



HAL
open science

Perspective sur la pico-hydroélectricité pour la Direction territoriale de Strasbourg de Voies navigables de France

Thibault Piloix

► **To cite this version:**

Thibault Piloix. Perspective sur la pico-hydroélectricité pour la Direction territoriale de Strasbourg de Voies navigables de France. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2019. dumas-03550856

HAL Id: dumas-03550856

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03550856v1>

Submitted on 1 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Thibault PILOIX
Promotion Grand Lyon
2016-2019
Formation par apprentissage



Perspectives sur la pico-hydroélectricité pour la Direction territoriale de Strasbourg de Voies navigables de France



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES

Structure d'accueil : Direction territoriale de Strasbourg, Voies navigables de France
Maître d'apprentissage : Olivier CHRISTOPHE
Réfèrent école : Pascal FINAUD GUYOT

TFE réalisé du 1^{er} janvier au 12 juillet 2019
Spécialisation Hydrosystèmes

Parlement européen (gauche) et barrage à aiguilles (droite) de
Strasbourg, lors du jaugeage du 07/05/2019
Crédits : Guilhem Dellinger

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes m'ayant accompagné au cours de ces trois années de formation ; que ce soit au cours de mes passages à l'école ou bien à VNF, et qui m'ont apporté plus que je ne l'aurai imaginé, tant sur le plan professionnel que personnel.

En premier lieu, je souhaite remercier tout particulièrement Olivier Christophe, mon maître d'apprentissage, qui m'a pris sous son aile voilà trois ans maintenant et m'a donné la chance d'intégrer son unité : le Bureau de Maîtrise d'Ouvrage 3, alors rattaché au Service des Itinéraires Régionaux et de la Maintenance. C'est à ses côtés que je suis entré dans le monde du transport fluvial et des marchés publics avec ma première opération sur le barrage à aiguilles de la Robertsau. Grâce à Olivier, j'ai pu apprendre et comprendre un grand nombre de choses sur le réseau, l'hydraulique, VNF et le monde professionnel en général. Son accompagnement et son soutien m'ont permis de développer mes compétences, mon autonomie et mon assurance. Je lui suis extrêmement reconnaissant pour tout ce qu'il a fait pour moi, dans le cadre de mon travail comme lors de mes démarches personnelles.

J'espère que ces trois années passées à ses côtés m'auront apporté ne serait-ce qu'une petite partie des qualités humaines et professionnelles qui le caractérise.

A mes collègues de cellule les plus proches, Julie, Sahnoun, Vincent et Patrice, je souhaite d'abord exprimer toute ma reconnaissance pour leur incroyable accueil, leur motivation sans faille, leur aide et leur soutien continu, et enfin pour leur bonne humeur, qui chaque jour pendant trois ans m'ont permis d'évoluer et de grandir au sein de cette petite famille. Qui eut cru qu'ils me supporteraient pendant tout ce temps ? Mais ils furent nombreux à m'aider et à me supporter, et plus encore pendant ce TFE : toute l'équipe de la cellule EER et notamment Monique et Laurent, dont j'ai assiégé le bureau pendant plusieurs mois, ainsi que Martin, toujours volontaire et impliqué dans son travail comme dans le mien ; ainsi que tous les agents de la maîtrise d'ouvrage et du service en général, que ce soit ceux de Strasbourg ou encore les irréductibles de Mulhouse, en particulier Claude, Gérald et Gilles.

Un grand merci également à ceux sans qui rien n'aurait été possible : les agents dans les UT, qui, au quotidien, avec passion, entretiennent et font tourner la « machine VNF » ; eux qui sont soucieux de leur réseau et de leurs ouvrages ; eux qui ont accueilli mes interrogations avec beaucoup de bienveillance et d'intérêt. Ils sont malheureusement trop nombreux pour que je les présente tous, je ne citerai donc ici que quelques-uns de l'UT Centre Alsace : Magali, Jean-Philippe, Joël et Michel, qui m'ont fait découvrir leur réseau riche et complexe, et avec qui, trois années durant, j'ai eu la chance de travailler.

Mention particulière à mes autres collègues : Jean-Pierre, Véronique, Thomas et Marc ; Vincent, Lucas, Dominique et Fabien ; Joëlle et Anne-Sophie ; Marie et Julie ; Ingelyse et Stéphanie ; bien évidemment Justine, Myriam et toute l'équipe des RH ; ainsi que Fatima, Thomas et Kelvin : toutes et tous m'ont accueilli à bras ouverts et ont toujours été prêts à m'aider et me soutenir.

Je voudrais également remercier mon tuteur, Pascal Finaud-Guyot, ainsi que Guilhem et Nicolas, qui tous ont été d'une grande bienveillance à mon égard, se sont impliqués dans mes projets et m'ont apporté leur aide ; ainsi que pour les belles opportunités qu'ils me proposent.

Enfin, un très grand merci à toutes les relectrices et relecteurs de ce rapport pour leur grande aide ; eux qui, les premiers, découvrent ces mots.

Résumé : *Perspectives sur la pico-hydroélectricité pour la Direction territoriale de Strasbourg de Voies navigables de France*

L'établissement public Voies navigables de France est un acteur majeur du développement durable dans les territoires, sensible aux enjeux environnementaux. L'établissement entend donc valoriser son réseau, notamment grâce au développement d'énergies renouvelables.

Cette étude vise à recenser les ouvrages et leur potentiel hydroélectrique sur le territoire de la DT de Strasbourg, afin de donner à VNF plus de visibilité sur la situation de son réseau et lui offrir des pistes de réflexions du point de vue de la mise en place de production de petite hydroélectricité.

Le travail présenté comprend un diagnostic du fonctionnement du réseau et de ses ouvrages, et le recensement des sites d'intérêt et des données hydrauliques et de gestion. Il étudie leur potentiel, propose des pistes d'aménagements et étudie la faisabilité de chaque projet. Cette étude est la première à être lancée à l'échelle de toute une direction territoriale, avec la prise en compte des aspects potentiels et cinétiques des écoulements, traitant d'une grande diversité d'ouvrages décrits sur deux périodes hydrauliques différentes, et intégrant dans sa réflexion des prototypes hydroliens adaptés au réseau.

Vingt-deux sites ont été recensés et étudiés, correspondant à un total de trente-deux ouvrages et organes de gestion hydraulique. Cela représente une puissance nette installée de 950 kW suite aux aménagements, permettant de produire 8,2 GWh d'énergie hydroélectrique : la totalité du projet est rentable sur neuf ans. Les sites sont décrits, étudiés, puis classés en fonction de leur potentiel, permettant à l'établissement de prioriser ses prochaines actions d'aménagement. Ce travail est également le lieu de la première collaboration entre VNF et le laboratoire ICube, ouvrant ainsi la porte à de futurs partenariats pour la recherche et le développement de micro-turbines.

Abstract : *Prospects regarding pico-hydroelectricity for the Strasbourg Territorial Directorate of Voies navigables de France*

The public institution Voies navigables de France is a major actor in sustainable development in the territories, sensitive to environmental issues. The establishment therefore intends to value its network, in particular through the development of renewable energies.

This study aims to identify the structures and their hydroelectric potential on the territory of the DT Strasbourg, in order to give VNF more visibility on the situation of its network and to offer it ideas for the development of small hydroelectricity production.

The present work includes a diagnosis of the network functioning and structure, the identification of sites of interest, and hydraulic and management data. It studies their potential, proposes layout options, and studies the feasibility of each project. This study is the first launched at the scale of an entire territorial directorate, considering the potential and kinetic flows aspects, dealing with a wide variety of structures described over two different hydraulic periods, and integrating along the reflexion network adapted hydrokinetic prototypes.

Twenty-two sites were identified and studied, representing a total of thirty-two hydraulic management structures and devices. This represents a net installed power of 950 kW after layouts, producing 8.2 GWh of hydroelectric energy: the entire project is profitable over nine years. The sites are described, studied and classified according to their potential, allowing the establishment to prioritize its future development actions. This work is also the site of the first collaboration between VNF and the ICube laboratory, thus opening the door to future partnerships for the research and development of micro-turbines.

