

1. INTRODUCTION

1.1. OBJET DU PRESENT RAPPORT

L'association «Les Gardiens de la Boissellerie» est propriétaire du musée de la Boissellerie. Cet ensemble de bâtiments est situé au centre du village de Bois d'Amont et enjambe la rivière l'Orbe. Constitué de trois volumes, la scierie, le moulin et l'ancienne maison, le musée a été construit sur les ruines de la scierie incendiée en 1957. A partir de 1987, les bénévoles de l'association ont entrepris la reconstruction du moulin et de la scierie en ossature bois. L'ancienne maison en pierre, épargnée par le feu, a été restaurée en grande partie dans les années 1990.

Le musée retrace les activités liées aux métiers du bois au cours des siècles passés. Il compte 16 000 entrées par an.

Sur le site de la Boissellerie se trouve un seuil créant une chute d'eau de 2 m de hauteur.

L'association des Gardiens de la Boissellerie souhaitant utiliser la force de l'eau, a fait réaliser en 2018 une étude de faisabilité de l'équipement hydroélectrique du seuil par une turbine, soit pour un usage d'autoconsommation (éclairage, chauffage), soit pour une vente de l'électricité produite avec injection sur le réseau électrique.

L'étude de faisabilité a permis d'esquisser le projet suivant :

- Implantation d'une ou de deux petites turbines sans réglage dans la chambre d'eau de la turbine Fontaine en place, et à conserver,
- Auto-consommation de l'électricité produite. L'autoconsommation améliore la viabilité du projet à deux égards :
 - le projet est ainsi éligible à une subvention de la Région Bourgogne-Franche Comté,
 - l'électricité est valorisée à hauteur du prix de l'électricité consenti par un consommateur particulier (soit à environ 149 €/MWh pour un particulier en 2018), soit au-dessus du prix de l'électricité dans le cadre d'un contrat d'obligation d'achat.

Le présent rapport constitue l'Avant-Projet Détaillé du projet. Il n'a pas vocation à reprendre l'étude de faisabilité. Il la complète.

L'Avant-Projet Détaillé approfondit notamment les points suivants :

- Consolidation de la loi d'effacement de la chute, sur la base de relevés sur site
- Optimisation du débit d'équipement de la centrale hydroélectrique, au regard du coût de la fourniture et de la valorisation de l'électricité produite
- Reconstitution du profil temporel de consommation du musée de la Boissellerie
- Reconstitution du profil temporel de production, pour une analyse fine du potentiel d'auto-consommation
- Comparaison des pistes de valorisation de l'électricité produite
- Description du projet
- Etablissement d'une vue en plan et d'une vue en coupe de la chambre d'eau
- Estimation du montant des travaux, sur la base d'avant-métrés et de la consultation de fournisseurs et d'entreprises de travaux.

1.2. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DU SITE ET SITUATION ADMINISTRATIVE

Le musée de la Boissellerie se situe au 12 rue du Petit Pont, sur la commune de Bois d'Amont (39220), dans le département du Jura, en région Bourgogne Franche-Comté.

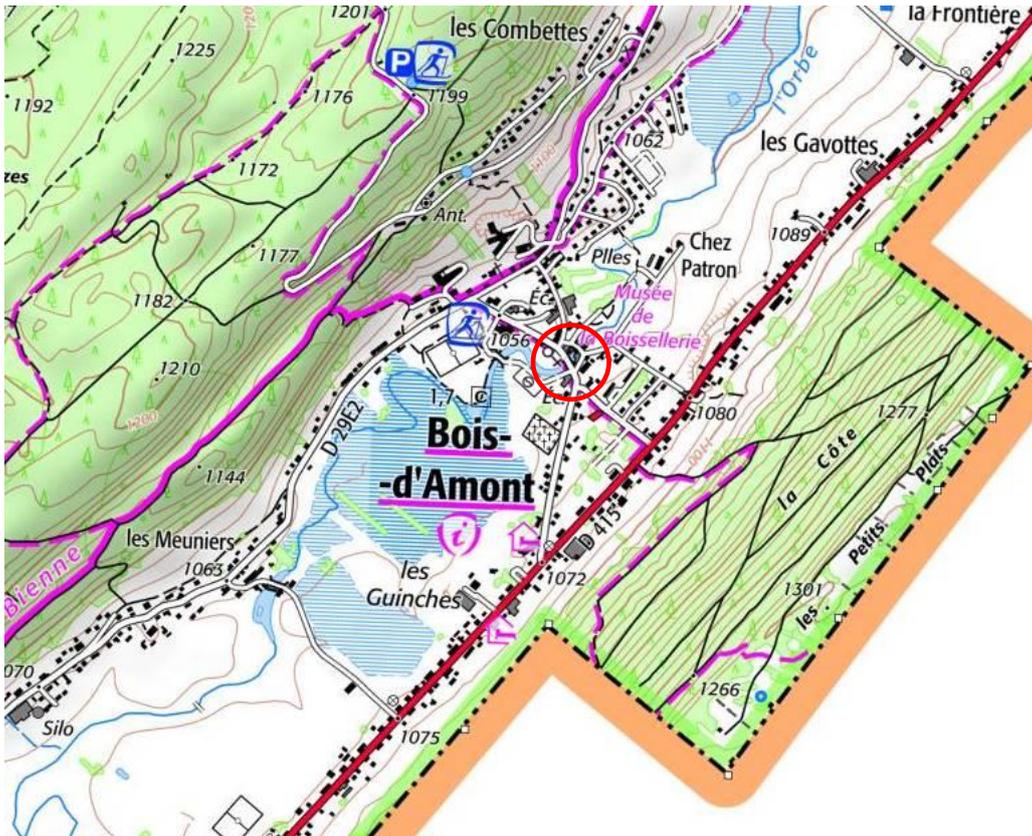


Figure 1 : Localisation de l'aménagement (Source : Géoportail)

L'Orbe à Bois d'Amont n'est classé ni en liste 1, ni en liste 2 au titre de l'article L214-17 du Code de l'Environnement (cf. arrêtés du 19 juillet 2013).

