiques sont relevées dans le but de connaître précisément les caractéristiques bathymétriques du cours d'eau (radiers, seuils, fosses etc.) et les caractéristiques topographiques du terrain naturel sur les parcelles riveraines. Les données topographiques exploitées pour la construction du modèle hydraulique, ont été relevées les 17-18 janvier 2023, et mises en forme (fichier de dessins AutoCAD) par une entreprise de géomètres-topographes experts. Les niveaux d'eau et de vase sont également relevés et représentés sur les plans (Figure 11).

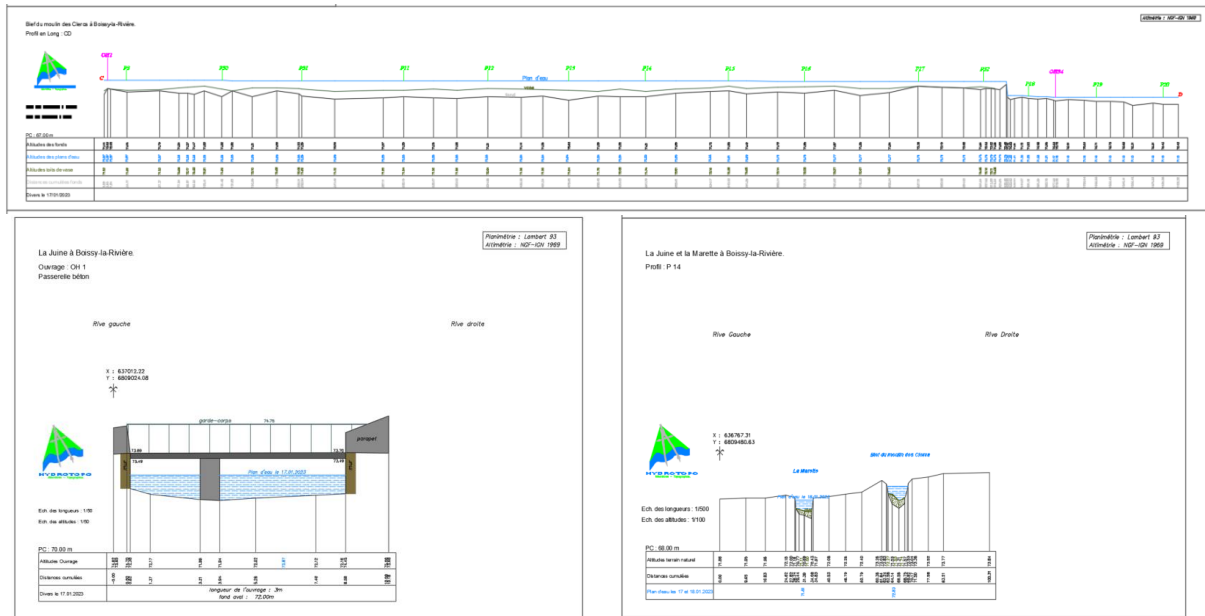


Figure 11. Exemple de profil en long, profil en travers et relevé d'ouvrage exploités pour la construction du modèle hydraulique
- Source : HYDROTOPO

b. Mesures de débits



Les mesures de débits sont réalisées conjointement aux relevés topographiques de façon à obtenir des niveaux d'eau et débits simultanés et ce pour une situation hydrologique stable de moyennes eaux. La méthode d'exploration du champ des vitesses par flotteurs a été choisie en lien avec les faibles vitesses et profondeurs sur le linéaire d'étude et conformément aux recommandations du Guide technique pour le contrôle des débits réglementaires (ONEMA, CEMAGREF, septembre 2011). Cette méthode s'appuie sur une estimation de la vitesse moyenne et de la surface mouillée de l'écoulement, à l'aide de flotteurs se déplaçant en surface de l'écoulement. La vitesse [m/s] d'un flotteur est déterminée en chronométrant le déplacement du flotteur entre deux sections de mesure.

3. Construction du modèle 1D

La géométrie du modèle est directement construite à l'aide de l'éditeur de géométrie du logiciel HEC-RAS. Les profils en travers et les ouvrages en travers et latéraux sont construits (Figure 13) et géolocalisés sur les différents bras d'écoulements, eux-mêmes reliés entre eux par des jonctions (Figure 12).

Figure 12. Vue en plan du complexe hydraulique du moulin des Clercs à partir de l'éditeur de géométrie HEC-RAS.

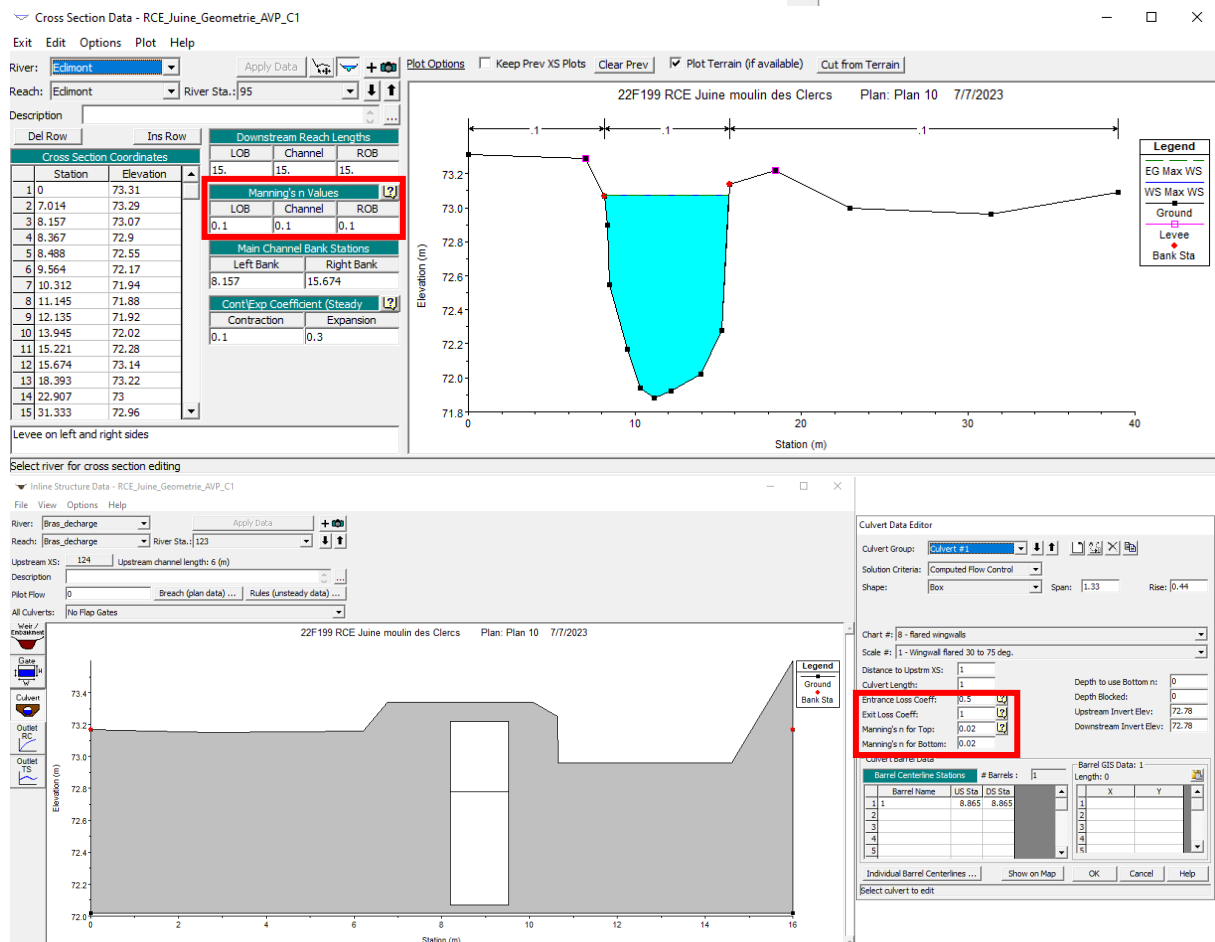


Figure 13. Illustration d'une étape de construction de la géométrie du lit mineur et des ouvrages à partir de l'éditeur de géométrie HEC-RAS (en rouge les paramètres de calage du modèle)

4. Paramétrage du modèle

Le paramétrage du modèle hydraulique consiste à définir les paramètres de modélisation de façon à ce que les résultats (hauteurs d'eau et débits) concordent avec les observations de terrain. Les paramètres définis sont les suivants :

- **Les coefficients de Manning-Strickler du lit mineur et du lit majeur** : ces coefficients représentent la capacité de frottement des différentes parties du lit. Ils dépendent, pour le lit mineur, essentiellement de la nature du fond, pour le lit moyen et le lit majeur, du couvert végétal et de l'occupation des sols (présence de bosquets ou de bois, nature des cultures, zones de pâturages...) ;
- **Les coefficients de perte de charge des ouvrages** : ils traduisent les conditions d'entonnement en amont d'un ouvrage. Ils permettent d'ajuster localement la ligne d'eau en amont d'un ouvrage donné. Les coefficients de perte de charge aux ouvrages sont déterminés à partir de la forme de ceux-ci et en particulier leur entonnement et des abaques existants.

Les coefficients de Strickler en lit mineur ont été déterminés en première approche à partir des observations de terrain et de l'application de la formule de Cowan.

$$K = 1 / [(n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m]$$

Avec n_0 : les matériaux constitutifs de berges ; n_1 : le degré d'irrégularité, n_2 : la variation de section ; n_3 : la présence d'obstacles ; n_4 : la végétation et m : le méandrement

Équation 1. Estimation du coefficient de Manning-Strickler par la formule de Cowan

Le calcul des lignes d'eau repose sur la résolution de la formule de Manning-Strickler reposant sur une relation Cotes/Débits déterminée en considérant localement l'établissement d'un régime permanent et uniforme tenant compte de la pente locale de la ligne d'eau et de la rugosité du lit.

$$Q = K \cdot S \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{I}$$

Avec Q : débit [m^3/s] ; K : coefficient de Strickler ; S : section mouillée [m^2] ; R : rayon hydraulique [m] ; I : pente [m/m]

Équation 2. Formule de Manning – Strickler

5. Calage du modèle

L'étape de calage consiste à mettre en œuvre le modèle et à comparer les lignes d'eau calculées à celles mesurées lors des campagnes de relevés de terrain afin d'ajuster les paramètres du modèle jusqu'à adéquation des valeurs. Les Annexes 8 et 9 présentent les lignes d'eau mesurées les 17-18 janvier 2023 et modélisées sur le secteur d'étude. La comparaison des lignes d'eau calculées et mesurées fait état :

- D'un écart moyen des lignes d'eau de 4 cm ;
- Du pourcentage significatif de valeurs présentant un faible écart :
 - 100% des écarts sont compris entre +/- 10 cm ;
 - 72% des écarts sont compris entre +/- 5 cm.

Le modèle est ainsi considéré comme validé et mis en œuvre pour la configuration habituelle des ouvrages associés au moulin des Clercs :

- Vanne latérale amont (OH33) entrouverte de 3 cm ;
- Vanne latérale aval ouverte ;
- Vanne usinière fermée.

Et pour les régimes hydrologiques suivants :

- Débit d'étiage de référence : $QMNA5 = 1.27 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Débit moyen : module interannuel = $1.61 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Débit de hautes eaux hivernales : double module = $3.22 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Débit de crue courante et non débordante : crue journalière biennale = $2.77 \text{ m}^3/\text{s}$.

Résultats

La mise en œuvre du modèle hydraulique vise à identifier les faciès d'écoulement et comprendre le fonctionnement hydraulique actuel du site d'étude pour les différents débits modélisés. L'analyse se porte tout particulièrement sur les impacts des ouvrages sur la ligne d'eau, la répartition des débits entre les différents bras d'écoulement, les vitesses d'écoulements, et les contraintes érosives sur le fond, les berges et au droit des infrastructures. Les profils en long des lignes d'eau modélisées et les principales variables hydrauliques calculées sont présentés en Annexe 10, 11, 12 et 13.