Table des matières

Liste des tableaux	8
Liste des figures	9
Glossaire	10
Introduction	11
I. Contexte	13
A. <i>Présentation du TFE</i>	13
1. Structure VNF	13
2. Objectifs.....	15
3. Méthodologie	16
B. <i>Introduction à l'hydroélectricité</i>	17
1. Enjeu énergétique	17
2. Hydroélectricité	18
3. Etat de l'art	20
II. Evaluation du potentiel hydroélectrique	25
A. <i>Diagnostic réseau</i>	25
1. Fonctionnement du réseau et système alimentaire	25
2. Ouvrages d'art et métrologie	29
3. Sites retenus pour l'étude	35
B. <i>Etude de potentiel hydroélectrique</i>	37
1. UT Canal du Rhône au Rhin Branche Sud.....	37
2. UT Canal de la Marne au Rhin	42
3. UT Centre Alsace	46
5. Récapitulatif	49
III. Perspectives et faisabilité	51
A. <i>Faisabilité et propositions d'aménagements</i>	51
1. Choix d'équipements.....	51
2. Puissances nettes et implantations.....	52
3. Bilans et estimation financière	59
B. <i>Limites et perspectives</i>	60
1. Limites de l'étude	60
2. Démarches complémentaires	61
3. Perspectives.....	62
Conclusion générale	63
Bibliographie	64
Annexes	66

Liste des tableaux

Tableau 1 : Débits calculés à la prise d'eau du Rahin.....	37
Tableau 2 : Puissances potentielles brutes au barrage de restitution du Rahin	37
Tableau 3 : Calcul des puissances potentielles au droit de la prise d'eau du Rahin.....	38
Tableau 4 : Calcul des puissances cinétiques pour la rigole du Rahin.....	38
Tableau 5 : Puissances potentielles brutes au barrage de Champagny.....	39
Tableau 6 : Puissances cinétiques brutes dans la rigole aval	39
Tableau 7 : Puissances potentielles brutes aux écluses du CMHS.....	40
Tableau 8 : Calculs des puissances cinétiques brutes sur la rigole de la Largue	41
Tableau 9 : Puissances potentielles au barrage d'Illfurth	41
Tableau 10 : Puissances potentielles brutes à Zillisheim	42
Tableau 11 : Puissances cinétiques brutes à Zillisheim	42
Tableau 12 : Puissance potentielle au barrage de la PE de Lorquin	43
Tableau 13 : Puissances cinétiques brutes de la PE de Lorquin.....	43
Tableau 14 : Puissance potentielle au barrage de la PE de Nitting.....	43
Tableau 15 : Puissances cinétiques brutes de la PE de Nitting	44
Tableau 16 : Puissances potentielles brutes au P.I	44
Tableau 17 : Puissances brutes à la PE 18	45
Tableau 18 : Puissances brutes à la PE 26	45
Tableau 19 : Puissance cinétique brute à la PE 40.....	46
Tableau 20 : Puissances potentielles brutes au barrage de Colmar	46
Tableau 21 : Puissance cinétique brute à la PE de Neuf-Brisach	47
Tableau 22 : Calcul des débits de l'III à Strasbourg	47
Tableau 23 : Puissances potentielles au barrage de l'Abattoir	48
Tableau 24 : Puissances cinétiques au barrage de l'Abattoir.....	48
Tableau 25 : Puissances potentielles au barrage de l'Aar.....	48
Tableau 26 : Puissance cinétique au barrage de l'Aar	48
Tableau 27 : Puissances potentielles au barrage de la Robertsau	49
Tableau 28 : Puissance cinétique au barrage de la Robertsau	49
Tableau 29 : Puissances nettes au Rahin.....	53
Tableau 30 : Puissances nettes à Champagny.....	53
Tableau 31 : Puissances nettes sur le CMHS.....	54
Tableau 32 : Puissances nettes sur la rigole de la Largue.....	54
Tableau 33 : Puissances nettes au barrage d'Illfurth	54
Tableau 34 : Puissances nettes aux barrages de Zillisheim	54
Tableau 35 : Puissances nettes à Lorquin	55
Tableau 36 : Puissances nettes à Nitting.....	55
Tableau 37 : Puissances nettes au Plan Incliné.....	56
Tableau 38 : Puissances nettes à la PE 18	56
Tableau 39 : Puissances nettes à la PE 26	56
Tableau 40 : Puissances nettes à la PE 40	57
Tableau 41 : Puissances nettes au barrage de Colmar	57
Tableau 42 : Puissances nettes à la PE de Neuf-Brisach.....	57
Tableau 43 : Puissances nettes au barrage de l'Abattoir	58
Tableau 44 : Puissances nettes au barrage de l'Aar.....	58
Tableau 45 : Puissances nettes au barrage à aiguilles.....	58

Liste des figures

Figure 1 : Réseau national de VNF.....	14
Figure 2 : Réseau de la DTS	15
Figure 3 : Schémas, de la gauche vers la droite, de roues par-dessus, par-dessous, et poitrine – Source : Alternative Energy Tutorials	20
Figure 4 : Schéma d'une roue horizontale - Source : "Les Moulins", Jean Orsatelli 1979	21
Figure 5 : Turbine Banki - Source : Moulin de Wanlin	21
Figure 6 : Schéma d'une turbine Pelton - Source : Alternative Energy Tutorials	21
Figure 7 : Schéma d'une turbine Francis - Source : The Constructor.....	22
Figure 8 : Schémas d'une turbine Kaplan (gauche) et VLH (droite) - Sources : S.K. Engineering Corporation / Envinergy	22
Figure 9 : Schéma d'une vis hydraulique – Source : Eduscol	23
Figure 10 : Diagramme d'utilisation de différentes turbines – Source : Williamson et al. [2014]	23
Figure 11 : Schéma et image d'une Vis d'Archimède Horizontale – Source : ICube	24
Figure 12 : Schéma et image d'un Cylindre Oscillant – Source : ICube	24
Figure 13 : Carte de l'UT CS et son système alimentaire.....	25
Figure 14 : Carte de l'UT CRRBS et son système alimentaire	26
Figure 15 : Réseaux des UT CA et UT Rhin	27
Figure 16 : Carte de l'UT CMR et son système alimentaire	28
Figure 17 : Vanne du barrage de la PE de Lorquin, sur la Sarre Blanche	29
Figure 18 : "Grande rigole", de la PE de Nitting sur la Sarre Rouge au BPV	29
Figure 19 : Barrage clapets de la PE 26 sur la Zorn	30
Figure 20 : Barrage de Champagney, pendant sa vidange	30
Figure 21 : Barrage de l'III à Colmar	31
Figure 22 : Déversoir de l'Ecrevisse, CRRBS	31
Figure 23 : Plan Incliné de Saint-Louis/Arzviller	32
Figure 24 : Ecluse n°42, CMR	32
Figure 25 : Corde de vitesses, rigole de la Largue(droite) ; et Point de mesure de hauteur (radar) couplé avec une échelle limnimétrique, déversoir bief 29N	33
Figure 26 : Couverture métrologique des prises d'eau et des rejets	34
Figure 27 : Jaugeage avec ADCP, barrage 1 de Zillisheim 25/04/2019	34
Figure 28 : Courbe des débits classés de l'III (station de Chasseur Froid - m3/s)	47
Figure 29 : Implantation des aménagements du Rahin.....	52

Glossaire

Aqueduc de contournement : ouvrage correspondant à un seuil de quelques mètres de longueur, qui permet d'évacuer le surplus d'eau du bief amont directement vers le bief aval en court-circuitant le sas de l'écluse.

aGHyre : application pour la Gestion Hydraulique et de la ressource en eau. Application encore en développement permettant la remontée et la centralisation des données de gestion hydraulique.

Batardeau : Panneau mobile, pouvant être en métal ou en bois, placé devant les portes d'une écluse afin de la condamner temporairement.

Bief : portion de canal situé entre deux écluses. Le nom donné à un bief correspond à celui de l'écluse aval.

Bief de partage : bief situé au sommet du relief que franchit le canal. Il ne peut donc recevoir gravitairement de l'eau d'aucun autre bief du même canal.

BPV : Bief de Partage des Vosges

CCO : Canal de Colmar

CO : Cylindre Oscillant (énergie cinétique)

CMR : Canal de la Marne au Rhin

CMHS : Canal de Montbéliard à la Haute-Saône

CRRBN : Canal du Rhône au Rhin Branche Nord

CRRBS : Canal du Rhône au Rhin Branche Sud

CS : Canal de la Sarre (= Canal des Houillères de la Sarre, CHS)

Débit réservé : débit minimal qu'il faut maintenir en aval d'un ouvrage hydraulique, garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces présentes. Ce débit, d'une manière générale, ne doit pas être inférieur à 1/10^{ème} du module.

DT : Direction territoriale

DTNE : Direction Territoriale Nord-Est

DTRS : Direction Territoriale Rhône-Saône

DTS : Direction Territoriale de Strasbourg

Ecluse : sas délimité par une porte amont et une porte aval, permettant le franchissement d'un dénivelé par un bateau égal à la hauteur de chute.