Le site, référencé sur la carte de Cassini, dispose d'un Droit d'eau Fondé en Titre.

1.3. PRESENTATION DU PROJET

Le projet exploite la présence d'un seuil créant une chute de 2 m de hauteur, sur l'Orbe dans le centre-bourg de Bois d'Amont. Il consiste à réutiliser les ouvrages hydrauliques existants :

- Le seuil,
- La prise d'eau de 200 cm de largeur, actuellement protégée par une grille fixée en applique sur la façade du bâtiment,
- Le canal d'amenée à la chambre d'eau,
- La chambre d'eau bétonnée d'une turbine Fontaine,
- Le canal de fuite.

Il s'agit d'installer dans la chambre d'eau un groupe turbo-générateur compact non réglable de débit d'équipement unitaire 220 l/s, et de connecter ce groupe au réseau de distribution électrique.

La centrale hydroélectrique, de puissance installée 2,75 kW, fonctionne au fil de l'eau.

L'aménagement ne crée pas de tronçon court-circuité.

Il n'induit aucun impact paysager ni aucun impact sur le passage des crues.

L'électricité produite est auto-consommée, en priorité pour des usages électriques spécifiques, puis pour chauffer l'eau d'un ballon tampon en substitution de la consommation de gaz pour le chauffage des bâtiments.

La configuration générale de l'aménagement est présentée sur les photos en Figure 2.

Ses caractéristiques techniques et économiques principales sont récapitulées dans le Tableau 1.



Figure 2 : Configuration générale de l'aménagement existant

Débit réservé :	0.0 %Qmoy
Module interannuel du cours d'eau :	0.640 m3/s
Débit d'équipement :	0.220 m3/s
Chute brute maximum :	2.0 m
Puissance maximum brute (PMB) :	4.4 kW
Puissance installée :	2.75 kW
Productible moyen estimé :	10.5 MWh/an
Productible hiver moyen estimé :	6.3 MWh/an
Productible été moyen estimé :	4.2 MWh/an
Equivalent CO2 économisé :	10 tCO2/an
Consommation élec. équivalente :	3 foyers
Coefficient de charge :	3 678 h/an
Rendement moyen global :	59%
Montant de l'investissement:	52 000 €HT
Estimation du montant des subventions max:	24 550 €HT
Valorisation annuelle de l'électricité produite:	1 165 €/an
Temps de retour brut après subvention:	23.6 ans

Tableau 1 : Caractéristiques techniques et économiques principales du projet

2. DONNEES D'ENTREE

2.1. DONNEES HYDROLOGIQUES

L'Orbe est équipé de stations hydrométriques à proximité du site du projet :

- Station n° V2409010 située à l'amont du projet, aux Rousses, en service depuis 1969, gérée par la DREAL. Le bassin versant de cette station est de 19 km².
- Station n°2371 « Orbe – Le Chenit, Frontière » située à l'aval du projet, en Suisse, en service depuis 1971, gérée par l'Office Fédéral de l'Environnement. Le bassin versant de cette station est de 45.9 km².