L'analyse met en évidence une influence des ouvrages du moulin des Clercs sur la ligne d'eau sur la totalité du bief ($\approx 825 \text{ m}$) et sur le cours de la Juine en amont de l'ouvrage répartiteur sur soit une longueur totale d'environ 1007 m . L'écoulement est libre sur le cours de la Marette en fond de vallée et sur le cours de la Juine en aval de la confluence avec le bief du moulin des Clercs. Le cours d'eau d'étude présente des variables caractéristiques d'un faciès :

- **Plat lentique** sur le cours de la Juine en amont de la confluence avec l'Eclimont et sur le cours du canal de fuite du moulin des Clercs ;
- **Chenal lotique** sur le cours du bief de l'ancien moulin de Bierville ;
- **Chenal lentique** sur le cours de la Juine en amont de l'ouvrage répartiteur et en aval du site d'étude, sur le cours de la Marette en fond de vallée et sur le cours du bief du moulin des Clercs dans l'emprise du linéaire influencé par les ouvrages du moulin.

Les variations de débits sont limitées et se traduisent par de faibles amplitudes des hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement au gré des variations hydrologiques saisonnières. Le canal de fuite présente cependant des amplitudes de vitesse plus importante que sur le reste du linéaire du fait de sa morphologie chenalisée et maçonnée. En cas d'étiage sévère, la hauteur d'eau moyenne ne s'abaisse que très faiblement sur l'ensemble du linéaire sans modification des régimes d'écoulement à l'exception du bief de l'ancien moulin de Bierville qui présente alors un faciès de type plat courant. Les premiers débordements s'observent au niveau des points bas de berge sur le cours de la Marette en fond de vallée et en rive gauche du bief du moulin des Clercs pour la crue journalière biennale. Les écoulements restent malgré tout bien contenus dans le lit.

Au sein du complexe hydraulique du moulin des Clercs, la part de débit la plus importante est dérivée par le cours de la Murette en fond de vallée (en amont de la confluence avec le bief). Cette part de débit dérivé par la Murette reste constante avec l'élévation du débit total du cours d'eau : 73 % du débit total au module et 74 % pour le régime de hautes eaux annuelles (double module). La chute formée au droit du moulin des Clercs est significative bien que s'atténuant quelque peu à mesure que le débit du cours d'eau s'élève du fait d'un relèvement plus rapide du niveau d'eau aval : 0.98 m à l'étiage (QMNA5), 1.56 m au module et 1.51 m pour le régime de hautes eaux annuelles (double module).

Analyse du transport sédimentaire

Un cours d'eau transporte des matériaux solides provenant du bassin versant, du fond et des berges du lit mineur ou du lit majeur. Ces sédiments sont transportés par **charriage** (déplacement de matériaux plutôt grossiers en interaction avec le lit mineur généralement en période de hautes eaux) et par **suspension** (entraînement de particules fines par le courant turbulent sans interaction avec le fond).

L'analyse des variables issues de la modélisation hydraulique telles que les forces de frottements (τ_0) qui s'appliquent sur le fond et les parois du lit, permet d'apprécier les capacités de transport. Les forces de frottements (τ_0) sont intégrées au calcul du critère de Shields (τ^*) selon l'équation suivante :

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho_0) \cdot g \cdot d}$$

Équation 3. Critère de Shields

Avec :

τ_0 = Contrainte tractrice tangentielle s'appliquant sur les parois du lit

τ^* = Critère de Shields : contrainte tractrice minimale pour la remise en mouvement des matériaux

u^* = vitesse de frottement s'appliquant sur les parois du lit

ρ_s = masse volumique du matériau solide, égale à 2650 kg/m³

ρ_0 = masse volumique de l'eau égale à 1000 kg/m³ à T=20°C

d = diamètre de la particule solide, $d^* = 25000 \cdot d$

g = constante de gravitation égale à 9.81 m/s².

On considère ainsi que les forces de frottements (τ_0) sont suffisantes pour la mise en mouvement des particules à partir du diagramme de Yanon-Shields suivant et en fonction de la taille des particules :

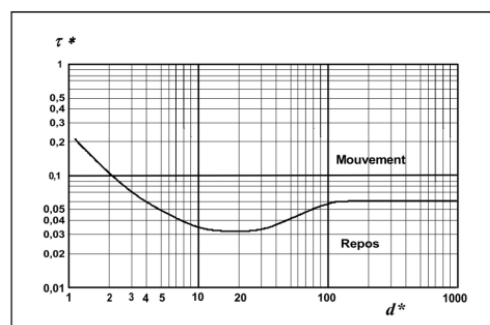


Figure 14. Diagramme de Yanon-Shields

Les sédiments potentiellement mobilisables sur la Juine ont ainsi été estimés pour les différents régimes hydrologiques ordinaires considérés. L'analyse de ces résultats a permis de mettre en évidence des capacités de transport de sédiments de type :

- « **Sables grossiers** » sur le cours de la Juine et ce de manière constante au gré des variations hydrologiques saisonnières. Ceci est en cohérence avec la granulométrie des banquettes sableuses observées sur le cours de la Marette en fond de vallée ;
- « **Sables fins** » sur le cours du bief du moulin des Clercs et sur le canal de fuite en amont de la confluence avec le bras de décharge pour les régimes hydrologiques ordinaires, hormis à l'étiage où elles sont plus faibles sur le canal de fuite (capacité de transport de sédiments de type « limons ») ;
- « **Limons** » sur le cours du canal de fuite en aval de la confluence avec le bras de décharge et ce uniquement pour les débits de double module et de crue biennale ce qui traduit une capacité de transport particulièrement faible.

Le relèvement artificiel de la ligne d'eau induit par les ouvrages transversaux introduit un déséquilibre dans le fonctionnement hydromorphologique du cours d'eau. En effet, le ralentissement important de l'écoulement dans l'emprise des zones d'influence limite fortement les possibilités de charriage des matériaux grossiers et favorise le dépôt des particules fines et le colmatage des substrats. Les capacités de transport sont ainsi diminuées dans l'emprise du linéaire influencé par le moulin des Clercs mais aussi sur le cours naturel de la Marette en fond de vallée où la pente est plus faible.

Analyse de la franchissabilité piscicole

Les peuplements piscicoles effectuent des migrations pour assurer leur reproduction, leur croissance, leur alimentation ou pour trouver des abris et ce à différentes échelles spatiales et temporelles. Les espèces migratrices sur la zone d'étude sont des espèces holobiotiques potamodromes qui effectuent leur migration en eau douce uniquement et qui reste dans le même milieu de vie pour leur croissance et leur reproduction. Sur le site d'étude, la période la plus critique pour la continuité piscicole correspond au déplacement de reproduction de *Salmo trutta* (truite fario), de l'automne jusqu'au début d'hiver. La truite fario est une espèce d'eau courante nécessitant un substrat de type graviers meubles et bien oxygéné pour sa reproduction.

Sur le site d'étude et dans la configuration habituelle des ouvrages, la vanne de décharge entrouverte de quelques centimètres et la vanne usinière fermée peuvent être considérées comme des barrières infranchissables pour la truite fario. Il en est de même pour les brèches considérant les faibles niveaux d'eau au droit de l'ouverture et les divers aménagements de fortune entravant le cours des brèches. Le seuil en bois présent sur le cours de la Marette en amont de la confluence avec le canal de fuite du moulin des Clercs, reste noyé à jet de surface pour les débits d'étiage et peut donc être considéré comme une barrière franchissable pour l'ensemble des espèces en présence. La présente analyse de la franchissabilité piscicole est portée sur les deux seuils associés au canal latéral du moulin des Clercs. Seule la possibilité de franchissement par saut de la truite fario est considérée compte tenu de la typologie des **chutes à jet plongeant** (Figure 15). Le franchissement des petites espèces d'accompagnement n'ayant pas de capacité de saut est exclu.

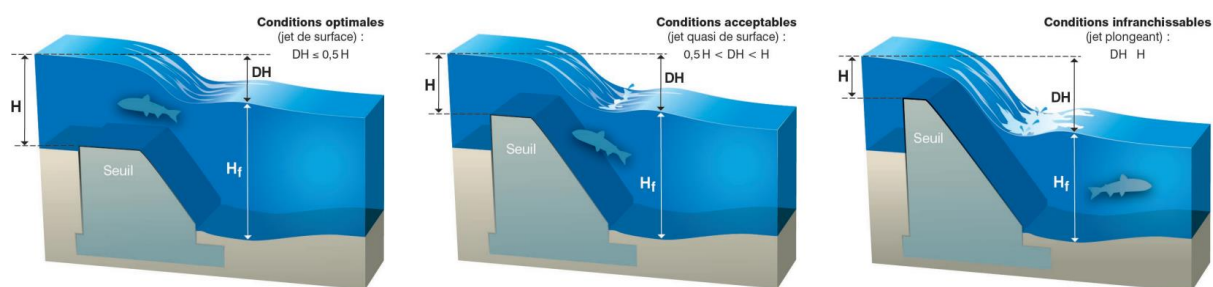


Figure 15. Illustration des différents types de jets et de paramètres à prendre en compte pour le franchissement de seuils (DH la hauteur de chute et Hf la profondeur de fosse) – Source : ICE, ONEMA

Méthodologie

Le diagnostic de la franchissabilité des différents ouvrages de la zone d'étude a été réalisé en s'inspirant des principes du guide Informations sur la Continuité Ecologique (ICE) – Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons, principes et méthodes (ONEMA, 2014) et en s'appuyant sur les données de modélisation hydraulique. Les critères élémentaires à prendre en compte pour la définition des classes de franchissabilité des seuils à **parement vertical** pour les salmonidés prennent principalement en compte :

- Les caractéristiques de l'écoulement en amont et en aval immédiat de la chute (tirants d'eau, vitesses), et la profondeur de la fosse aval (Figure 17) ;
- Les capacités de nage et de saut en fonction de la morphologie des espèces ciblées (vitesse de nage maximale, endurance à cette vitesse maximale et hauteur du poisson) Figure 16.

Groupe ICE	Espèces	Espèces sauteuses	V, Sprint Umax associé (m/s)			Hauteur de saut associé (m)		
			Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	Oui	3	4	5	0,5	0,9	1,4
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)		2,5	3	3,5	0,3	0,5	0,8

Figure 16. Capacités de nage et de saut de la truite de rivière – Source : ICE, ONEMA

Groupe ICE	Espèces	Espèces sauteuses	Charge minimale sur l'obstacle (Hmin)	Valeurs seuils de chute pour le diagnostic de seuil à parement vertical >150% (m)				DH extrême
				Classe ICE				
				1	0,66	0,33	0	
4a	Truite de rivière ou truite de mer [25-55] (<i>Salmo trutta</i>)	Oui	0,10 m	≤ 0,50	[0,50 - 0,90]	[0,90 - 1,40]	> 1,40	2,00 m
4b	Truite de rivière [15-30] (<i>Salmo trutta</i>)		0,05 m	≤ 0,30	[0,30 - 0,50]	[0,50 - 0,80]	> 0,80	1,50 m

Figure 17. Critères élémentaires permettant de définir la franchissabilité de seuils verticaux ou quasi verticaux – Source : ICE, ONEMA

Résultats

Le tableau ci-dessous donne la synthèse des critères utiles à l'analyse de la franchissabilité piscicole par saut des seuils du canal latéral du moulin des Clercs ainsi que la note ICE obtenue à différents débits.

Tableau 5. Franchissabilité piscicole par saut des seuils du canal latéral du moulin des Clercs

Régime hydrologique		QMNA5	Module	Double module	QJ2
Seuil amont du canal latéral au droit de la vanne latérale aval					
Chute m		0.65	0.65	0.62	0.63
Profondeur de la fosse en pied de chute m		0.90	0.92	1.03	1.00
Truite de rivière ou truite de mer (25-55)	4a	0.66	0.66	0.66	0.66
Truite de rivière (15-30)	4b	0.33	0.33	0.33	0.33
Seuil aval du canal latéral au droit de la confluence avec le bras de décharge					
Chute m		0.60	0.61	0.68	0.67
Profondeur de la fosse aval m		0.05	0.06	0.08	0.07
Truite de rivière ou truite de mer (25-55)	4a	0	0	0	0
Truite de rivière (15-30)	4b	0	0	0	0

Le seuil en aval du canal latéral du moulin des Clercs se révèle être une barrière totale pour la libre circulation de la truite fario compte tenu des faibles profondeurs de fosse d'appel pour les régimes hydrologiques ordinaires. Les différents ouvrages transversaux sur la zone d'étude (à l'exception de la planche en bois en aval de la Marette) constituent des obstacles à impact majeur en toute saison pour la libre circulation de la truite fario. **La libre circulation est toutefois assurée sur le cours de la Marette** qui concentre la part de débit la plus importante ($\frac{3}{4}$ du débit total dérivé) et constitue le bras d'écoulement dominant et de plus fort attrait piscicole à l'échelle du complexe hydraulique. Le site d'étude, dans sa configuration et mode de gestion actuel des ouvrages, ne présente donc **pas de réelle rupture de la continuité écologique pour la truite fario**.