Eclusée=Bassinée : ensemble de manœuvres nécessaires au franchissement de l'écluse par un ou plusieurs bateaux. On parle de fausse éclusée ou de fausse bassinée lorsqu'elles sont exécutées alors qu'il n'y a pas de bateaux dans l'écluse.

PE : Prise d'eau

Rigole d'alimentation : canal artificiel permettant d'alimenter la voie d'eau. Elle transporte l'eau depuis le réservoir ou le prélèvement jusqu'aux biefs de navigation (généralement le bief de partage).

SCADA : Système de contrôle et d'acquisition de données (Supervisory Control and Data Acquisition)

UT : Unité Territoriale

UT CA : Unité Territoriale Centre Alsace

UT CMR : Unité Territoriale Canal de la Marne au Rhin

UT CRRBS : Unité Territoriale Canal du Rhône au Rhin Branche Sud

UT CS : Unité Territoriale Canal de la Sarre

UT Rhin : Unité Territoriale Rhin

Vantelles : petites vannes levantes équipant les portes d'écluse. Elles sont utilisées pour les bassinées ou l'alimentation du bief aval.

VNF : Voies navigables de France

VAH : Vis d'Archimède Horizontale (énergie cinétique)

VAV : Vis d'Archimède Verticale (énergie potentielle)

Introduction

Les enjeux climatiques et énergétiques sont à l'heure actuelle parmi les principales sources d'inquiétude concernant l'avenir et le devenir des populations humaines et de nos sociétés. Il devient de plus en plus urgent de trouver des solutions face à l'emballement des températures et des événements extrêmes, à l'augmentation de la consommation de ressources et d'énergie de la population humaine, ainsi qu'à l'effondrement des milieux naturels et de la biodiversité (rapport IPBES, 2019).

Le développement des énergies renouvelables participe au changement structurel nécessaire des modes de production reposant aujourd'hui principalement sur les énergies fossiles et nucléaires. Les besoins croissants dans ce domaine poussent à la quête perpétuelle de nouveaux systèmes, de nouvelles technologies, afin d'assurer un apport énergétique suffisant tout en limitant les impacts négatifs sur nos milieux et notre environnement.

L'hydroélectricité est actuellement la première énergie renouvelable en France, représentant plus de 12% de la production électrique nationale (France Hydro Electricité). Mais les possibilités d'implantations des grandes centrales sont aujourd'hui arrivées à leur terme ; en effet, la majorité des sites à fort potentiel de notre territoire sont d'ores et déjà équipés. De plus, en raison de leur fort impact environnemental, les projets de développement de ces types d'ouvrages ne sont plus envisageables. Il faut par conséquent s'intéresser aux potentiels laissés de côté, comme les faibles chutes ou les zones de forts écoulements, en optimisant les ouvrages existants et en limitant les impacts sur le milieu.

C'est dans cette optique que l'établissement public Voies navigables de France entend valoriser son réseau et ses activités grâce au développement des énergies renouvelables et des nouvelles technologies sur son domaine de prédilection : l'eau et la gestion hydraulique. En effet, VNF est un acteur majeur des territoires français, exploitant et développant plus de 6700 kilomètres de réseau navigable ainsi que plusieurs milliers d'ouvrages hydrauliques au fonctionnement varié. Or le réseau VNF regorge de sites discrets qui fonctionnent, jour après jour, pour la gestion hydraulique et l'alimentation de la voie d'eau. Il est temps pour l'établissement de valoriser ses sites en récupérant l'énergie fatale de fonctionnement de son réseau. Il est question ici de petits potentiels : de micro hydroélectricité, c'est-à-dire de sites présentant moins de 500 kilowatts ; voire de pico hydroélectricité pour des potentiels ne dépassant pas quelques kilowatts. L'établissement souhaite par là même collaborer avec le laboratoire de recherche ICUBE, afin de tester des méthodes innovantes de production hydroélectrique.

Ce travail de fin d'études, hébergé au sein du Bureau de Maîtrise d'Ouvrage du Service Technique de la Voie d'Eau, a pour objectif d'estimer le potentiel hydroélectrique de la Direction territoriale de Strasbourg, et de présenter à l'établissement des pistes de réflexions et d'aménagements vis-à-vis de sites de production hydroélectrique.

Le présent rapport entend faire le diagnostic du fonctionnement et de l'équipement du réseau afin d'identifier des sites intéressants du point de vue de la production hydroélectrique. Ces sites sont alors analysés et étudiés de façon à définir leur potentiel, en intégrant notamment des systèmes de production novateurs encore jamais utilisés sur le terrain. Afin que l'étude soit la plus détaillée possible, l'analyse est menée sur deux périodes de fonctionnements hydrauliques caractéristiques de la réalité et des particularités du réseau et des ouvrages. Au vu des potentiels des sites, des propositions d'aménagements sont faites afin d'éclairer l'établissement dans ses choix futurs, accompagnées d'un chiffrage indicatif.

I. Contexte

A. Présentation du TFE

1. Structure VNF

1. Présentation de l'établissement

Etablissement public administratif (EPA), Voies navigables de France (VNF) dépend du Ministère de la transition énergétique et solidaire (MTES) responsable de la politique française de navigation fluviale.

VNF gère, entretient, exploite et modernise 80% du réseau des voies navigables françaises et promeut la voie d'eau, que ce soit pour des activités touristiques ou pour le transport de marchandises. Son réseau s'étend sur 6.700 km de voies navigables dont 4.100 km dédiés principalement au trafic de fret et comprend 40.000 hectares de domaine public fluvial, 4.000 ouvrages d'art (écluses, barrages...) ainsi que 2.500 bâtiments (administratifs ou d'exploitation, maisons éclusières...) que l'établissement s'attache à entretenir et à valoriser. L'établissement emploie 4.700 agents sur l'ensemble de son territoire, dont 4.200 agents publics et 500 de droit privé. Son siège social se trouve à Béthune.

2. Historique

VNF est créé en 1991 sous l'impulsion de Michel Rocard, alors Premier ministre. L'établissement succède à l'Office National de la Navigation (ONN). Sa création repose sur la nécessité de reconquérir le réseau fluvial, tant pour l'alimentation en eau des populations, des terres agricoles et du secteur industriel que pour le développement du transport, du tourisme et des loisirs.

Le 1er janvier 2013, VNF passe du statut d'Établissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC), alors affilié au Ministère des Transports, à celui d'Établissement Public Administratif (EPA) sous la tutelle du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer. L'établissement regroupa dès lors les 400 agents de l'EPIC ainsi que les agents de L'État des services de navigation mis à disposition de VNF avant 2013.

3. Missions

Les missions de VNF sont nombreuses et assurent la bonne exploitation de la voie d'eau, la qualité des services apportés aux usagers, ainsi que son développement, que ce soit au niveau environnemental, touristique ou commercial. Ses principales missions sont :

- Exploiter, entretenir, moderniser et développer son réseau,
- Gérer le domaine public confié par L'État,
- Promouvoir et développer le transport fluvial,
- Promouvoir et développer les activités touristiques sur la voie d'eau,
- Assurer la gestion des masses d'eau dans son réseau,
- Participer au développement durable et à l'aménagement du territoire,
- Assurer le bon état écologique des masses d'eau,
- Valoriser le patrimoine et le domaine public fluvial,
- Assister les autorités de L'État en matière de police de la navigation.

4. Organisation

VNF est organisé autour d'un siège à Béthune et de 7 directions territoriales (DT) gérant chacune une partie du territoire de l'établissement :

- DT Bassin de la Seine, basée à Paris,
- DT Centre-Bourgogne, basée à Dijon,
- DT Nord-Est, basée à Nancy,
- DT Nord-Pas-de-Calais, basée à Lille,
- DT Rhône-Saône, basée à Lyon,
- DT Strasbourg, basée à Strasbourg,
- DT Sud-Ouest, basée à Toulouse.

Le siège est l'organisme de VNF en relation avec les administrations centrales avec qui il définit les politiques à suivre sur l'ensemble de son territoire. Ses services supervisent et coordonnent les actions des différentes directions territoriales et leur transmettent les directives à suivre.