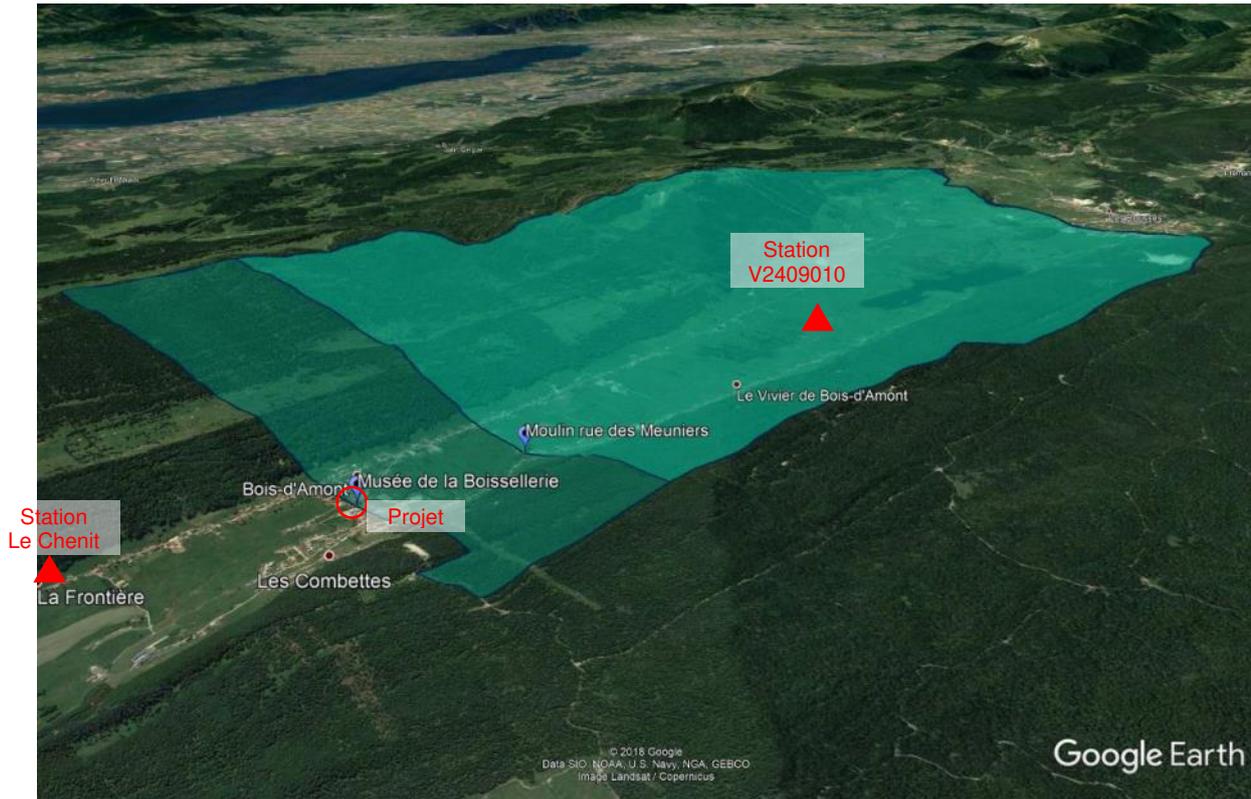


Figure 3: Localisation des stations hydrométriques les plus proches du site de projet et bassin versant de l'Orbe au droit du musée de la Boissellerie

La surface du bassin versant de l'Orbe au droit du musée de la Boissellerie s'élève à 34 km².

La comparaison des courbes des débits spécifiques classés de l'Orbe au droit de la station des Rousses et au droit de la station du Chenit (Figure 4) met en évidence des débits spécifiques très différents bien que les deux stations hydrométriques soient proches géographiquement.

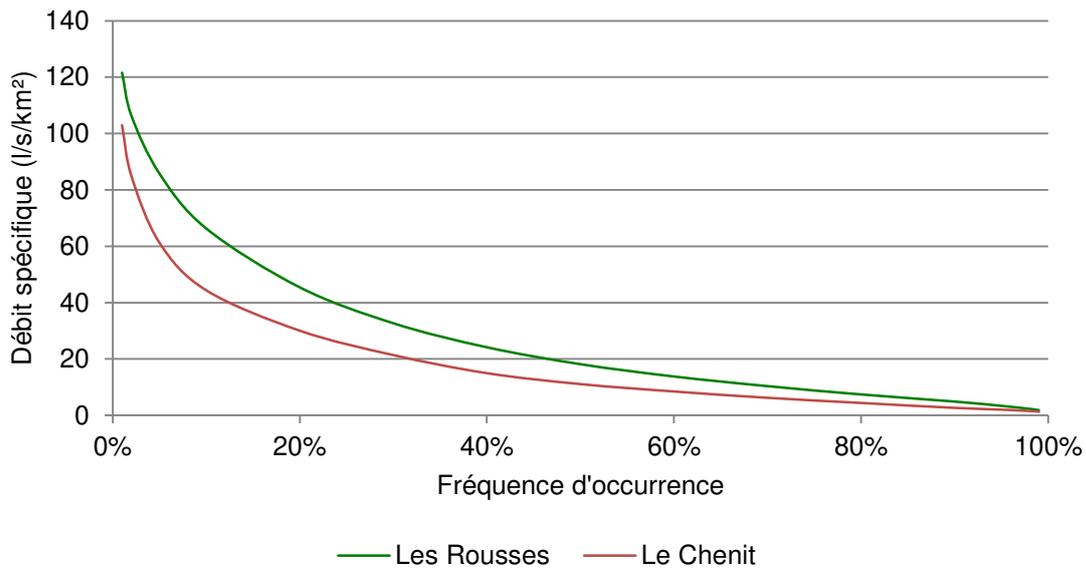


Figure 4: Courbes des débits spécifiques classés de l'Orbe au droit de la station des Rousses et au droit de la station du Chenit

Pour la présente étude, par souci de prudence, et parce que la station du Chenit est probablement plus représentative car plus proche du site étudié, l'hydrologie de l'Orbe au droit du musée de la Boissellerie est reconstituée à partir des débits journaliers mesurés au Chenit de 1998 à 2017, par homothétie des bassins versants.

2.1.1. Débits moyens mensuels, module et courbe des débits classés

Les graphiques ci-dessous représentent les débits mensuels moyens et la courbe des débits classés de l'Orbe au droit du musée de la Boissellerie.