Synthèse des altérations et enjeux sur le site d'étude

Le schéma suivant constitue une synthèse des altérations et des enjeux sur le site d'étude :

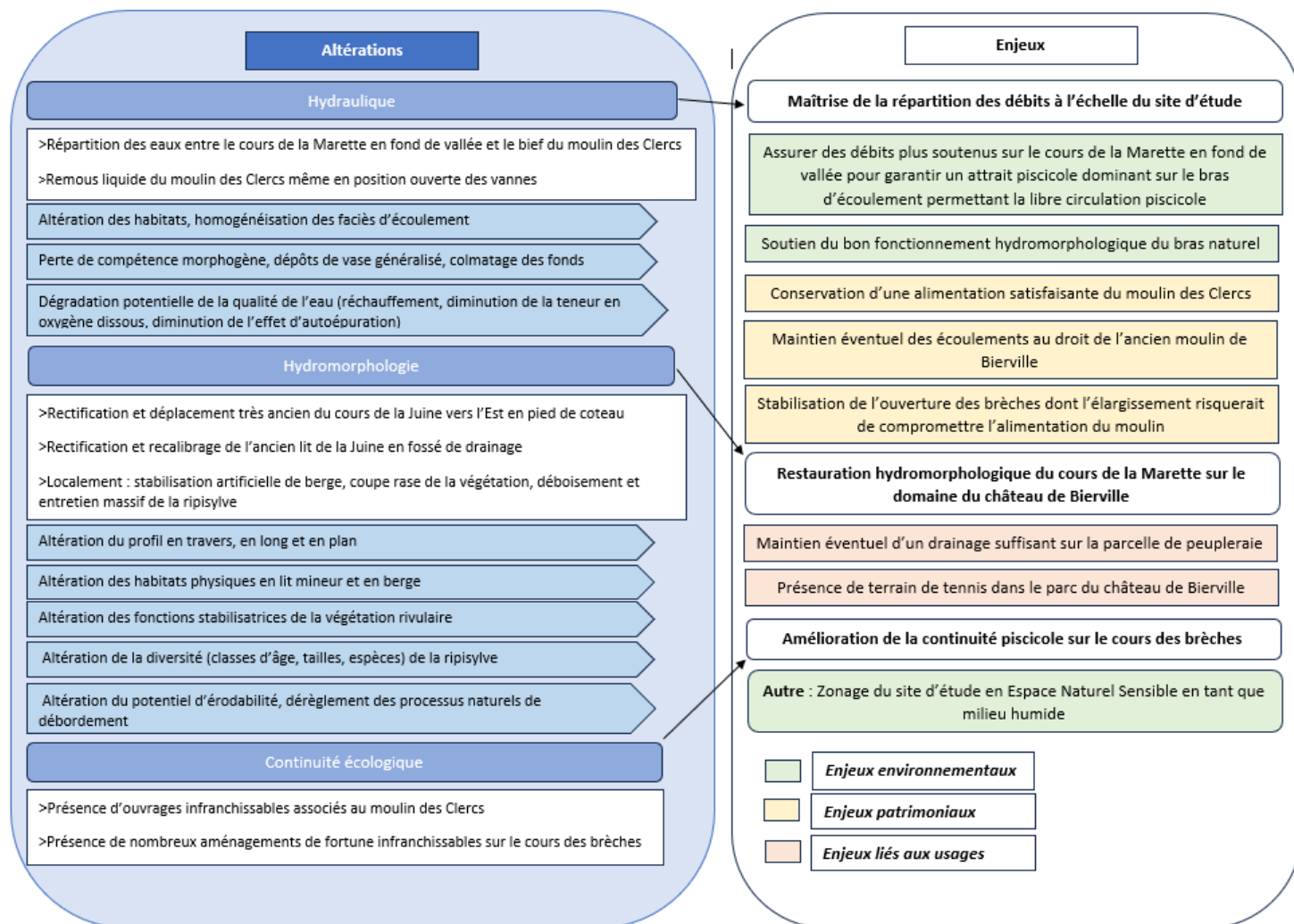


Figure 18. Schéma de synthèse des altérations et enjeux sur le site d'étude

Propositions de scénarios d'aménagement

L'analyse des résultats obtenus en phase d'état des lieux et diagnostic et la prise en considération des divers enjeux associés au site d'étude permet de proposer des scénarios d'aménagement pour répondre à la problématique de restauration de la continuité écologique et hydromorphologique.

Restauration hydromorphologique sur le site de l'ancien moulin de Bierville

Les scénarios d'aménagement proposés au droit du site de l'ancien moulin de Bierville sont illustrés en Annexe 14 et consistent à :

- **Restaurer un cours naturel de la Marette en fond de vallée** autour de l'axe de drainage actuel depuis la défluence avec le bief du moulin des Clercs et jusqu'à la confluence avec le bras actuel en fond de vallée, par réaménagement et diversification du profil en long et en travers. Le dimensionnement du nouveau bras se fera en cohérence avec la topographie du site et les grandeurs hydromorphologiques de référence pour un cours d'eau de taille équivalente dans l'EHR des Tables Calcaires.

- **Réaménager le système actuel de répartition des eaux** par un dispositif de type rampe d'enrochement franchissable et intégré au cours du nouveau bras de la Murette pour un partage de débit toujours plus soutenu sur le cours de la Murette en fond de vallée ($\approx 3/4$ du débit total) ;
- Maintenir l'alimentation de l'ancien moulin de Bierville par la création d'un nouveau bras secondaire de la Murette ou abandon avec remblaiement total du bief (gain écologique plus important associé au maintien des débits dans un bras unique permettant d'assurer une meilleure qualité et diversité des habitats) selon concertation avec les propriétaires.

Restauration de la continuité écologique au droit des brèches

Les scénarios proposés au droit des brèches afin d'éviter leur dérive dans le temps, de figer la part des débits dérivés et de permettre le franchissement piscicole visent à :

- **Remblayer la plus petite des brèches** afin de limiter les pertes de débits sur le bief et prévenir l'ouverture d'une nouvelle brèche par aménagement d'une tranchée comblée d'argile à quelques mètres en retrait de la berge en rive gauche du bief ;
- **Stabiliser la berge en rive gauche du bief** par terrassement (talutage de matériaux argileux d'apport) et techniques végétales (de type tressage de saule) ;
- **Reprofiler le fond de la seconde brèche et fractionner le dénivelé d'eau** au moyen de micro-seuils en bois afin de stabiliser l'ouverture et rétablir la continuité piscicole.

Le modèle hydraulique élaboré en phase de diagnostic sera modifié et mis en œuvre afin d'analyser et de confirmer la faisabilité hydraulique des scénarios d'aménagements et d'apprécier leurs impacts hydromorphologiques.

Discussion

Les paramètres déclassants pour l'atteinte du bon état chimique au sens de la DCE

L'état d'une masse d'eau de surface est déterminé par la plus mauvaise valeur de son état écologique et de son état chimique d'après la directive 2000/60/CE européenne cadre sur l'eau. Un « bon état » est donc atteint lorsque son état écologique et son état chimique sont au moins bons. La masse d'eau de « La Juine de sa source au confluent de la Chalouette inclus » présente en 2019 un état écologique moyen et un état chimique avec ubiquistes jugé mauvais. Les substances ubiquistes sont des composés chimiques émis par les activités humaines, bioaccumulables et toxiques, qui restent longtemps présents dans l'environnement aquatique (Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2018). Leur évaluation se fait notamment par mesure sur le support biote (crustacées, chairs de poissons) ou le support sédiment. La directive 2013/39/UE modifie la directive 2000/60/CE en autorisant les États membres « à présenter séparément l'incidence sur l'état chimique des substances qui se comportent comme des substances PBT ubiquistes, de façon à ne pas masquer l'amélioration de la qualité de l'eau obtenue en ce qui concerne les autres substances ». Ainsi, l'évaluation de l'état chimique ne retenant pas les substances pour lesquelles l'eau n'est pas un support pertinent (substances ubiquistes) sur « La Juine de sa source au confluent de la Chalouette inclus » conclue à un bon état chimique de la masse d'eau.

Les substances ubiquistes déclassantes pour l'état chimique en 2019 sont le Fluoranthène, le Benzo(a)pyrène, le Benzo(b)fluoranthène et le Benzo(g,h,i)perylène qui sont des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) dont les sources principales de contamination

sont les activités anthropiques telles que les réseaux routiers (Botta *et al.*, 2014). La réévaluation de la masse d'eau en 2022 conclue à une amélioration de la qualité chimique avec un état avec ubiquiste jugé bon. Cette amélioration peut être associée aux actions de réduction des émissions ou à la mise en place de mesures pour préserver la qualité des milieux aquatiques. Les pollutions en HAP présentent cependant une forte hétérogénéité liée aux différentes activités humaines et peuvent être locales, diffuses, chroniques, accidentelles ou résiduelles. Les transferts de pollution vers les rivières sont également fonction des concentrations dans l'atmosphère et dans les pluies et du lessivage des poussières accumulées sur les surfaces imperméabilisées (Botta *et al.*, 2014). L'hétérogénéité des sources de pollutions, la variabilité des taux de transferts dans le temps et les incertitudes liées à la toxicité des résidus issus de la dégradation des composés, justifient de la nécessité d'un suivi sur le long terme pour pouvoir réellement attester du bon état chimique d'une masse d'eau. L'enjeu de la pollution aux ubiquistes et l'identification des sources de pollution restent ainsi un enjeu majeur pour l'atteinte durable du bon état chimique sur le cours de la Juine amont.

Les paramètres déclassants pour l'atteinte du bon état écologique au sens de la DCE

L'article 4.1 de la directive 2000/60/CE européenne sur l'eau spécifie que « les États membres protègent, améliorent et restaurent toutes les masses d'eau de surface [...] afin de parvenir à un bon état des eaux de surface au plus tard quinze ans après la date d'entrée en vigueur de la présente directive » soit un délai initial fixé à 2015. L'article 4.4 précise que cet échéance peut être reportée aux fins d'une réalisation progressive des objectifs lorsque « toutes les améliorations nécessaires de l'état des masses d'eau ne peuvent raisonnablement être réalisées dans les délais indiqués pour au moins une des raisons suivantes: i) les améliorations nécessaires ne peuvent, pour des raisons de faisabilité technique, être réalisées qu'en plusieurs étapes excédant les délais indiqués; ii) l'achèvement des améliorations nécessaires dans les délais indiqués serait exagérément coûteux; iii) les conditions naturelles ne permettent pas de réaliser les améliorations de l'état des masses d'eau dans les délais prévus ».

La masse d'eau de « La Juine de sa source au confluent de la Chalouette » est concerné par une dérogation d'objectif moins strict de non-dégradation de l'élément nitrate pour 2027. Les nitrates diffus (NO_3^-) issus des fertilisants minéraux et organiques appliqués sur les surfaces agricoles du bassin versant (occupation du sol dominé à 99,6% par des terres agricoles sur le bassin versant de la Juine en limite amont du secteur d'étude), constituent en effet le paramètre déclassant de l'état physico-chimique en 2022. Les motifs de recours à la dérogation sont la faisabilité technique et les coûts disproportionnés. La Juine amont est aussi concernée par un report de délai fixé à 2033 pour l'atteinte du bon état chimique avec ubiquistes bien que l'état soit évalué comme « bon » en 2022. Les motifs de recours aux dérogations sont la faisabilité technique et les conditions naturelles. L'atteinte du bon état écologique sur le cours de la Juine amont repose ainsi sur des enjeux de qualité physico-chimique mais est aussi conditionné par des enjeux techniques et financiers.