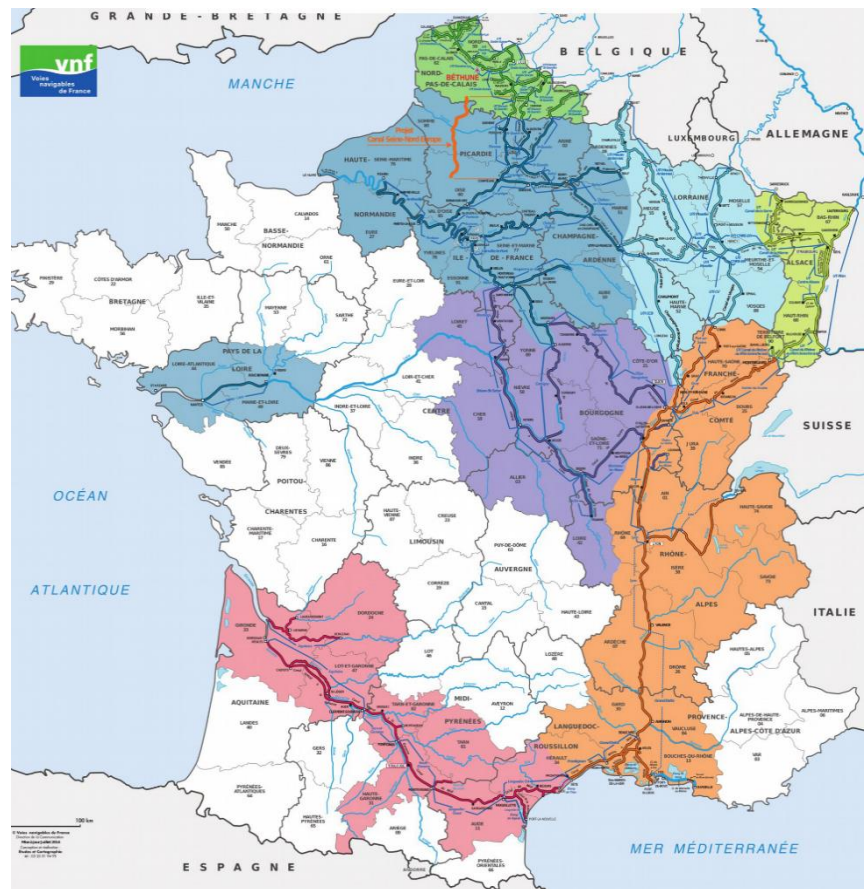


Figure 1 : Réseau national de VNF

Les directions territoriales sont globalement indépendantes les unes des autres, chacune gère et exploite son réseau en accord avec les décisions prises par le siège. Les interactions pouvant exister entre les différentes DT se font généralement dans le cadre de jonctions entre les réseaux de leurs territoires respectifs, ou alors dans le cadre d'échanges d'informations relatives à des opérations similaires. Chaque DT organise ses services de façon à répondre au mieux aux exigences et aux particularités du secteur qu'elle a en charge.

5. Au sein de la Direction Territoriale de Strasbourg

La direction territoriale de Strasbourg (DTS), qui compte 450 agents, est l'une des 7 directions de VNF; elle gère 480 km de voies d'eau dont 190 km à grand gabarit principalement le long du Rhin. Cette voie de navigation dessert 5 pays : la Suisse, l'Allemagne, la Belgique, les Pays-Bas et la France, ce qui en fait un axe commercial et touristique de premier ordre. Son réseau s'étend sur 5 départements et 2 régions : Grand Est et Bourgogne-Franche-Comté. Les voies d'eau traversent certaines villes d'importance telles que Strasbourg, Mulhouse ou Colmar.

Les unités territoriales de la DTS exploitent plus de 160 écluses, 3 étangs réservoirs, un barrage réservoir ainsi qu'un ascenseur à bateau : le plan incliné de Saint-Louis/Arzwiller, ouvrage unique en France.

Le réseau est subdivisé en secteurs gérés par des unités territoriales (UT) qui assurent au quotidien l'exploitation et le maintien du linéaire et des ouvrages ; elles sont au nombre de cinq :

- l'unité territoriale Canal de la Marne au Rhin (UT CMR)
- l'unité territoriale Centre Alsace (UT CA)
- l'unité territoriale Canal du Rhône au Rhin Branche Sud (UT CRRBS)
- l'unité territoriale Canal de la Sarre (UT CS)
- l'unité territoriale du Rhin (UT Rhin)

La carte du réseau, présentée ci-contre, est également présente en **Annexe 1** pour plus de lisibilité.

Le Travail de fin d'étude est hébergé au sein du Service Technique de la Voie d'Eau (STVE), et plus précisément au Bureau de Maîtrise d'Ouvrage. Cependant, de nombreux acteurs sont sollicités dans les autres pôles du STVE, comme l'unité fonctionnelle Eau, Environnement, Risque (EER), ou encore dans les UT, garantes de la connaissance du réseau et de son fonctionnement.

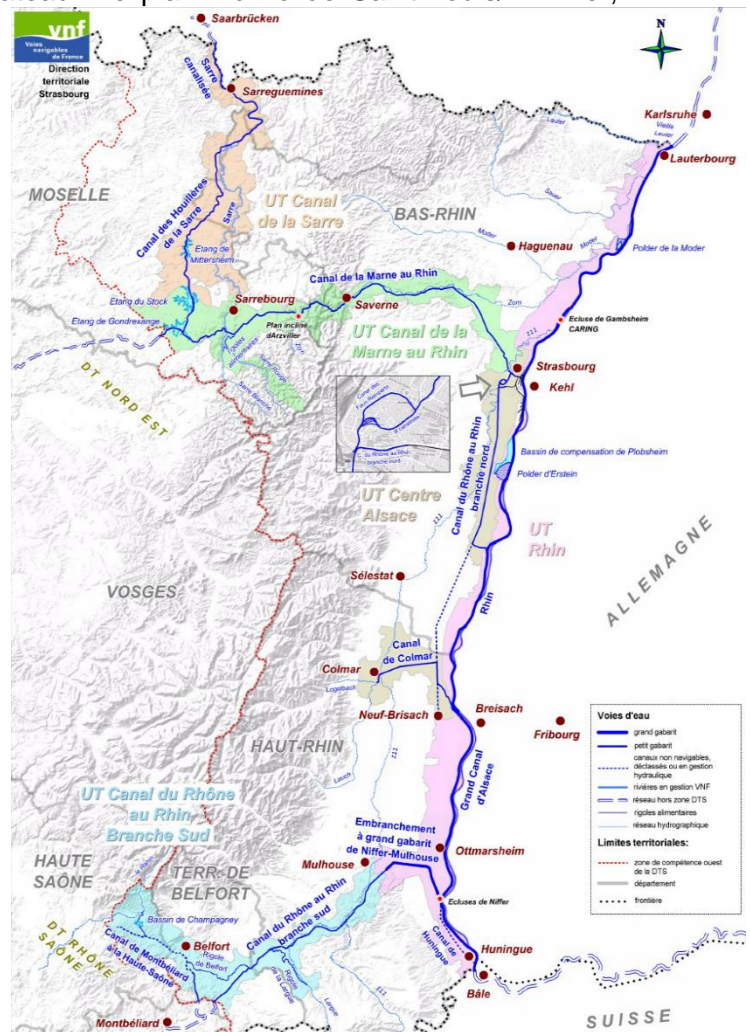


Figure 2 : Réseau de la DTS

2. Objectifs

Voies navigables de France (VNF) est un gestionnaire majeur du domaine public fluvial ainsi qu'un acteur important du développement durable dans les territoires. L'établissement souhaite valoriser son réseau ainsi que ses nombreux ouvrages, notamment grâce à la production d'énergies renouvelables. Compte-tenu des domaines d'activités de VNF, l'hydroélectricité est un secteur de choix à étudier et développer.

Nombre de sites ne sont pas ou peu pertinents à équiper en raison du faible potentiel qu'ils représentent pour des techniques de production dites « classiques », se basant sur la récupération d'énergie potentielle, et donc surtout liée à une hauteur de chute.

Cependant, de nouvelles technologies sont mises au point en laboratoire afin de valoriser les sites autrefois « inintéressants », que ce soit en récupérant l'énergie cinétique de

l'écoulement, ou juste en s'adaptant aux très faibles chutes ; ces nouvelles techniques permettraient de développer et de valoriser une grande partie du réseau VNF.

Des enseignants-chercheurs du laboratoire ICube travaillent actuellement sur ces thématiques et sont très intéressés par la possibilité de collaborer en bonne intelligence avec VNF afin de tester leurs prototypes et leurs modèles. Cela permettrait également de réfléchir aux contraintes de ces systèmes sur l'exploitation et la gestion de notre réseau et de nos missions.

Une première réflexion avait déjà été portée au cours de l'année 2018 sur la production d'énergie d'hydroélectricité au droit de certains ouvrages strasbourgeois sur l'Ill : les barrages de l'Abattoir, de l'Aar, de la Robertsau, ainsi que le pertuis de la Petite France. Cette étude avait pour but d'étudier le potentiel de chaque site dans différentes configurations de débits, de gestion, et d'aménagements, en prenant en compte le contexte propre dans lequel chaque ouvrage s'inscrit.