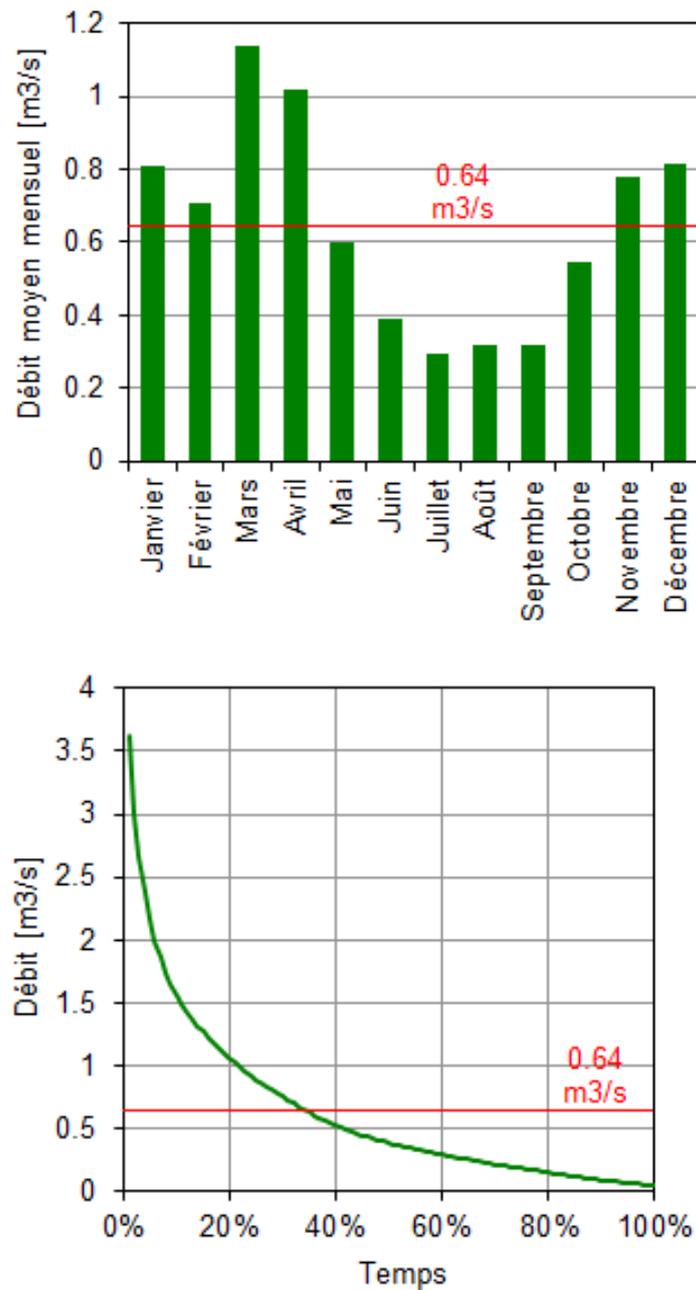


Figure 5: Débits moyens mensuels et courbe des débits classés de l'Orbe au droit du musée de la Boissellerie

Les débits moyens mensuels les plus forts sont rencontrés en mars et avril (1000 l/s environ) tandis que les débits moyens mensuels les plus faibles sont rencontrés l'été (300 l/s environ).

Le module, ou débit moyen interannuel, s'établit à **640 l/s**.

2.1.2. Variabilité de l'hydraulicité

La Figure 6 illustre la variabilité de l'hydraulicité de l'Orbe au droit du musée de la Boissellerie d'une année à l'autre de 1998 à 2017.

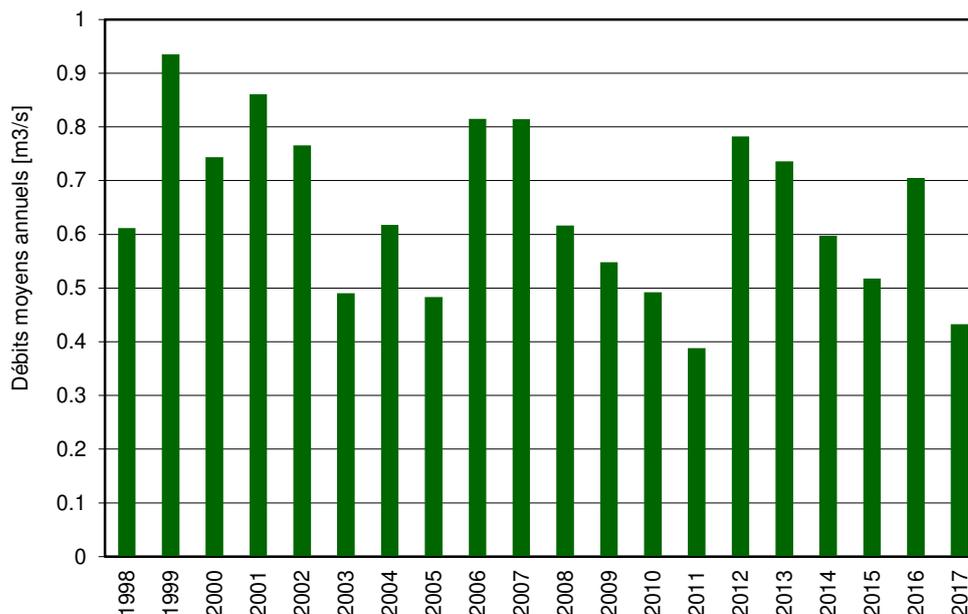


Figure 6: Débits moyens annuels de l'Orbe au droit du site de projet 1998 à 2017

Dans les 20 dernières années, l'année 2011 a été la plus sèche avec un débit moyen annuel inférieur à 400 l/s, tandis que l'année 1999 a été la plus humide avec un débit moyen annuel supérieur à 900 l/s : le débit moyen annuel de l'Orbe a varié entre 62% et 140% du module interannuel depuis 1998.