L'annexe V de la directive 2000/60/CE européenne sur l'eau définit l'état écologique des différents éléments de qualité biologique pris en compte dans la classification des masses d'eau de surface. L'évaluation de la qualité biologique de la Juine amont en 2022 met en évidence un état biologique moyen avec pour paramètre déclassant, l'indice macro-invertébrés I2M2. Un état moyen pour la faune benthique est évalué selon l'Annexe V, lorsque « la composition et l'abondance des taxa d'invertébrés diffèrent modérément de celles des communautés caractéristiques et que d'importants groupes taxinomiques de la communauté caractéristique

font défaut. Le ratio des taxa sensibles aux perturbations par rapport aux taxa insensibles et le niveau de diversité des taxa d'invertébrés sont sensiblement inférieurs au niveau caractéristique et nettement inférieurs à ceux du bon état ».

La restauration écologique face enjeux et aux pressions à l'échelle du bassin versant

L'évaluation de « La Juine de sa source au confluent de la Chalouette inclus » en 2019 identifie l'hydromorphologie comme un paramètre de pression significative pour l'atteinte du bon état. Les indicateurs utilisés pour décrire ces pressions sont la densité linéaire d'ouvrages (0.95 ouvrages/km) et le taux d'étagement (31.39). En effet, le Référentiel des Obstacles à l'Écoulement fait état de 78 obstacles (seuils, pont, barrage, grille de pisciculture) sur le cours de la Juine de sa source au confluent de la Chalouette inclus. La mise en bief ancienne de la Juine de façon à permettre la formation d'une chute exploitable au droit des moulins a également conduit à un étagement important du cours d'eau. Les futurs travaux de restauration au droit du complexe hydraulique du moulin des Clercs viennent répondre localement à la problématique hydromorphologique dans la mesure où la maîtrise de la répartition des débits permettra d'assurer un attrait piscicole dominant sur le bras d'écoulement permettant en l'état la libre circulation et de soutenir le bon fonctionnement hydromorphologique du bras naturel.

L'étagement ancien du cours de la Juine associé au relèvement artificiel et permanent de la ligne d'eau par les ouvrages transversaux en rivière est associé au relèvement et à la stabilité du niveau d'eau de la nappe d'accompagnement. Ceci est favorable à la formation de retenues d'eau d'agrément ou à la pratique de certaines activités agricoles telle que la cressiculture. Cette pratique patrimoniale nécessite en effet une gestion précise des niveaux d'eaux pour limiter le risque de contamination par la douve du foie. Le maintien de l'alimentation en eau des biefs est ainsi essentiel pour répondre aux enjeux patrimoniaux de conservation des paysages associés aux moulins et de maintien de pratiques régionale emblématiques. L'annexe V de la directive 2000/60/CE définit un bon état hydromorphologique comme un état dans lequel les conditions hydromorphologiques permettent d'atteindre les valeurs de bon état pour les différents éléments de qualité biologique. Les résultats du diagnostic hydromorphologique sur le site d'étude ont montré une altération des habitats par homogénéisation des faciès d'écoulement et colmatage des substrats sur les linéaires influencés par le remous liquide des ouvrages associés au moulin des Clercs. La conservation de ces ouvrages (même en position ouverte des vannes) et l'envasement généralisé sur les linéaires influencés pourraient ainsi ne pas s'avérer compatibles avec l'atteinte du bon état biologique pour la faune benthique. De ce fait, le niveau d'ambition actuel des travaux de restauration conçus afin de concilier les enjeux environnementaux et patrimoniaux, ne semble pas permettre de réunir à l'heure actuelle, l'ensemble des conditions nécessaires à l'atteinte du bon écologique à l'échelle du site d'étude.

La présente étude de restauration de la continuité écologique et hydromorphologique sur le cours de la Juine au droit du moulin des Clercs s'inscrit dans le contexte plus global du bassin versant de la Juine de sa source au confluent de la Chalouette inclus. Le projet vient répondre à la problématique de la continuité écologique en améliorant les conditions de franchissabilité piscicole à l'échelle du site d'étude et en restaurant un attrait piscicole vers l'amont du bassin versant où les habitats sont plus favorables. Les travaux envisagés permettront de restaurer le cours naturel de la Marette en fond de vallée sur le site de l'ancien moulin de Bierville et de diversifier localement les habitats aquatiques. La réussite de ces travaux et plus généralement

l'atteinte du bon état de la masse d'eau au sens de la DCE, sont en partie conditionnés par des enjeux et des pressions qui dépassent cependant le cadre de cette étude. La phase d'état des lieux et diagnostic en maîtrise d'œuvre de travaux de restauration apparaît donc comme une étape primordiale pour la réussite d'un futur projet puisqu'elle permet d'assurer le dimensionnement d'aménagements présentant un niveau d'ambition et un gain écologique maximal au regard des enjeux patrimoniaux, économiques, techniques et financiers à l'échelle du bassin versant.

Conclusion

Les missions réalisées au sein du pôle « Rivières et Milieux Aquatiques » d'ISL, m'auront permis d'appliquer et de développer mes compétences en ingénierie des milieux aquatiques par la participation à une étude de restauration écologique concrète et ancrée dans les objectifs européens de protection des écosystèmes aquatiques et de la ressource en eau. Au travers des missions réalisées, j'ai intégré les enjeux associés aux différentes phases de la maîtrise d'œuvre et à l'activité d'un bureau d'étude, ce qui est venue conforter mon intérêt pour le métier d'ingénieur, en tant qu'un intermédiaire entre les domaines sociaux, scientifiques et techniques. Ce stage aura été une expérience professionnelle enrichissante au sein d'une société engagée dans les différents domaines d'ingénierie et pour les grands enjeux associés à une gestion intégrée des bassins versants et de la ressource en eau : prévention et protection contre les inondations, exploitation de la ressource en eau, production d'hydroélectricité, navigation et préservation des milieux aquatiques. Cette pluridisciplinarité des activités traduit à l'échelle de l'entreprise la nécessité d'une approche transversale dans la gestion des bassins versants et reflète les défis associés à une collaboration des différents acteurs de l'eau. Dans un contexte de réchauffement climatique, cette coopération est d'autant plus enrichissante qu'elle vient alimenter les réflexions sur les impacts sociaux et environnementaux des activités d'ingénierie et motiver l'innovation vers des méthodes et des pratiques d'aménagement plus responsables et durables.

Bibliographie

Adam, P. *et al.* (2007) Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau – Agence de l'eau Seine-Normandie.

Baudoin, J.M. *et al.* (2014) Evaluer le franchissement des obstacles par les poissons – Principes et méthodes – Onema, Université de Liège, Ecogea.

Botta, F. *et al.* (2014) Bilan des méthodes d'identification des sources applicables au domaine de l'eau et premier choix des profils caractéristiques appropriés - Onema, Ineris.

Le Coz, J. *et al.* (2011) Guide technique pour le contrôle des débits réglementaires - Onema, Cemagref.

Malavoi, J.R. *et al.* (2010) Elements d'hydromorphologie fluviale – Onema.

Rakotomahanina (2014) Plan Départemental pour la Protection des milieux aquatiques et la Gestion des milieux aquatiques - Fédération de l'Essonne pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique.

Wasson, J.G. *et al.* (2002) Définition des hydro-écorégions françaises métropolitaines. Approche régionale de la typologie des eaux courantes et éléments pour la définition des peuplements de référence d'invertébrés. Rapport. Irstea. Available at: <https://hal.inrae.fr/hal-02580774> (Consulté le 11 Août 2023).

Table des figures

Figure 1. Secteurs d'activités et type de gouvernance au sein de la société ISL Ingénierie.....	6
Figure 2. Ouvertures des brèches en rive gauche du bief du moulin des Clercs et aménagements de fortune	7
Figure 3. Carte de l'organisation du réseau hydrographique sur le site d'étude – Source : Plan IGN	7
Figure 4. Organisation du complexe hydraulique du moulin des Clercs.....	8
Figure 5. Identification du moulin des Clercs sur la carte de Cassini	8
Figure 6. Réseau hydrographique de la Juine – Source : SIARJA.....	10
Figure 7. Répartition de l'occupation du sol hors terres agricoles du bassin versant de la Juine en limite amont du site d'étude – Source : Corine Land Cover 2018	11
Figure 8. Comparaison du cadastre napoléonien de 1891 et avec la configuration actuelle du site d'étude – Sources : https://archives.essonne.fr/ ; https://www.geoportail.gouv.fr	13
Figure 9. Comparaison du cadastre napoléonien (1891) avec une photographie aérienne (1968) sur le domaine du château de Bierville – Sources : https://remonterletemps.ign.fr , https://archives.essonne.fr/	14
Figure 10. Caractérisation du substrat sur la zone d'étude.....	16
Figure 11.Exemple de profil en long, profil en travers et relevé d'ouvrage exploités pour la construction du modèle hydraulique - Source : HYDROTOPO	18
Figure 12. Vue en plan du complexe hydraulique du moulin des Clercs à partir de l'éditeur de géométrie HEC-RAS.	19
Figure 13. Illustration d'une étape de construction de la géométrie du lit mineur et des ouvrages à partir de l'éditeur de géométrie HEC-RAS (en rouge les paramètres de calage du modèle).....	19
Figure 14. Diagramme de Yanon-Shields.....	22
Figure 15. Illustration des différents types de jets et de paramètres à prendre en compte pour le franchissement de seuils (DH la hauteur de chute et Hf la profondeur de fosse) – Source : ICE, ONEMA.....	24
Figure 16. Capacités de nage et de saut de la truite de rivière – Source : ICE, ONEMA	24
Figure 17. Critères élémentaires permettant de définir la franchissabilité de seuils verticaux ou quasi verticaux – Source : ICE, ONEMA	24
Figure 18. Schéma de synthèse des altérations et enjeux sur le site d'étude	26

Table des tableaux

Tableau 1. Planning de déroulement du stage et des missions réalisées	9
---	---

Tableau 2. Résultats d'IPR aux stations de suivi situées en amont proche de la zone d'étude sur la période 2012-2022 – Sources : Fédération Départementale de Pêche de l'Essonne, https://naiades.eaufrance.fr/	12
Tableau 3. Principales grandeurs hydromorphologiques sur le site d'étude	14
Tableau 4. Comparaison des indicateurs morphologiques de référence dans l'HEC des Tables calcaires avec ceux observés sur le site d'étude	16
Tableau 5. Franchissabilité piscicole par saut des seuils du canal latéral du moulin des Clercs	25

Table des équations

Équation 1. Estimation du coefficient de Manning-Strickler par la formule de Cowan.....	20
Équation 2. Formule de Manning – Strickler.....	20
Équation 3. Critère de Shields.....	22

Annexes

Annexe 1 : Débits moyens mensuels et débits de référence statistiques estimés sur la Juine en amont de la zone d'étude	33
Annexe 2 : Vues d'ensemble reportant les principaux segments et ouvrages sur la zone d'étude - Source : BDORTHO IGN France.....	34
Annexe 3 : Profil en long du fond, des berges, de la ligne d'eau levée en janvier 2023 et de la largeur au miroir et à plein bord sur la Juine et la Marette en fond de vallée sur le secteur d'étude	35
Annexe 4 : Profil en long du fond, des berges, de la ligne d'eau levée en janvier 2023 et de la largeur au miroir et à plein bord sur le bief du Moulin des Clercs sur le secteur d'étude.....	36
Annexe 5 : Cartographie d'ensemble des observations relevées lors des prospections de terrain sur le bief de l'ancien moulin de Bierville	37
Annexe 6 : Photographies des principaux ouvrages sur le secteur d'étude	38
Annexe 7 : Etendue du modèle hydraulique 1D sur le secteur d'étude et positionnement des profils en travers et ouvrages intégrés au modèle	39
Annexe 8. Comparaison des lignes d'eau mesurées (17-18/01/2023 – Q : 1.583 m ³ /s) et modélisées sur le cours de la Juine.....	40
Annexe 9. Comparaison des lignes d'eau mesurées (17-18/01/2023 – Q : 1.583 m ³ /s) et modélisées sur le cours du bief du moulin des Clercs	41
Annexe 10 : Profil en long des lignes d'eau modélisées sur la Juine pour les régimes hydrologiques ordinaires et dans la configuration actuelle des ouvrages du complexe hydraulique du moulin des Clercs	42
Annexe 11 : Profil en long des lignes d'eau modélisées sur le bief du moulin des Clercs pour les régimes hydrologiques ordinaires et dans la configuration actuelle des ouvrages du complexe hydraulique du moulin des Clercs	43
Annexe 12 : Principales variables hydrauliques d'intérêt moyennes par segment sur le cours de la Juine et répartition des débits entre le bief du moulin des Clercs et la Marette en fond de vallée pour les régimes hydrologiques ordinaires	44