L'approche avait été relativement classique en ne s'intéressant qu'à la seule récupération d'énergie potentielle aux ouvrages. Les réflexions portées sur les aménagements et l'exploitation ont permis d'affiner l'étude et de dégager les sites présentant le plus d'intérêt, parmi lesquels le barrage de l'Abattoir. Une analyse financière générale a par la suite été adjointe à l'étude afin de la compléter.

A l'occasion de ce TFE, la Direction Territoriale de Strasbourg entend élargir le périmètre de l'étude de potentiel hydroélectrique à l'ensemble de son réseau, en portant une attention particulière à la place de la petite hydroélectricité ainsi qu'aux solutions innovantes proposées par ICube.

3. Méthodologie

Le travail de fin d'étude porte sur les perspectives hydroélectriques de la Direction Territoriale de Strasbourg, ce qui concerne surtout la micro et la pico-hydroélectricité. Cela comprend dans un premier temps le diagnostic du fonctionnement du réseau et de ses ouvrages, permettant ainsi la recherche de sites pouvant accueillir une turbine et/ou présentant un potentiel intéressant, sur l'ensemble du territoire de la DTS.

Pour chaque site, la phase suivante comprend la collecte et l'analyse de données, la définition des besoins pour mener à bien l'étude, ainsi que la mise en place éventuelle de campagnes de mesures (bathymétriques, débitmétriques, etc.). Sont alors définis les sites et les techniques les plus pertinents pour l'installation d'une turbine, ou encore d'un site pilote pour un prototype.

Cette collecte de données se mène sur plusieurs fronts : les bases de données spécifiques aux caractéristiques d'ouvrages ; les plans d'archives ; les rapports d'études historiques menées en divers points du réseau ; les logiciels de gestion hydraulique (en phase test) ; les chroniques et relevés hydrauliques stockés localement sur le terrain, et bien sûr l'échange avec les agents d'exploitation et les services compétents. Chaque site est alors étudié du point de vue de son productible et des aménagements réalisables, complété par une estimation coût/bénéfices des équipements alors envisagés. Le laboratoire de recherche peut être sollicité pour son expertise à ce sujet.

B. Introduction à l'hydroélectricité

1. Enjeu énergétique

Parmi les nombreux enjeux auxquels notre société s'efforce de faire face se trouve la problématique liant énergie et changement climatique. Ce dernier est un phénomène fortement influencé par les activités anthropiques des deux derniers siècles, si bien qu'on considère souvent 1850 comme le tournant majeur en matière de changement climatique. C'est en effet à cette période que les systèmes industriels se développent, que les modèles de sociétés changent, et que la consommation énergétique prend son envol. Cette révolution industrielle repose avant tout sur l'utilisation de sources d'énergie fossiles comme nouveaux combustibles. L'exploitation de ces ressources carbonées s'est développée jusqu'à nos jours, assurant grâce au charbon, au gaz naturel et au pétrole une importante source d'énergie.

Une des problématiques majeures de cet état de faits concerne les émissions gazeuses résultant de la combustion de ces ressources : la concentration de ces gaz carbonés dans notre atmosphère n'a cessé d'augmenter depuis la révolution industrielle, entraînant une hausse globale de la température à la surface de la Terre d'environ 1°C, c'est la raison pour laquelle ces gaz, tels que le dioxyde de carbone (CO₂) ou le méthane (CH₄) pour ne citer que les plus emblématiques, sont communément appelés « gaz à effets de serre ». Parmi les causes de ce réchauffement se trouve l'utilisation des ressources fossiles pour la production d'électricité, pour les moyens de transports et les industries. Elles ont certes permis un réel confort de vie et de production pendant près de deux siècles ; mais ont eu pour effet l'émission massive de ces gaz, alors que parallèlement leurs capacités de dégradations ont été fortement amoindries avec le développement de techniques d'agriculture intensives et une déforestation massive.

Ce changement de température, lié aux activités humaines, est à l'origine d'une modification rapide des phénomènes climatiques, dont les répercussions sont ressenties à chaque strate de notre environnement : fonte des glaces, modifications des températures et des niveaux d'eaux, perturbations des habitats et des ressources biotiques, accentuation des phénomènes météorologiques extrêmes.

Dans le but de limiter les perturbations sur le climat, la biosphère, notre environnement et nos sociétés, il est par conséquent primordial de diminuer les émissions de ces gaz à effets de serre. C'est l'objectif poursuivi depuis quelques décennies par certains pays, réunis lors de sommets internationaux ayant pour but de définir les seuils à respecter et les mesures à prendre. Ces accords sont primordiaux dans la tenue d'un effort global et d'une trajectoire mondiale commune et efficace. Le protocole de Kyoto, signé en 1997, marque la volonté nouvelle de ces états de répondre aux enjeux climatiques du 21^{ème} siècle.

S'il est primordial de s'entendre sur la nécessité de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, reste la question des solutions à mettre en œuvre. Bien sûr, une réflexion profonde doit être menée afin de revoir nos modes de production et de consommation, aux niveaux individuels et collectifs. Parallèlement, une partie du problème est liée à la production d'énergie à partir de sources fossiles : une partie de la solution est donc de trouver d'autres sources d'énergie, de manière à limiter nos rejets gazeux dans l'atmosphère. S'il existe de nombreuses autres sources d'énergie, nous n'allons cependant évoquer ici que les sources d'énergie dites « renouvelables » ; c'est-à-dire dont les réserves se régénèrent suffisamment vite à l'échelle humaine pour fournir une alternative durable aux ressources fossiles, dont la formation est beaucoup plus lente. Ces énergies alternatives participent également à la diminution de la part du nucléaire dans le bilan énergétique mondial en général, et français en particulier.

On en distingue cinq familles :

- Le solaire : l'énergie du rayonnement solaire est captée par des panneaux photovoltaïques, qui la convertissent en énergie électrique ;
- La biomasse : l'énergie est produite grâce à la combustion de matières organiques, typiquement des végétaux, dont la ressource se régénère de façon pérenne ;
- La géothermie : les fortes températures en profondeur permettent de chauffer de l'eau et ainsi de récupérer cette énergie thermique ;
- L'éolien : l'action du vent sur les éoliennes permet de transformer une énergie cinétique en énergie mécanique : c'est le principe du moulin à vent. Un alternateur peut convertir cette énergie mécanique en électricité ;
- L'hydraulique : la capacité d'écoulement de l'eau est utilisée pour produire une énergie mécanique : c'est le principe des roues à aubes. Là encore, un alternateur permet la production d'électricité, on parle alors d'hydroélectricité. Cela inclut l'énergie potentielle et cinétique des rivières, des marées et des courants maritimes.

Ces sources d'énergie renouvelables sont de plus en plus utilisées, que ce soit grâce à la volonté de réduire les émissions de gaz à effet de serre ou bien à cause de la diminution progressive de sources d'énergies non-renouvelables.

2. Hydroélectricité

L'énergie hydraulique est utilisée depuis l'Antiquité afin de fournir un travail mécanique, un mouvement. Les norias et les roues à aubes des moulins ont fonctionné et fonctionnent encore grâce à la conversion de cette énergie hydraulique en énergie mécanique ; ce n'est que plus récemment que ces systèmes ont été complétés avec l'ajout d'alternateurs permettant la production d'électricité grâce aux mouvements des turbines.

L'énergie hydraulique désigne l'énergie de la masse d'eau, ce qui correspond à l'énergie potentielle du fluide ainsi qu'à son énergie cinétique. Différentes turbines ont été développées afin de favoriser la récupération d'un type d'énergie préférentiellement et ainsi s'adapter aux différentes configurations rencontrées. Des turbines sont dimensionnées pour certaines hauteurs de chutes, d'autres pour certains débits, d'autres encore ne nécessitent qu'une vitesse d'écoulement pour produire de l'électricité.

Ainsi, il est possible d'équiper un grand nombre de sites présentant des configurations très éloignées. Les techniques employées et les aménagements nécessaires sont également très différents.