2.1.3. Débits de crue

Les débits de crue instantanés maximaux au droit du musée de la Boissellerie peuvent être estimés, à partir des débits de crue instantanés maximaux de l'Orbe aux Rousses, par la formule de Myer qui s'écrit :

$$Q_{\text{Boissellerie}} = Q_{\text{Rousses}} \times (SBV_{\text{Boissellerie}} / SBV_{\text{Rousses}})^{\alpha}$$

Avec Q : débit (m³/s)

SBV : surface du bassin versant (km²)

α : coefficient dont la valeur par défaut est 0,8

Fréquence	Débit instantané maximal
Biennale	4.14 m³/s
Quinquennale	5.41 m³/s
Décennale	6.21 m³/s
Vicennale	7.00 m³/s
Cinquantennale	7.96 m³/s

Tableau 2 : Débits de crue de l'Orbe au droit du musée de la Boissellerie

2.2. IMPACT POTENTIEL DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR L'HYDROLOGIE DES COURS D'EAU EN BOURGOGNE

HYCCARE Bourgogne (HYdrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau) est un projet de recherche-action partenarial et pluridisciplinaire qui vise à mettre à disposition des décideurs

locaux des outils leur permettant de mieux prendre en compte le changement climatique dans la gestion de l'eau.

Le projet de trois ans et demi (octobre 2012 à avril 2016) a été mené grâce au soutien du ministère de l'Environnement via le programme Gestion et impacts du changement climatique, des agences de l'eau Loire-Bretagne, Seine-Normandie et Rhône Méditerranée Corse, ainsi que de l'ADEME Bourgogne.

Il a impliqué sept organismes de recherche : l'Université de Bourgogne, le CNRS, l'INRA, AgroSup Dijon, le BRGM, l'Université François Rabelais de Tours et l'Université Pierre et Marie Curie de Paris

En synthèse, les résultats de l'étude de l'impact du réchauffement climatique sur la ressource en eau en Région Bourgogne sont les suivants :

- Les débits moyens des cours d'eau bourguignons sont presque partout en baisse par rapport à ceux mesurés avant la rupture de 1987-1988, et ce, de janvier à septembre. L'étiage est plus précoce et plus marqué. Seul l'automne connaît des débits inchangés.
- Le réchauffement climatique se poursuivra par paliers, séparés par des ruptures. Son ampleur, surtout à partir de la seconde moitié du XXI^e siècle, dépendra des quantités émises de gaz à effet de serre. Le nombre de paliers et les dates de rupture varient selon les simulations.
- Concernant les précipitations, il s'est avéré que le modèle a tendance à les surestimer et que ce biais n'est pas constant. Il ne reproduit pas correctement le cycle annuel des pluies et les résultats ne peuvent donc pas être utilisés pour alimenter les modèles hydrologiques.

Malgré ces difficultés de simulation des pluies et des débits, il est possible d'avancer l'hypothèse d'une baisse des débits du fait de l'augmentation des températures. Cette assumption est conforme aux enseignements du passé et aux résultats d'autres projets de recherche.

2.3. HAUTEUR DE CHUTE BRUTE ET EFFACEMENT

La chute brute est la différence d'altitude entre le plan d'eau à l'amont et le plan d'eau à l'aval de la turbine. Elle est maximale en conditions d'étiage. Le niveau amont correspond alors à la crête du seuil.

La hauteur de chute a été mesurée le 26 juillet 2018 égale à 2,04 m. Le débit de l'Orbe le 26 juillet 2018 était de 59 l/s, d'après la mesure réalisée à la station du Chenit (80 l/s).

La hauteur de chute brute maximale au droit du musée de la Boissellerie s'élève à **2,04 m**.

Lorsque le débit de la rivière augmente, le niveau aval augmente plus vite que le niveau amont, ce qui se traduit directement par un abaissement de la hauteur de chute.

Le personnel du musée de la Boissellerie a mesuré la hauteur de chute dans différentes conditions de débit. Le résultat de cette campagne de mesures est représenté par le graphique de la Figure 7. En cas de crue biennale, il reste 1 mètre de chute au droit du seuil.

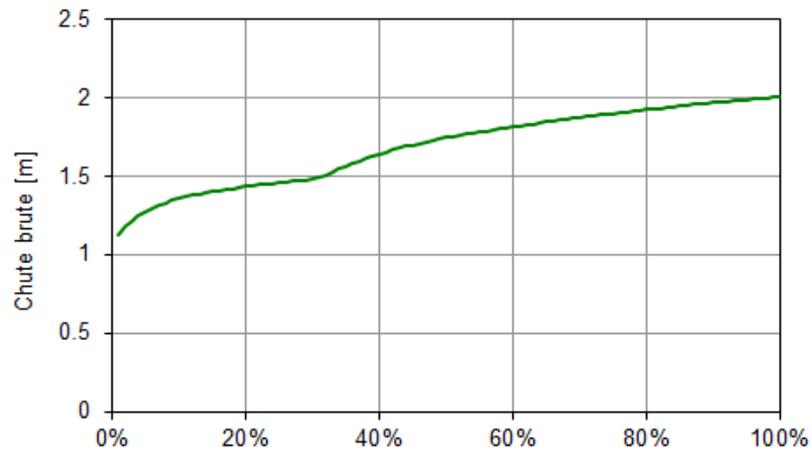
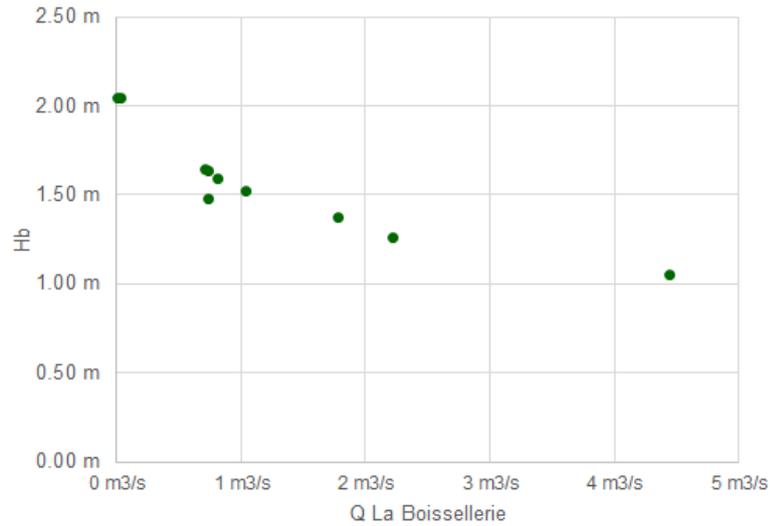