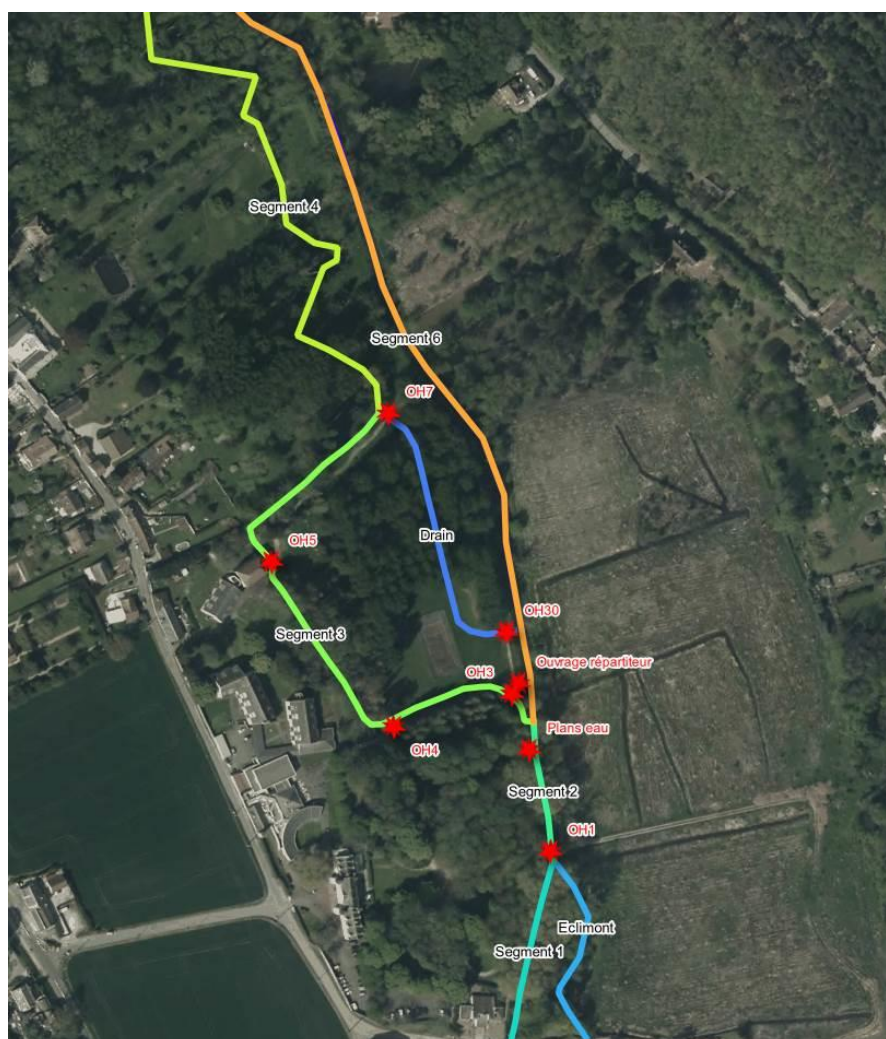
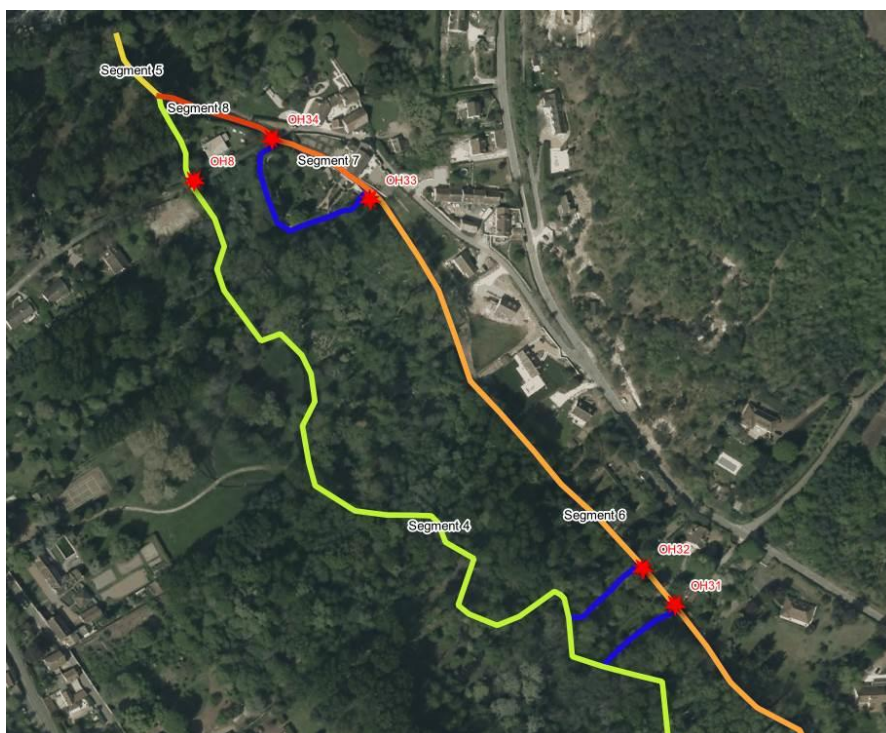
Annexe 13 : Principales variables hydrauliques d'intérêt moyennes par segment et hauteurs de chute au droit du moulin des Clercs pour les régimes hydrologiques ordinaires 45

Annexe 14 : Vue d'ensemble des aménagements envisagés pour le scénario proposé sur le site du château de Bierville (Source : IGN BD Ortho) 46

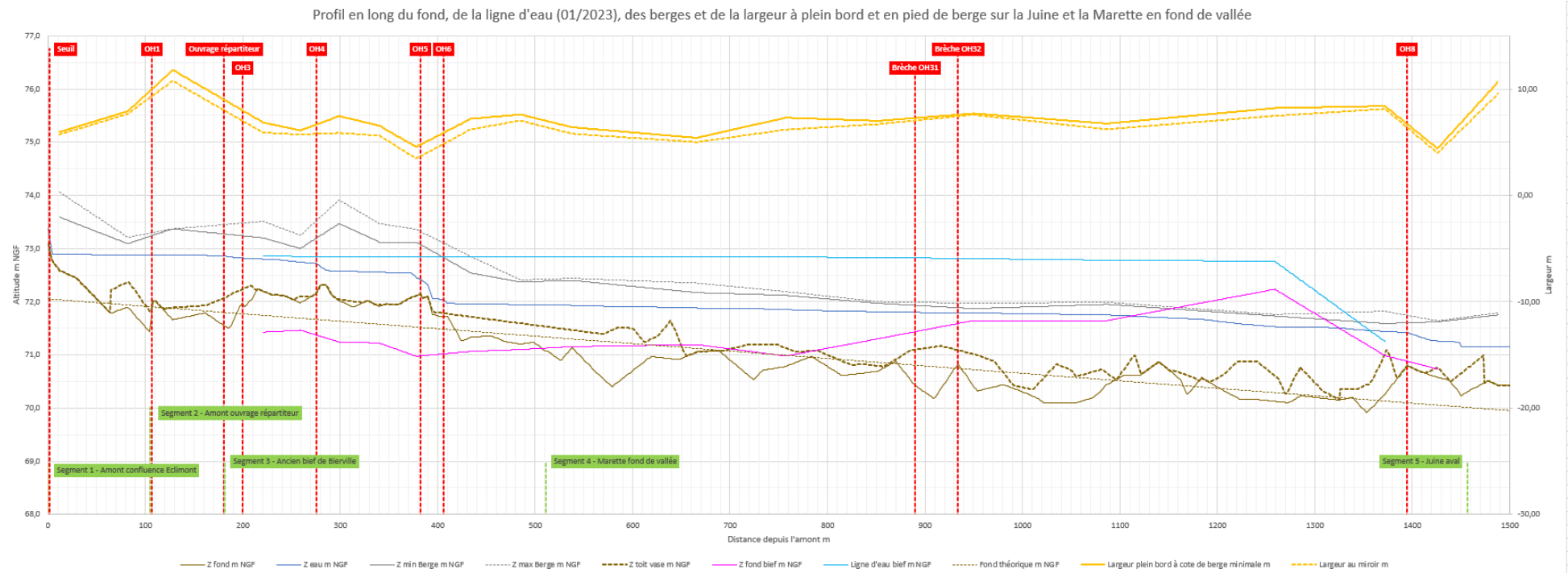
Annexe 1 : Débits moyens mensuels et débits de référence statistiques estimés sur la Juine en amont de la zone d'étude

	Sites		La Juine à Saclas	La Juine en limite amont du secteur d'étude (intégrant l'Eclimont)
	Régime hydrologique	Fréquences de non dépassement %	Surface bassin versant km ²	Surface bassin versant km ²
			257	396
Débits de référence m ³ /s	QMNA5	5%	0.91	1.27
	DMR	< 1%	0.12	0.17
	Q Médian	55%	1.16	1.62
	Module	52%	1.15	1.61
	QJ2	1 chance sur 2 par an	1.96	2.77
	QJ5	1 chance sur 5 par an	2.57	3.63
	QJ10	1 chance sur 10 par an	2.98	4.21
Débits moyens mensuels m ³ /s	Janv.	60%	1.18	1.65
	Fév.	62%	1.19	1.67
	Mars	70%	1.22	1.70
	Avr.	52%	1.15	1.61
	Mai	67%	1.21	1.69
	Juin	65%	1.2	1.68
	Juil.	26%	1.04	1.46
	Août	20%	1.01	1.41
	Sept.	22%	1.02	1.43
	Oct.	35%	1.08	1.51
	Nov.	70%	1.22	1.71
	Déc.	72%	1.23	1.72

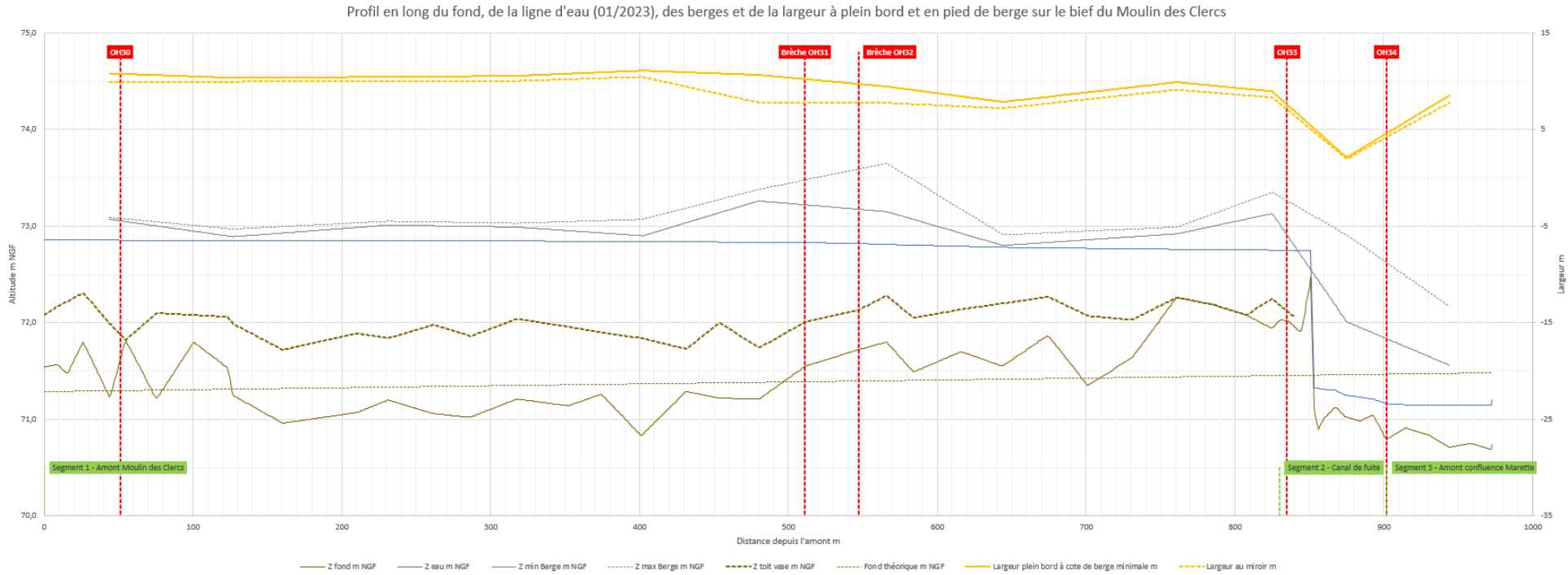
Annexe 2 : Vues d'ensemble reportant les principaux segments et ouvrages sur la zone d'étude -
Source : BDORTHO IGN France