La récupération de l'énergie potentielle de l'eau a fait l'objet de nombreuses recherches et est à l'origine de la plupart des aménagements hydroélectriques dans le monde. Pour la valorisation de l'énergie potentielle, on distingue généralement quatre types de centrales :

- **Les centrales de lac** ; associées à un barrage d'altitude créant une retenue d'eau artificielle. Le turbinage de cette réserve d'eau permet d'ajuster rapidement la production électrique ;
- **Les centrales d'éclusées** ; elles aussi associées à un réservoir, mais plus réduit, ce qui permet une vidange et un remplissage rapide. Elles s'adaptent donc aux besoins de production et aux heures creuses ;

- **Les centrales de transfert d'énergie par pompage** ; fonctionnant avec deux réservoirs, haut et bas. L'eau est turbinée depuis le réservoir haut vers le réservoir bas en période de forte consommation ; puis pompée dans le sens inverse aux heures creuses afin de re-remplir le réservoir haut. Cela permet de stocker l'énergie produite en excès sous forme d'énergie potentielle.
- **Les centrales au fil de l'eau** ; installées généralement en travers des rivières ou des fleuves. Elles sont caractérisées par de faibles hauteurs de chutes, mais également par un important débit. Elles produisent en continu et sont difficilement modulables. La production de ces centrales est dite « fatale », quand les autres sont relativement adaptables aux besoins.

La puissance potentielle brute P_{pot} (W) présente sur un site dépend ici de quatre paramètres : la masse volumique de l'eau ρ (kg/m³), l'accélération de la pesanteur g (m/s²), le débit Q (m³/s), et la hauteur de chute h (m).

$$P_{pot} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h$$

Les systèmes se focalisant sur la récupération de l'énergie cinétique de l'eau sont communément appelés « hydroliennes ». Ils ne nécessitent aucune hauteur de chute, le paramètre influençant le plus leur production étant la vitesse de l'eau.

Ces technologies sont actuellement moins développées que les précédentes, les conditions de vitesses nécessaires pour les technologies éprouvées étant très limitantes quant aux sites d'installation. La plupart ont été développées en milieu marin afin de bénéficier des forts courants lors des phénomènes de marées, ainsi que de grandes surfaces présentant un champ de vitesses homogènes, ce qui est indispensable au bon fonctionnement de grandes hydroliennes. Le développement de systèmes moins contraignants et plus adaptables aux différentes gammes de vitesses présentes notamment à l'intérieur des terres est un terrain encore jeune qui entend valoriser les nombreux sites jusque-là laissés de côté.

La puissance cinétique brute P_{cin} (W), dépend ici de trois paramètres : la masse volumique de l'eau ρ (kg/m³), la section d'écoulement S (m²), et la vitesse v du fluide (m/s).

$$P_{cin} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$$

Dans un cas comme dans l'autre, la puissance nette de l'installation dépend du rendement η total des ouvrages, et de la puissance installée. L'énergie produite E (Wh) par ce type de centrale dépend de la puissance installée nette et de la durée de turbinage t (h) généralement exprimé sur une l'année.

$$P_{nette} = P \cdot \eta$$

$$E = P_{nette} \cdot t$$

3. Etat de l'art

Il existe de nombreux types de turbines, permettant ainsi de s'adapter et de valoriser un grand nombre de situations. Les plus emblématiques sont présentées ci-après.

On distingue les turbines à action des turbines à réaction. Les premières fonctionnent en récupérant uniquement une énergie cinétique apportée par un ou plusieurs jets d'eau dirigés contre les augets en périphérie d'une roue. Cela entraîne la rotation de la roue au niveau de son axe. Les principales turbines à action sont présentées ci-après.

1. Les roues hydrauliques

Les roues hydrauliques font partie des plus anciens types d'aménagements utilisant l'énergie hydraulique. Leur principe est que l'action de l'eau en mouvement sur les pales de la roue entraîne sa rotation autour d'un axe. Ces systèmes ont un rendement moyen de 70% environ.

On distingue les roues verticales et horizontales. Parmi les roues verticales, plusieurs types se dégagent :

- Les roues par-dessus, pour lesquelles l'arrivée d'eau se fait au niveau de la partie supérieure de la roue. Adaptées aux débits inférieurs à 150 l/s et aux hauteurs de chute allant de 3 à 10 mètres, elles sont généralement alimentées par un canal d'amenée couplé à une vanne de régulation arrivant au-dessus de la roue, et à un canal de fuite situé en aval et sous la roue.
- Les roues par-dessous, pour lesquelles l'arrivée d'eau se fait au niveau de la partie inférieure de la roue. Leur rendement est moindre que celui de la roue par-dessus. Elles sont utilisées pour des débits inférieurs à 1 m³/s. Il n'y a pas de discontinuité entre le canal amont et aval, leur niveau étant sensiblement le même, les aménagements sont donc peu importants.
- Les roues poitrine, pour lesquelles l'arrivée d'eau se fait à mi-hauteur de la roue. L'amenée d'eau épouse la forme courbe de la roue sur sa partie inférieure. Ces roues fonctionnent pour des hauteurs de chute allant jusqu'à 3 mètres et des débits inférieurs à 1 m³/s.

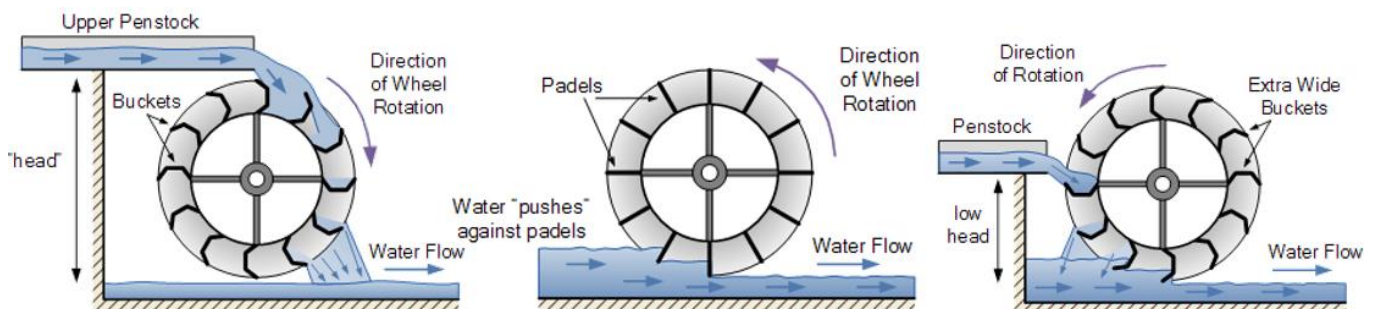


Figure 3 : Schémas, de la gauche vers la droite, de roues par-dessus, par-dessous, et poitrine – Source : Alternative Energy Tutorials

Les roues horizontales fonctionnent grâce à l'action sur leurs pales d'un jet d'eau concentré à l'aide d'une buse. Elles sont utilisées pour des chutes allant de 6 à 8 mètres et des débits inférieurs à 0,2 m³/s.

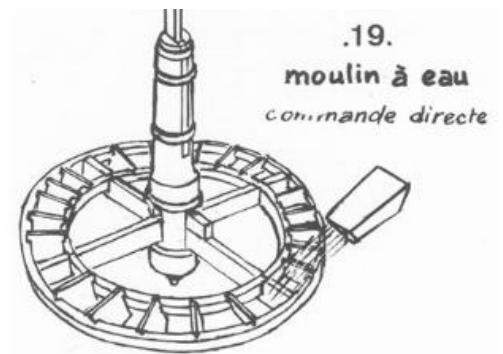


Figure 4 : Schéma d'une roue horizontale - Source : "Les Moulins", Jean Orsatelli 1979

2. Les turbines Banki-Michell (ou Cross-Flow)

Leur principe de fonctionnement s'approche de celui des roues hydrauliques, si ce n'est que l'eau effectue deux passages sur les aubes et non pas un. Cela est dû à la conception de la turbine qui se présente comme un tambour avec des pales à sa périphérie, enchâssées dans une bêche. Le fluide étant turbiné deux fois, la récupération d'énergie est meilleure, avec un rendement de l'ordre de 85%.

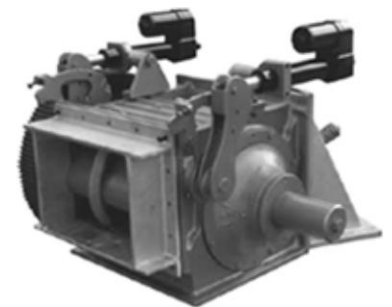
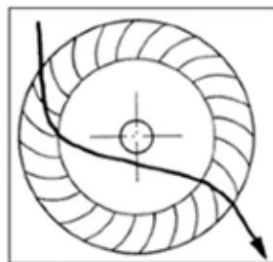


Figure 5 : Turbine Banki - Source : Moulin de Wanlin

Cette turbine peut être utilisée jusqu'à 200 mètres de hauteur de chute et 5 m³/s.