Figure 7 : Loi d'effacement de la chute au droit du seuil de la Boissellerie

2.4. TOPOGRAPHIE

La hauteur de chute à l'étiage a été mesurée à l'aide d'une mire et d'un niveau de chantier.

Les plans de l'aménagement existant sont basés sur des mesures réalisées sur site et sur les plans topographiques existants, notamment l'extrait présenté en Figure 8.

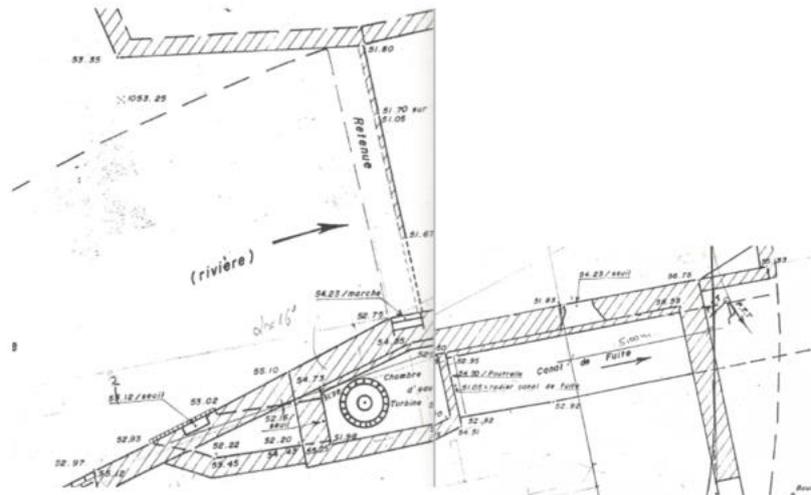


Figure 8 : Extrait de l'unique plan topographique de la zone de projet disponible à ce jour

2.5. ENJEUX PISCICOLES

Dans la situation actuelle, la pertinence de rendre franchissable le seuil du musée de la Boissellerie n'est pas évidente. La présente étude ne prend pas en compte la construction éventuelle d'une passe à poissons.

Les turbines hydroélectriques envisagées ne sont pas de type ichtyophile mais l'espacement des barreaux maximal pour éviter tout endommagement des turbines est de 20 mm, ce qui garantit qu'aucun poisson ne sera entraîné vers les turbines.

2.6. AUTRES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

Le site de projet se situe dans les zones protégées suivantes :

- Parc Naturel Régional du Haut-Jura
- Site Natura 2000 « Vallée de l'Orbe »
- ZNIEFF de type 1 « Lac et tourbières des Rousses – Haute vallée de l'Orbe ».

L'Orbe ne recèle aucune espèce d'intérêt communautaire. Les enjeux environnementaux se situent essentiellement dans le lac des Rousses et dans les tourbières alentours.

3. POTENTIEL ENERGETIQUE

3.1. SELECTION DU TYPE DE TURBINE

Le site de projet est très contraint :

- le génie civil existe et le potentiel énergétique modeste du site impose de minimiser les travaux,
- le nouvel équipement doit cohabiter avec une turbine Fontaine, dont le fonctionnement ponctuel doit être assuré,
- la chambre d'eau se situe en plein cœur du musée, la visite de cette dernière étant un incontournable de la visite guidée : la centrale hydroélectrique doit être compatible avec l'accueil du public : minimisation de l'encombrement, de l'impact sonore et des vibrations,
- la turbine doit être assez compacte pour être amenée via le canal de fuite ou via une entrée du musée,

Il est impératif d'avoir recours à la turbine la plus compacte possible.

Il existe sur le marché quelques modèles de groupes turbo-générateurs compacts sans réglage.

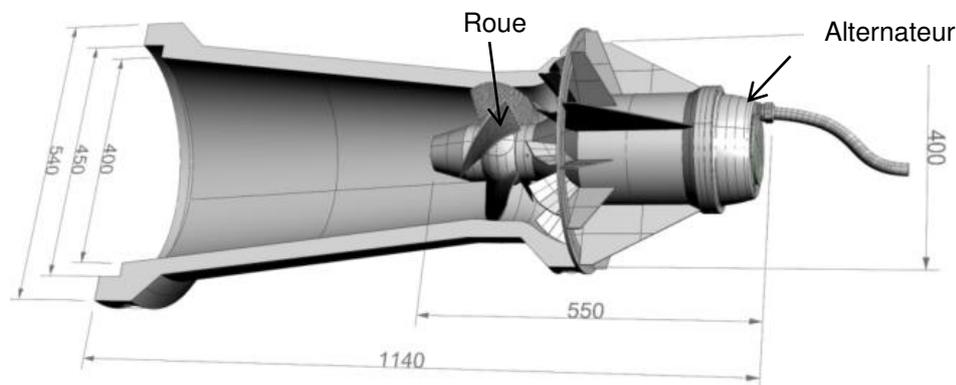


Figure 9 : Dimensions caractéristiques d'un groupe turbo-générateur compact ($Q_e = 200$ l/s)

L'alternateur, de type à aimants permanents, est immergé. L'immersion du groupe minimise son impact sonore et les vibrations induites.