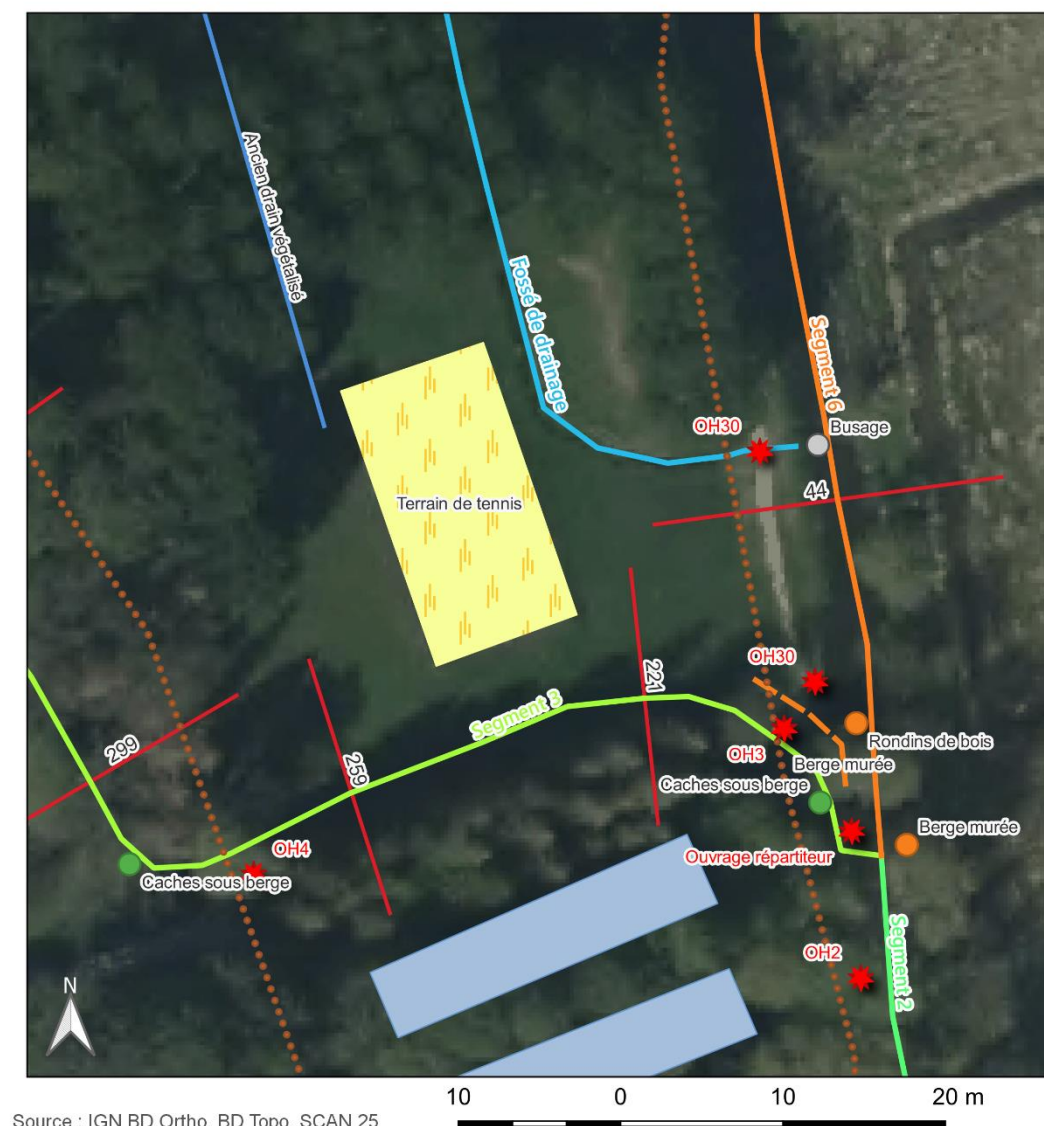
Annexe 3 : Profil en long du fond, des berges, de la ligne d'eau levée en janvier 2023 et de la largeur au miroir et à plein bord sur la Juine et la Marette en fond de vallée sur le secteur d'étude



Annexe 4 : Profil en long du fond, des berges, de la ligne d'eau levée en janvier 2023 et de la largeur au miroir et à plein bord sur le bief du Moulin des Clercs sur le secteur d'étude



Annexe 5 : Cartographie d'ensemble des observations relevées lors des prospections de terrain sur le bief de l'ancien moulin de Bierville

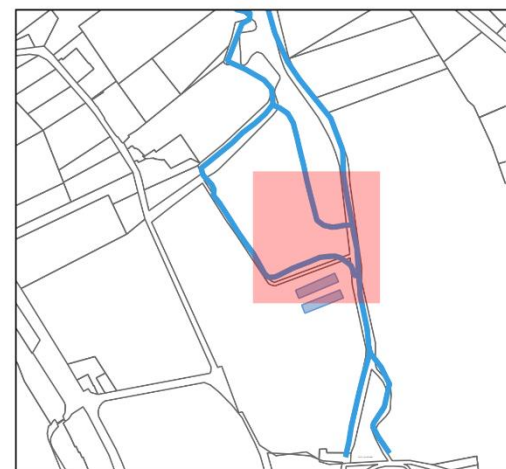


Source : IGN BD Ortho, BD Topo, SCAN 25

ÉTUDE POUR LA RESTAURATION DE LA CONTINUITÉ
ÉCOLOGIQUE DE LA JUINE AU DROIT DE L'ANCIEN MOULIN
DES CLERCS



- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| ● Aménagement | ■ Passerelle |
| ● Bassin | ■ Plan d'eau |
| ● Buse | ■ Installation |
| ● Habitat | ●●● Chemin |
| ● Protection de berge | — Protection de berge |
| ◆ Erosion | — Fossé de drainage |
| ★ Ouvrage | — Profil |



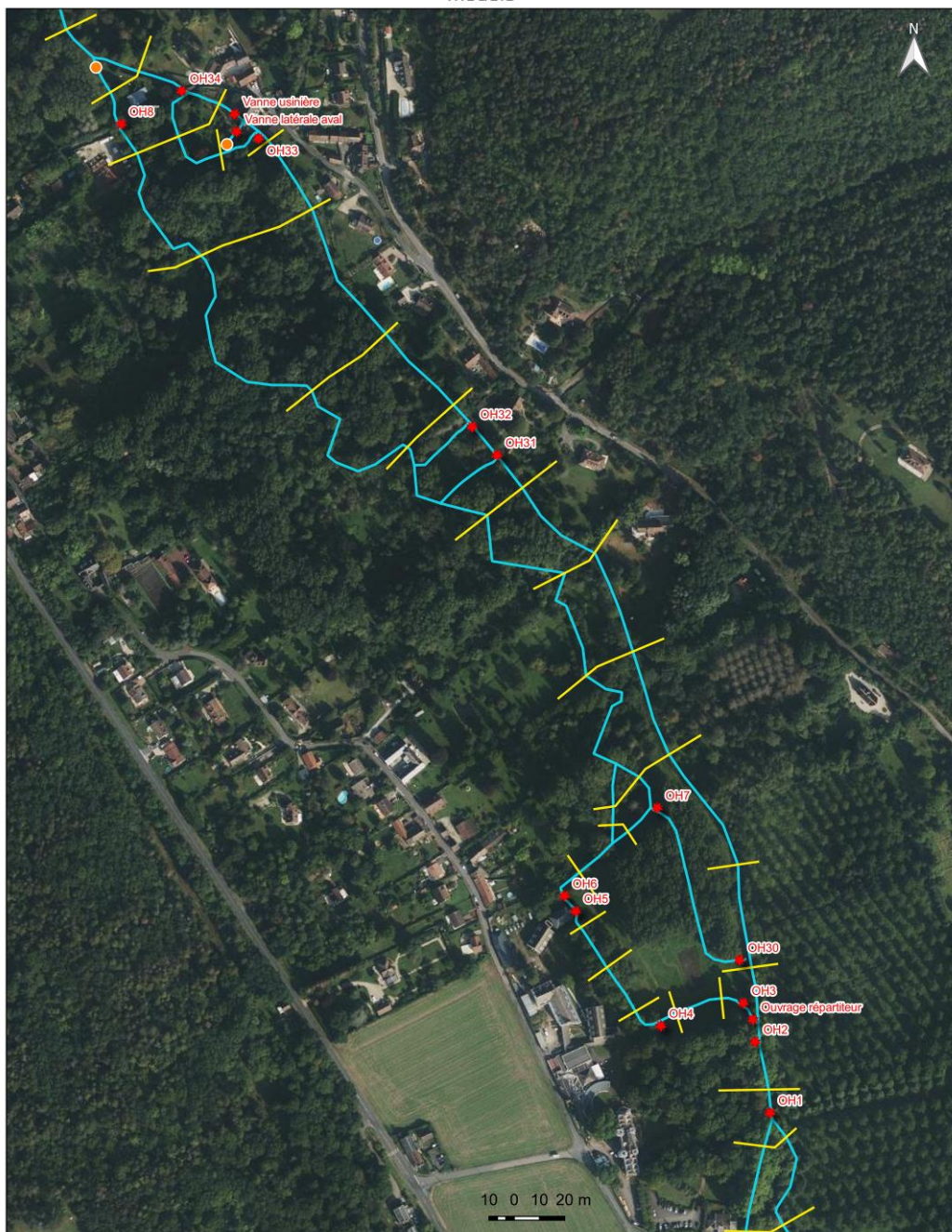
Annexe 6 : Photographies des principaux ouvrages sur le secteur d'étude

Ouvrage répartiteur – Vue aval → amont	Vanne de décharge amont légèrement entrouverte
	
Seuil S1 au droit de la façade Ouest du moulin, dans le prolongement de la vanne de décharge aval	Seuil S2 à l'exutoire du petit bras de décharge dans le bras de décharge principal
	
Seuil et chute infranchissable au droit du canal usinier du moulin des Clercs	Vue du vestige de mur de séparation des anciens canaux usiniers et de décharge de Bierville, mur de soutènement maçonné en bon état de conservation
	