3. Les turbines Pelton

Ce type de turbine est composé d'une roue dont les augets ont une forme significative de double cuillère. L'eau est envoyée sous forme de jets continus et concentrés grâce à une ou plusieurs buses, entraînant ainsi la rotation de la roue. Celle-ci peut d'ailleurs être verticale ou horizontale, suivant le positionnement des buses. Ces turbines sont utilisées pour des chutes supérieures à 100 mètres et des débits compris entre 0,2 et 8 m³/s ; elles ont un très bon rendement de 85%.

Une version modifiée de la turbine Pelton a été développée par la suite, la turbine Turgo, dont la forme des augets a été modifiée. Elle présente un rendement légèrement supérieur.

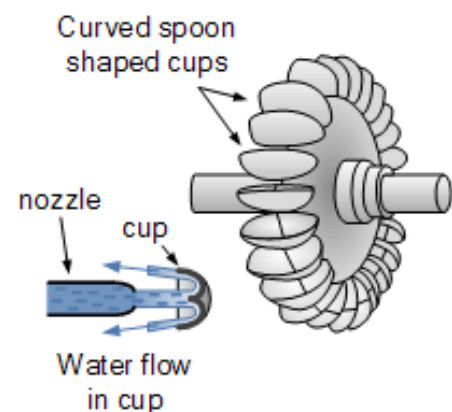


Figure 6 : Schéma d'une turbine Pelton - Source : Alternative Energy Tutorials

Les turbines dites à réaction, ou turbines noyées, ont quant à elles un fonctionnement reposant sur la mise en place d'un tourbillon grâce à une bêche ou des aubes, et le turbinage de ce tourbillon par une roue à aubes. Ces aubes sont profilées à la manière d'une aile d'avion, et sont mises en mouvement par la différence de pression s'exerçant à travers les différentes faces de l'aube.

4. Les turbines Francis

Elles sont composées d'une bêche en forme de spirale, d'un distributeur et d'une roue.

L'arrivée d'eau dans la bêche se fait par une conduite forcée ; au centre de la bêche se trouve le distributeur qui régule le débit et oriente le fluide vers l'entrée de la roue, de façon radiale. La sortie de l'eau du distributeur entraîne la rotation des aubes de la roue. L'eau est évacuée de façon axiale grâce à un diffuseur, à moindre pression.

Ces turbines sont utilisées pour des hauteurs de chute allant jusqu'à 300 mètres. Leur rendement est généralement de 85% et jusqu'à 96% en laboratoire.

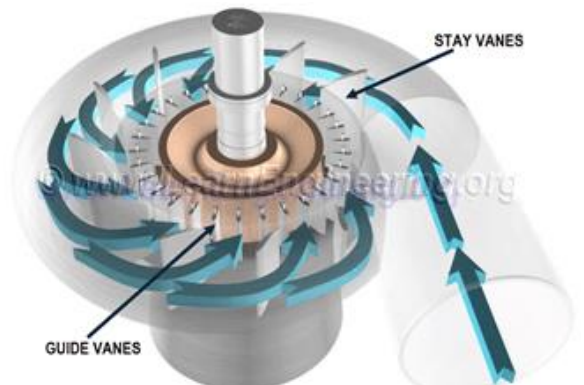


Figure 7 : Schéma d'une turbine Francis - Source : The Constructor

5. Les turbines à hélice et Kaplan

La roue de ces turbines est semblable à une hélice de bateau. Les turbines hélice ont des pales fixes tandis que les turbines Kaplan en ont des réglables. Il existe un grand nombre de configuration possibles pour ce type de turbines que ce soit au niveau des pales, du fonctionnement fixe ou mobile du distributeur, ou encore du type d'écoulement : radial comme pour une turbine Francis, ou bien semi-axial, comme pour des turbines bulbes.

Ces systèmes permettent d'exploiter des débits allant jusqu'à 350 m³/s, mais seulement pour des hauteurs de chute n'excédant pas les 40 mètres. Leur rendement est de l'ordre de 90%.

Les turbines Kaplan ont également servi d'inspiration aux turbines VLH (Very Low Head) pour de très faibles chutes, entre 1,5 et 5 mètres, mais n'excédant pas les 27 m³/s de débit admissible. Leur rendement est de 80%. Ces systèmes VLH ne gênent pas le passage de poissons et sont conçus pour être facilement installables et accessibles pour leur maintenance ou leur manipulation.

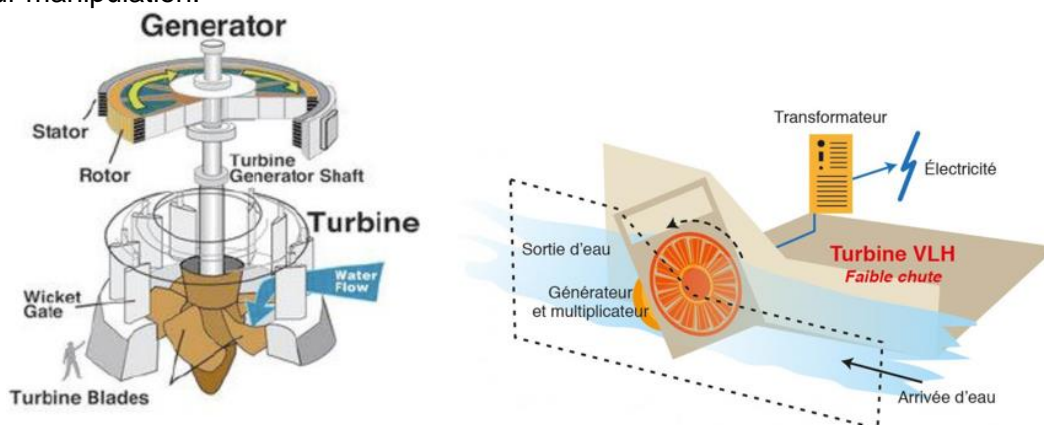


Figure 8 : Schémas d'une turbine Kaplan (gauche) et VLH (droite) - Sources : S.K. Engineering Corporation / Envinergy

6. Les vis hydrodynamiques ou vis d'Archimède

Les vis d'Archimède, conçues durant l'Antiquité pour élever de l'eau, ne sont utilisées pour produire de l'hydroélectricité que depuis 1992. La turbine est constituée d'une vis d'Archimède, inclinée, à l'intérieur d'un caisson ajouré. L'énergie potentielle de l'eau entraîne la rotation de la vis. La vitesse de rotation de la vis étant faible, un multiplicateur de vitesse doit généralement être utilisé.

Ce système est adapté aux faibles chutes, comprises entre 0,8 et 7 mètres, pour des débits n'excédant pas 10 m³/s. Le rendement atteint est de l'ordre de 80%.

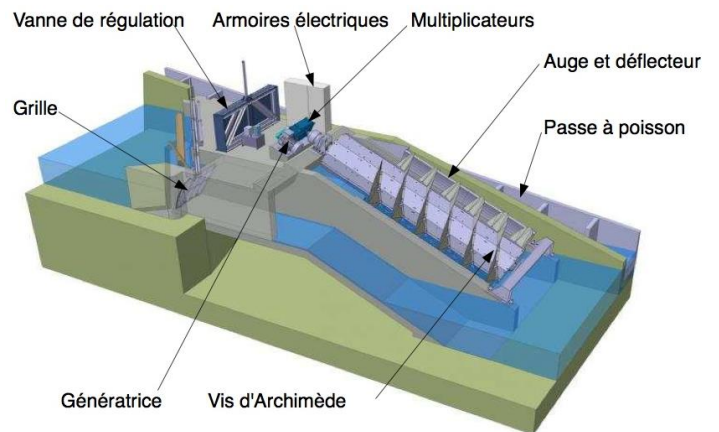


Figure 9 : Schéma d'une vis hydraulique – Source : Eduscol

7. Diagramme récapitulatif

Ainsi, chaque turbine présente un domaine d'application découlant de ses caractéristiques. Le choix de l'installation dépend entre autres des contraintes du site, des conditions de turbinage et du productible attendu.

Le diagramme ci-dessous présente les domaines respectifs des turbines présentées.

« Overshot/Undershot Waterwheel » correspond aux roues par-dessus/dessous ; Crossflow correspond aux turbines Banki-Michell ; et Archimedes Screw renvoie aux vis d'Archimède.