Ces groupes sont non réglables, c'est-à-dire sans capacité d'adaptation aux variations de chute et de débit : ils ne possèdent pas de système de réglage permettant d'ajuster la position des pales de la roue et/ou des directrices pour étendre la plage de fonctionnement et ne fonctionnent donc qu'autour d'un point de fonctionnement nominal. Cette simplification permet de réduire les coûts d'investissement (env. 25 à 50% inférieurs) mais ne permet pas d'optimiser la production puisque la turbine ne peut pas fonctionner lorsque le débit disponible est inférieur à sa valeur nominale, ou quand la chute s'écarte de sa valeur nominale.

3.2. DEBIT D'EQUIPEMENT

Le suivi de l'évolution de la chute brute en fonction du débit, réalisé dans le cadre du présent Avant-Projet, des discussions techniques approfondies avec le fournisseur des turbines, ainsi que la superposition des profils temporels de production et de consommation amènent à faire évoluer le projet pressenti au stade étude de faisabilité.

Il ressort du réexamen du projet que le plus judicieux est de mettre en place dans la chambre d'eau existante une unique turbine de débit d'équipement 220 l/s et pré-réglée pour atteindre son rendement optimum sous une chute de 1,7 m et en turbinant 200 l/s.

L'ajout d'une deuxième turbine identique n'augmente le productible que de 45% alors que l'investissement est multiplié par deux. Le temps de retour sur investissement d'une deuxième turbine est de 35 ans environ.

3.3. DEBIT RESERVE

L'article L.214-18 du code de l'environnement impose à tout ouvrage transversal dans le lit mineur d'un cours d'eau de laisser dans le lit un débit minimal garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces présentes. Ce débit, d'une manière générale, ne doit pas être inférieur au 1/10ème du module. Il est communément appelé « débit réservé ».

Dans le cas présent, l'aménagement hydroélectrique ne créant pas de tronçon court-circuité, il est considéré que le débit réservé peut être turbiné.

3.4. PUISSANCE MAXIMUM BRUTE

La puissance administrative citée dans le droit d'eau est la Puissance Maximum Brute (PMB). Elle dépend uniquement des « données naturelles » du site, à savoir la chute brute exploitable H_b , prise entre l'entrée du canal d'amenée et la sortie du canal de fuite, et le débit dérivable maximal. Elle ne prend pas en compte les différents phénomènes physiques pouvant engendrer une réduction de la puissance exploitable (limitation de la production pour raison administrative ou environnementale, pertes de charge dans les chemins d'eau, rendement des équipements électromécaniques, etc.). La prise en compte de ces phénomènes permet de déterminer la puissance installée.

La Puissance Maximale Brute du projet s'élève à **4,4 kW**.

3.5. PUISSANCE INSTALLEE ET PRODUCTIBLE ANNUEL MOYEN

Le productible, ou production annuelle moyenne, est estimé à partir de la courbe des débits classés.

Pour rappel, la courbe des débits classés est construite en classant par ordre décroissant les débits moyens journaliers enregistrés entre 1998 et 2017.

Pour chaque valeur de débit est calculée la hauteur de chute correspondante, le débit turbiné (qui diminue avec la hauteur de chute, la turbine étant sans réglage) et le rendement du groupe turbogénérateur (qui dépend de la chute et du débit turbiné). Il est alors possible de calculer la puissance développée par le groupe turbogénérateur.

Il est rappelé que le débit réservé est turbiné.

Par ailleurs, une indisponibilité du groupe pour avarie de 5% est prise en compte.

La courbe des puissances classées du groupe est tracée en vert sur la Figure 10.