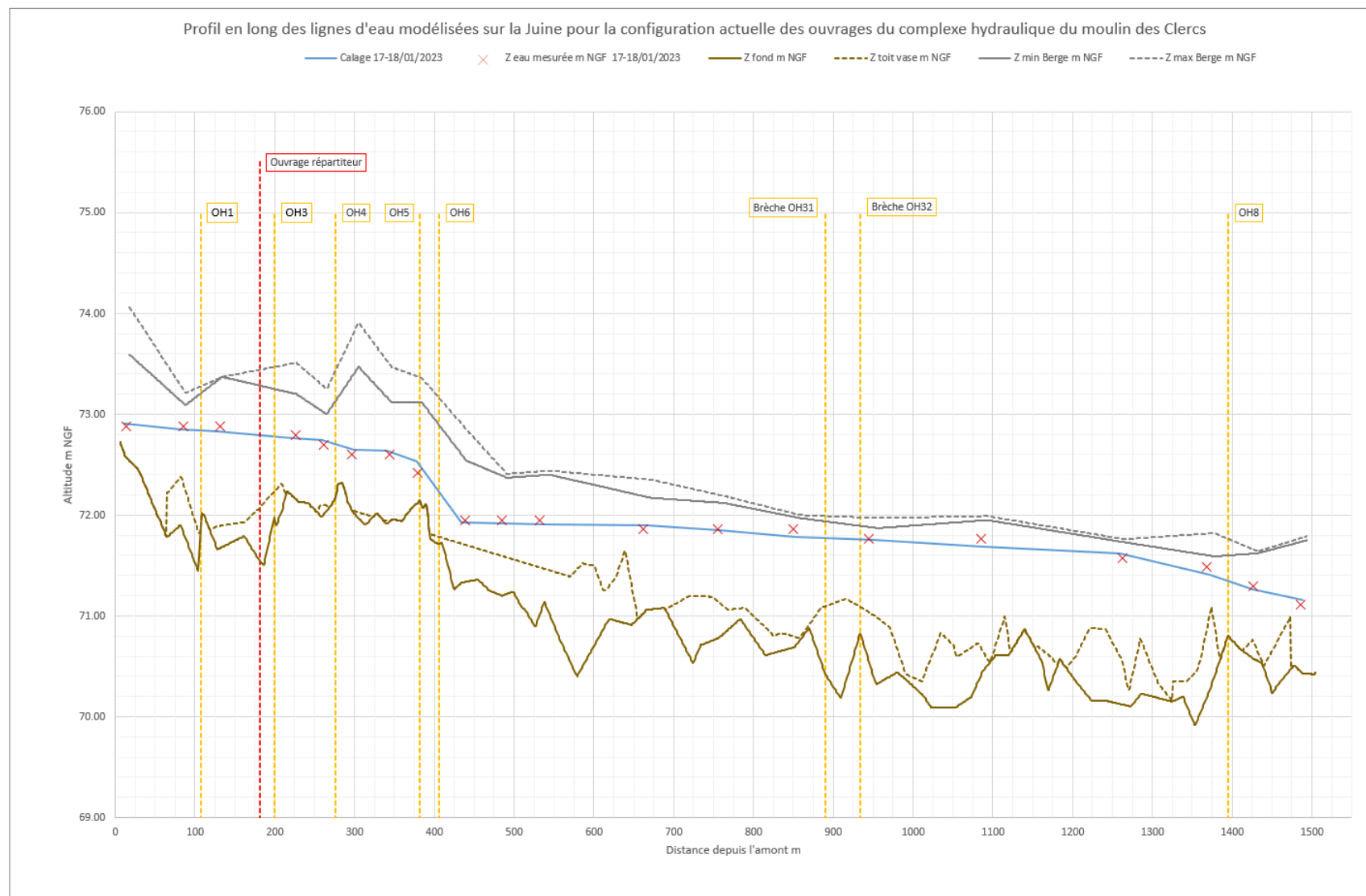
Annexe 7 : Etendue du modèle hydraulique 1D sur le secteur d'étude et positionnement des profils en travers et ouvrages intégrés au modèle

ÉTUDE POUR LA RESTAURATION DE LA CONTINUITÉ ÉCOLOGIQUE DE LA JUINE AU DROIT DE L'ANCIEN MOULIN DES CLERCS

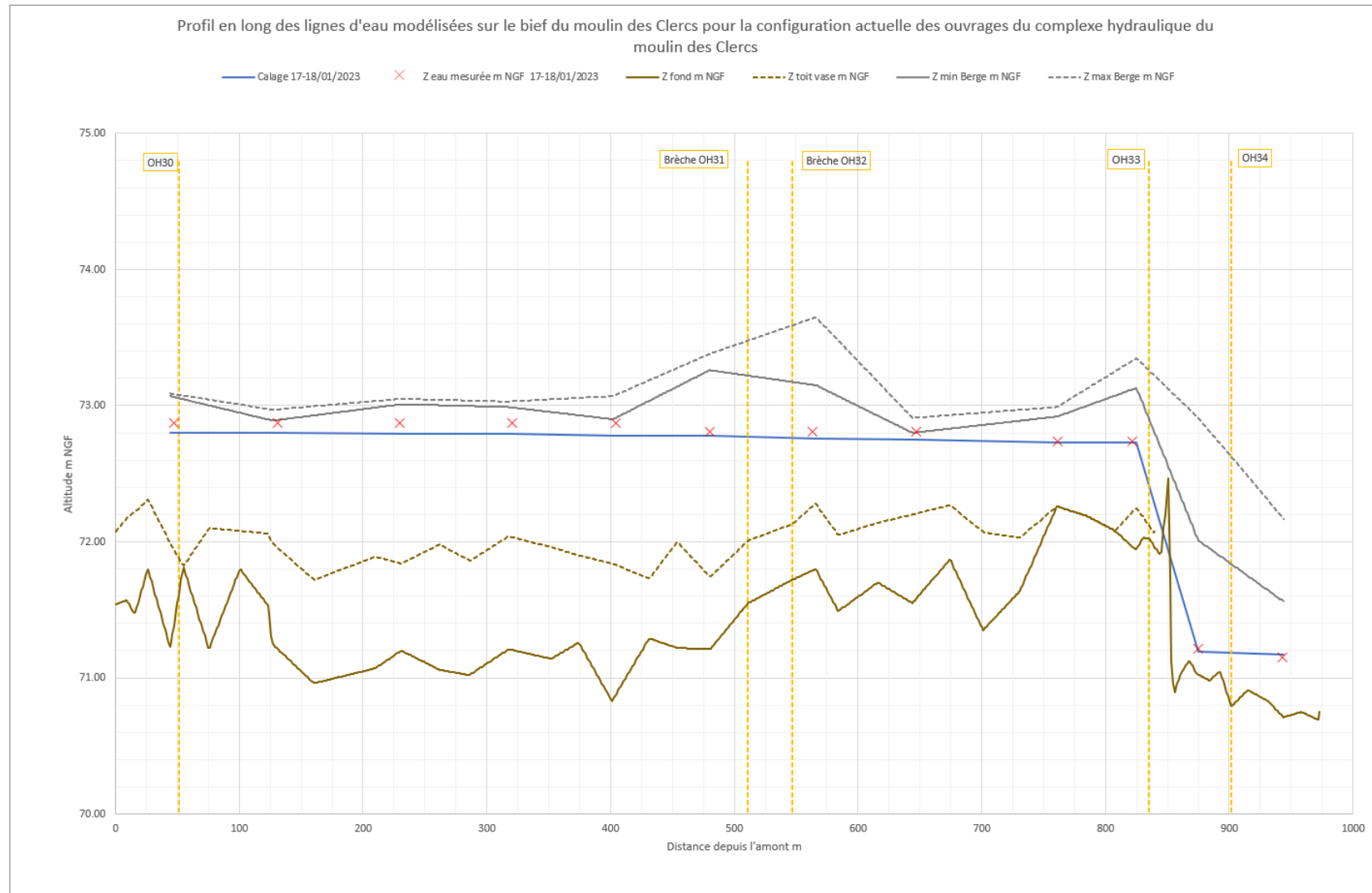
Étendue du modèle hydraulique 1D et positionnement des profils en travers et ouvrages intégrés au modèle



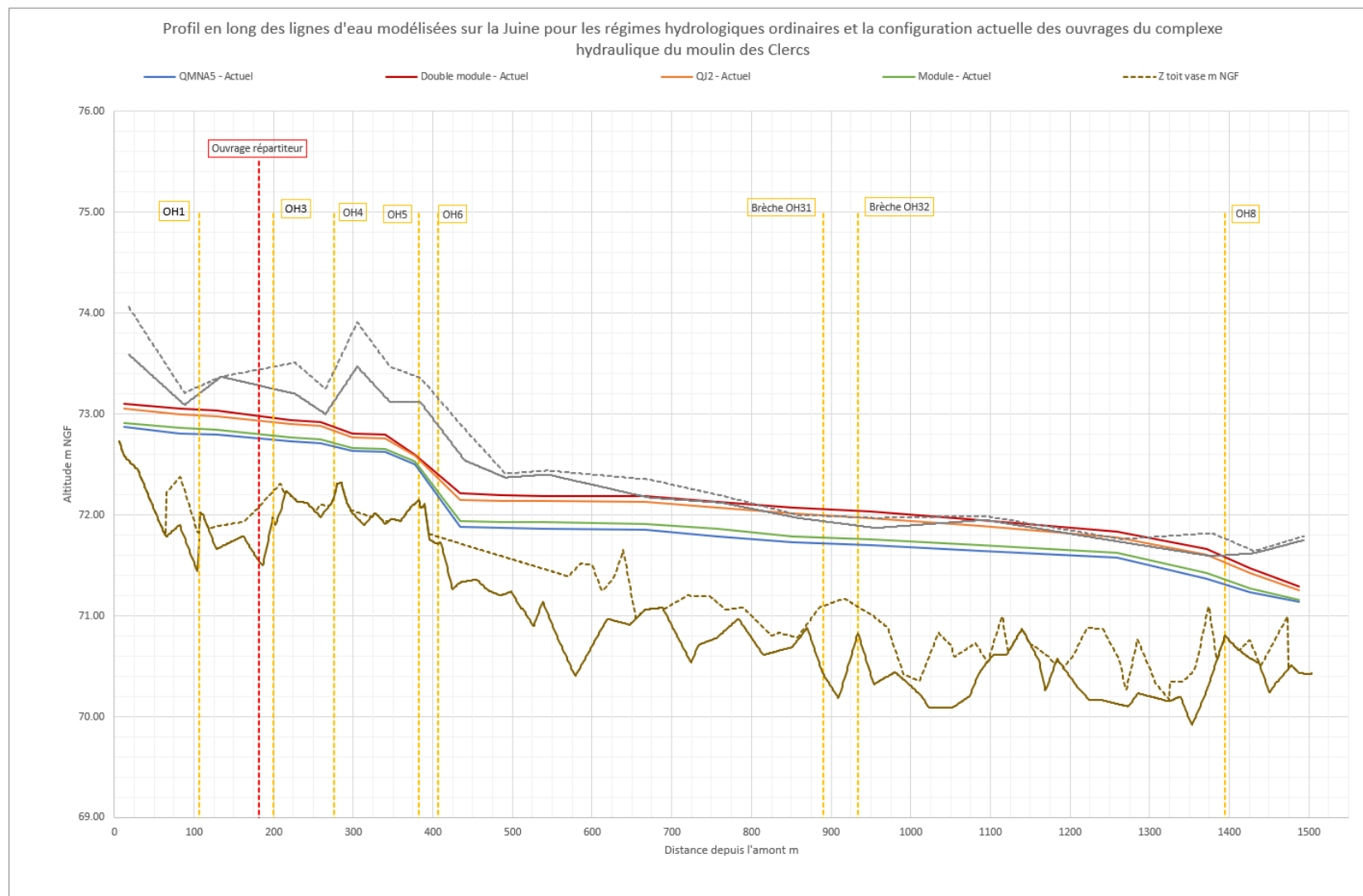
Annexe 8. Comparaison des lignes d'eau mesurées (17-18/01/2023 – Q : 1.583 m³/s) et modélisées sur le cours de la Juine