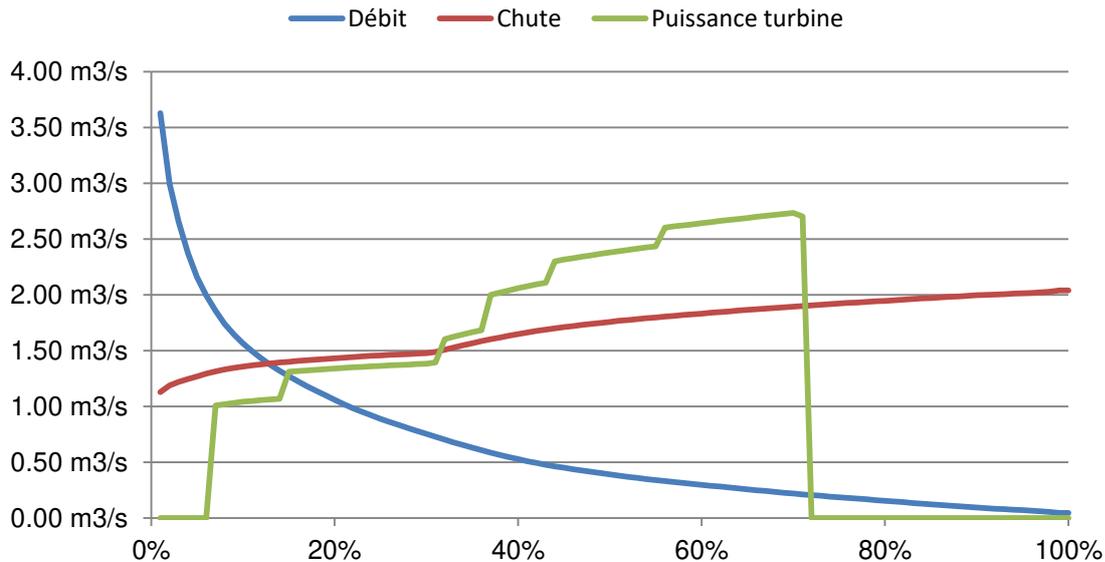


Figure 10 : Débits, chutes et puissances classées sur le site de la Boissellerie, avec un groupe sans réglage optimisé pour turbiner 200 l/s sous 1,7 m de chute

La puissance maximale du groupe s'élève à 2,73 kW. La puissance moyenne sur l'année de 1,25 kW. Le productible est de 10 422 kWh/an.

La courbe verte de la Figure 10 s'interprète comme suit :

- Environ 5% du temps (partie gauche du graphe), la hauteur de chute est trop faible pour permettre le turbinage,
- Environ 25% du temps (partie droite du graphe), le débit est trop faible pour permettre le turbinage,
- Le reste du temps, la puissance du groupe turbo-générateur varie en fonction de la hauteur de chute disponible. La hauteur de chute fixe le débit turbiné et le rendement du groupe. Le groupe étant non réglable, ses performances se dégradent rapidement lorsqu'on s'éloigne de son point de fonctionnement optimum.

3.6. PROFIL TEMPOREL DE PRODUCTION PENDANT TROIS ANNEES PARTICULIERES

L'étude d'un projet d'auto-consommation nécessite de superposer les profils temporels de production et de consommation.

Du côté « production », la courbe des débits classés n'est plus l'outil adapté puisqu'il faut calculer la production journalière sur une année de 365 jours. En outre, moyenniser les débits moyens journaliers des 20 dernières années n'a aucun sens. L'étude d'une année particulière est incontournable. Pour illustrer la variabilité de l'hydrologie d'une année sur l'autre, il a été fait le choix de calculer le productible au pas de temps journalier pour les trois années particulières suivantes :

- Année 2008 : le débit annuel moyen est de 615 l/s, proche du module de l'Orbe au droit du site de projet (640 l/s)
- Année 1999 : année la plus humide entre 1998 et 2017, avec un débit moyen annuel de 930 l/s
- Année 2011 : année la plus sèche entre 1998 et 2017, avec un débit moyen annuel de 385 l/s

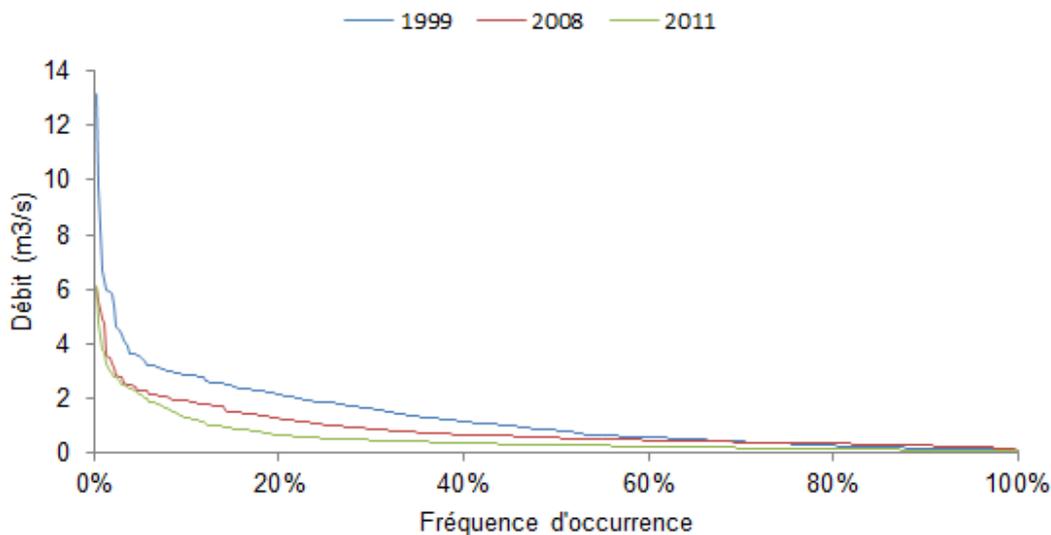


Figure 11 : Courbes des débits classés de l'Orbe au musée de la Boissellerie en 1999, 2008 et 2011

La production horaire, du 1er janvier au 31 décembre, qui aurait été obtenue de l'aménagement projeté en 1999, 2008 et 2011 est présenté graphiquement en Figure 12.

Le profil de production est très variable d'une année à l'autre.

Les productions annuelles de l'aménagement projeté auraient été les suivantes :

- En 1999 : 10 457 kWh, dont 7 524 kWh pendant la période de chauffage et 3 452 kWh hors période de chauffage
- En 2008 : 15 188 kWh, dont 9 722 kWh pendant la période de chauffage et 6 211 kWh hors période de chauffage
- En 2011 : 8 919 kWh, dont 4 843 kWh pendant la période de chauffage et 4 520 kWh hors période de chauffage.

La période de chauffage correspond à la période pendant lequel le musée de la Boissellerie est chauffé, soit du 1^{er} octobre au 30 avril.