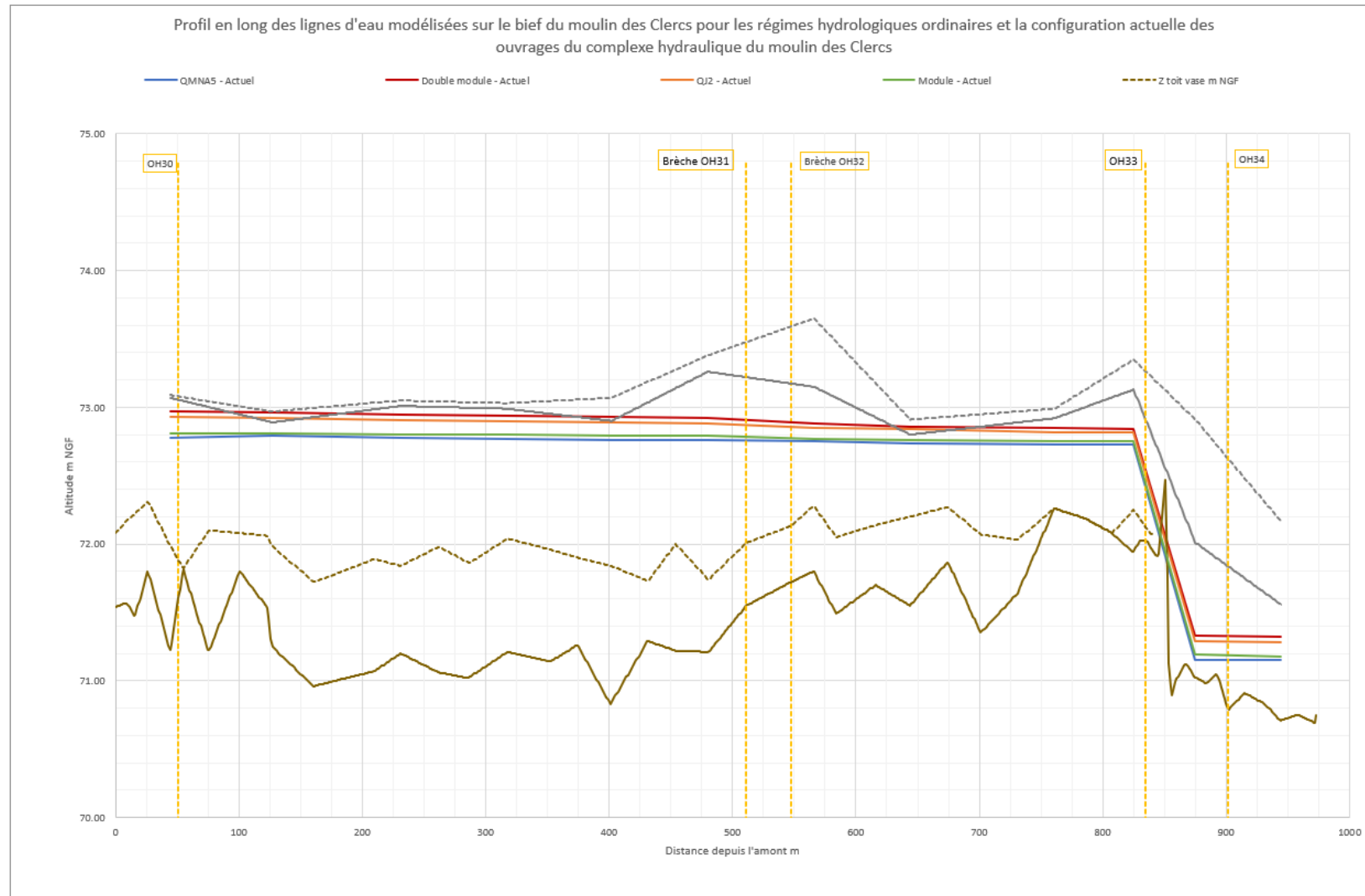
Annexe 9. Comparaison des lignes d'eau mesurées (17-18/01/2023 – Q : 1.583 m3/s) et modélisées sur le cours du bief du moulin des Clercs



Annexe 10 : Profil en long des lignes d'eau modélisées sur la Juine pour les régimes hydrologiques ordinaires et dans la configuration actuelle des ouvrages du complexe hydraulique du moulin des Clercs



Annexe 11 : Profil en long des lignes d'eau modélisées sur le bief du moulin des Clercs pour les régimes hydrologiques ordinaires et dans la configuration actuelle des ouvrages du complexe hydraulique du moulin des Clercs



Annexe 12 : Principales variables hydrauliques d'intérêt moyennes par segment sur le cours de la Juine et répartition des débits entre le bief du moulin des Clercs et la Marette en fond de vallée pour les régimes hydrologiques ordinaires

Régime hydrologique	QMNA5		Module		Double module		QJ2	
Tronçon	Hauteur d'eau moyenne / tronçon m	Vitesse moyenne / tronçon m/s	Hauteur d'eau moyenne / tronçon m	Vitesse moyenne / tronçon m/s	Hauteur d'eau moyenne / tronçon m	Vitesse moyenne / tronçon m/s	Hauteur d'eau moyenne / tronçon m	Vitesse moyenne / tronçon m/s
Segment 1 - Amont confluence Eclimont	0.44	0.17	0.48	0.18	0.67	0.23	0.63	0.22
Segment 2 – Amont ouvrage répartiteur	0.91	0.20	0.95	0.24	1.14	0.37	1.09	0.34
Segment 3 – Bief de l'ancien moulin de Bierville	0.58	0.35	0.62	0.35	0.80	0.46	0.75	0.42
Segment 4 – Marette	0.80	0.26	0.85	0.28	1.10	0.36	1.05	0.34
Segment 5 – Juine aval	0.71	0.24	0.73	0.28	0.86	0.46	0.82	0.42

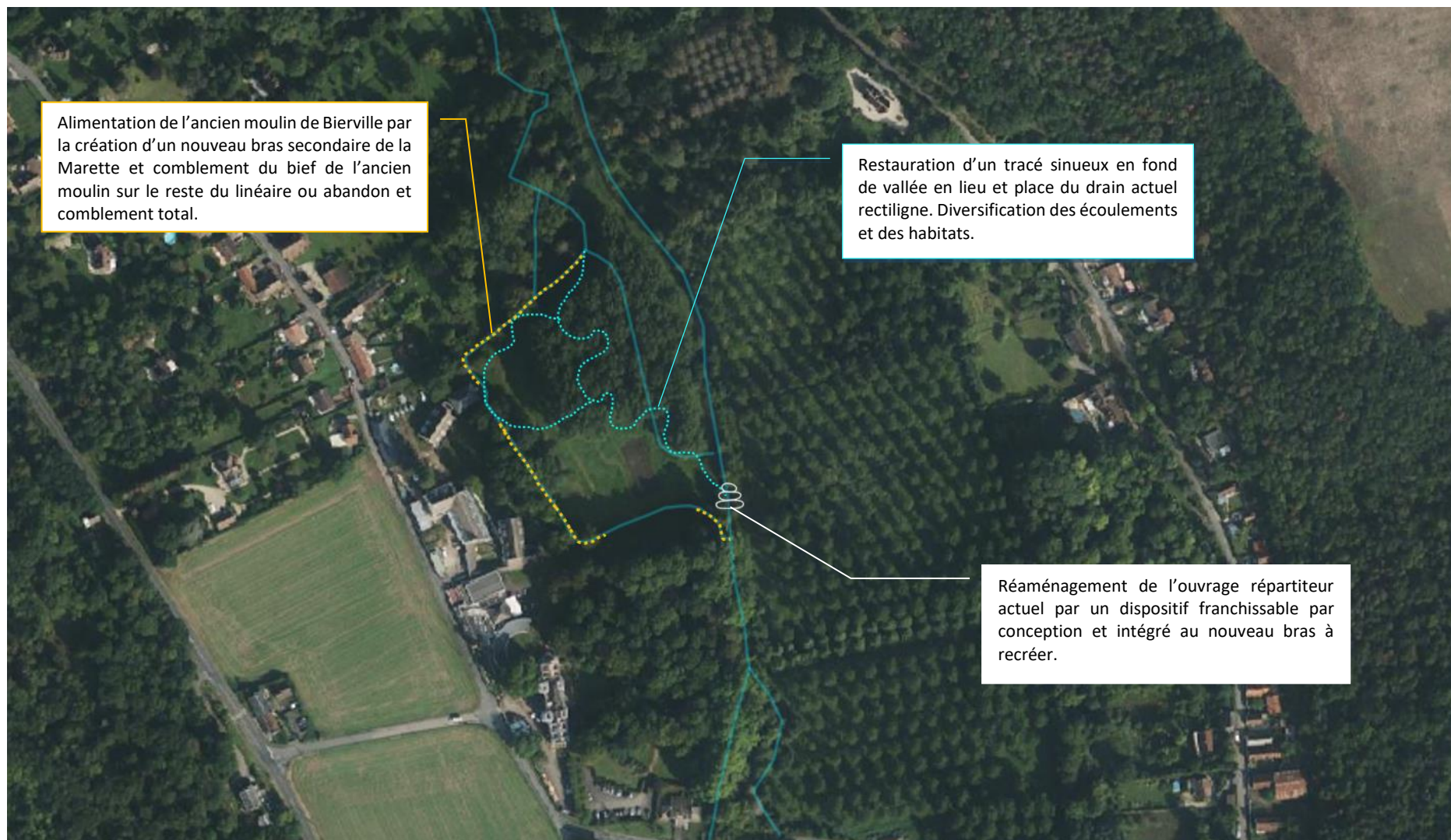
Régime hydrologique	QMNA5	Module	Double module	QJ2
Débit total en aval du modèle m³/s	1.35	1.66	3.27	2.82
Débit dérivé par la Marette en fond de vallée (amont confluence bief) - m³/s	0.99	1.21	2.42	2.07
Débit dérivé par la Marette en fond de vallée (amont confluence bief) - % débit total	73 %	73 %	74 %	73 %
Débit dérivé par le bief du moulin des Clercs - m³/s	0.36	0.45	0.85	0.75
Débit dérivé par le bief du moulin des Clercs - % débit total	27 %	27 %	26 %	27 %

Annexe 13 : Principales variables hydrauliques d'intérêt moyennes par segment et hauteurs de chute au droit du moulin des Clercs pour les régimes hydrologiques ordinaires

Régime hydrologique	QMNA5		Module		Double module		Plein Bord (premiers débordements)	
Tronçon	Hauteur d'eau moyenne / tronçon m	Vitesse moyenne / tronçon m/s	Hauteur d'eau moyenne / tronçon m	Vitesse moyenne / tronçon m/s	Hauteur d'eau moyenne / tronçon m	Vitesse moyenne / tronçon m/s	Hauteur d'eau moyenne / tronçon m	Vitesse moyenne / tronçon m/s
Segment 6 – Le bief du moulin des Clercs	0.82	0.13	0.85	0.15	0.98	0.22	0.94	0.20
Segment 7 – Canal de fuite du moulin des Clercs	0.12	0.13	0.16	0.25	0.30	0.44	0.26	0.42
Segment 8 – Canal de fuite en aval de la confluence avec le bras de décharge du moulin des Clercs	0.44	0.12	0.47	0.14	0.61	0.20	0.57	0.19

Régime hydrologique	QMNA5	Module	Double module	Plein Bord (premiers débordements)
Débit total m ³ /s	1.27	1.61	3.22	2.77
Z eau amont moulin des Clercs m NGF	72.73	72.75	72.84	72.82
Z eau aval moulin des Clercs m NGF	71.75	71.19	71.33	71.29
Chute – moulin des Clercs - m	0.98	1.56	1.51	1.53

Annexe 14 : Vue d'ensemble des aménagements envisagés pour le scénario proposé sur le site du château de Bierville (Source : IGN BD Ortho)





POLYTECH
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Amélie Lett
2022-2023

Étude de la restauration de la continuité écologique sur le cours de la Juine : le complexe hydraulique du moulin des Clercs

Résumé : This internship project is a part of a broader study on the ecological restoration of the Juine river, a tributary of the Seine river in France. The aim of the study is to assess the hydromorphological features of the river and to identify the ecological impacts of the Clercs mill's weir on the river's continuity. The results indicate widespread degradation of aquatic habitats due to the division of waterflow into several arms and the artificial raising of the water line. The aim of the future restoration project is therefore to control the distribution of waterflows throughout the study site in order to ensure that the restored arm remains attractive to fish and functions correctly from a hydromorphological standpoint. Finally, the study highlights the importance of the initial assessment for the success of the future restoration project, since it enables us to ensure the maximum ecological gain while taking into account heritage, economic, technical and financial issues at stake.

Mots Clés : continuité écologique, hydromorphologie, renaturation de cours d'eau, hydraulique

ISL Ingénierie :
75 boulevard Mac Donald 75019 Paris

Tuteur entreprise :
Jean-Loïc Douard
Responsable d'activité Rivières et milieux aquatiques

Tuteur académique :
Michel Bacchi