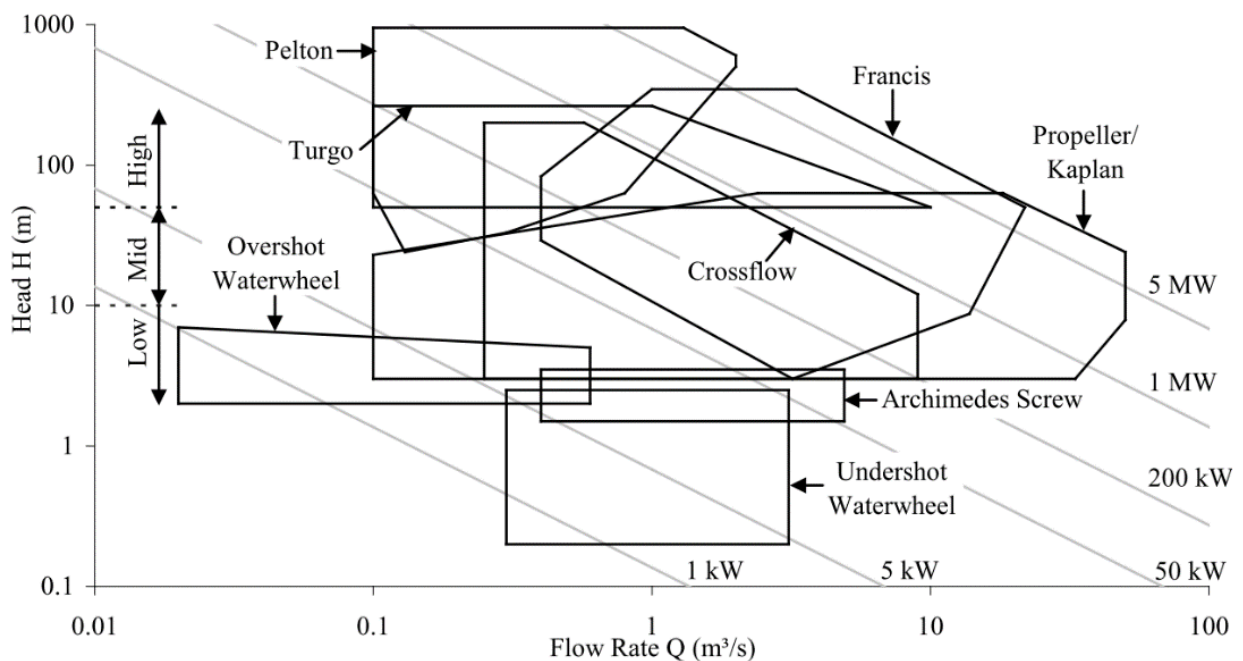


Figure 10 : Diagramme d'utilisation de différentes turbines – Source : Williamson et al. [2014]

8. Prototypes pour énergie cinétique : Vis d'Archimède Horizontale et Cylindre Oscillant

Sera également étudiée la possibilité de mettre en place ces systèmes, bien qu'encore en développement et ne faisant l'objet d'aucune optimisation importante ni de retour d'expérience. Ces dispositifs se veulent rustiques, peu contraignants et peu intrusifs. Etant développés pour récupérer l'énergie cinétique d'un écoulement, ils ne nécessitent pas de chute d'eau pour être installés.

La Vis d'Archimède Horizontale se focalise sur la récupération de l'énergie de surface de l'écoulement. Elle est positionnée à moitié immergée à la surface libre, avec un angle différent légèrement de l'axe perpendiculaire à l'écoulement. Fonctionnant pour des vitesses de l'ordre de 1 m/s, il est envisagé de la positionner au niveau des sorties de vannes levantes, là où des vitesses importantes sont présentes. Son rendement est de l'ordre de 30%

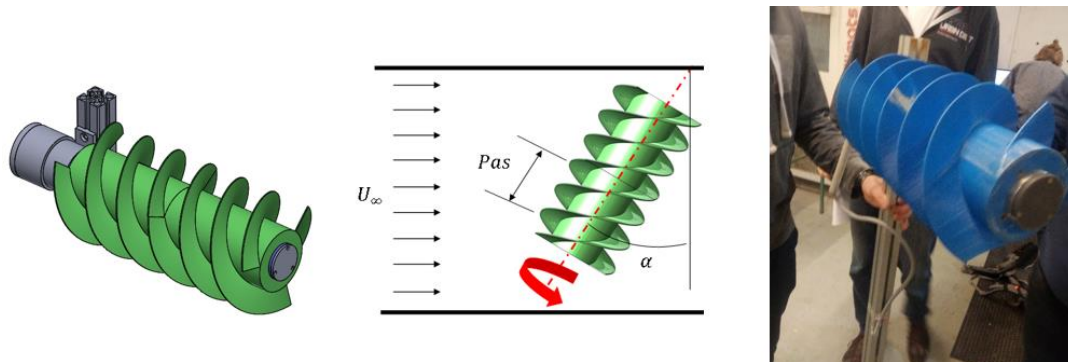


Figure 11 : Schéma et image d'une Vis d'Archimède Horizontale – Source : ICube

Le Cylindre Oscillant est un cylindre simple fixé sur un bras vertical avec ressort. Il est totalement immergé dans l'écoulement, si bien qu'immédiatement à l'arrière du cylindre se forment des zones de dépressions provoquant son déplacement vertical, et la formation de nouvelles zones de dépressions : le cylindre est ainsi dans un mouvement d'oscillations auto entretenu. C'est ce mouvement qui est utilisé pour produire de l'énergie.

Le cylindre oscillant fonctionne pour des vitesses inférieures à 1 m/s, et présente un rendement de 20% environ.

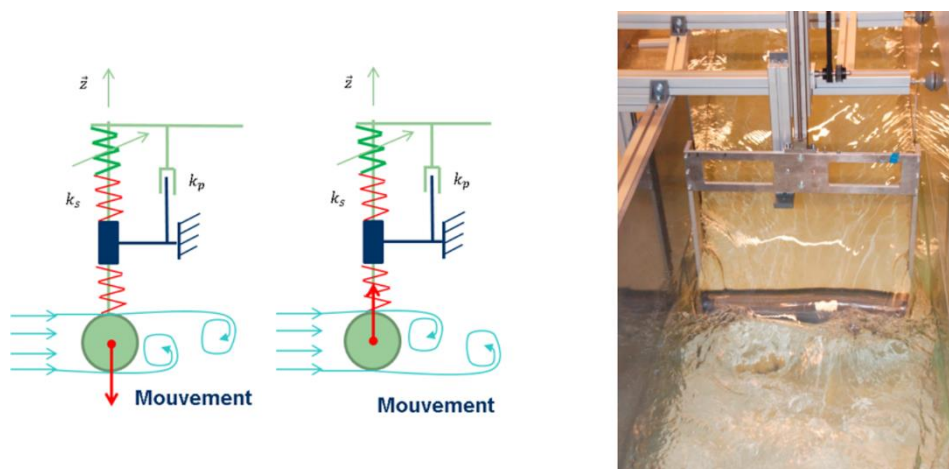


Figure 12 : Schéma et image d'un Cylindre Oscillant – Source : ICube

II. Evaluation du potentiel hydroélectrique

A. Diagnostic réseau

1. Fonctionnement du réseau et système alimentaire

La DTS présente un nombre important d'ouvrages et d'infrastructures afin d'assurer de bonnes conditions de navigation sur son réseau. Si certains sont surtout dédiés directement à la circulation des usagers, comme les écluses ou le plan incliné, la plupart sont exploités pour la gestion hydraulique du secteur.

En effet, la gestion hydraulique représente l'activité prépondérante de VNF, lui permettant de gérer l'alimentation en eau de ses canaux en toute saison, le niveau des biefs et les cotes de navigation, les débits réservés pour le milieu naturel, ainsi que la gestion des crues et des étiages.

De façon générale, l'alimentation en eau du réseau de la DTS se fait au travers de plusieurs prélèvements ponctuels sur le milieu naturel, certains alimentant des espaces de stockage en amont du réseau. Ces espaces de stockage délivrent ponctuellement d'importants volumes qui sont transférés et répartis vers l'aval de manière à alimenter tous les biefs. Suivant les situations, l'alimentation du bief aval au niveau d'une écluse peut se faire grâce à un aqueduc de contournement, par les vantelles des portes, par surverse des portes ou encore par bassinées.

En détails, voici comment se fait la gestion hydraulique pour chaque unité territoriale :

1. Unité Territoriale Canal de la Sarre (UT CS)

L'UT CS s'étend de l'étang du Stock, au sud, jusqu'à Sarreguemines au nord. Le canal de la Sarre est la seule voie d'eau de cette UT. L'étang de Mittersheim sert de réservoir tampon pour ce canal, et est principalement alimenté grâce à l'étang du Stock, plus au sud. De plus, une station de pompage à Wittring permet de prélever l'eau de la Sarre pour l'alimentation du canal.

La plupart des biefs sont équipés de déversoirs latéraux afin de maintenir les niveaux d'eau et d'écrêter les crues des biefs. Les surplus sont évacués vers le milieu naturel ou l'étang de Mittersheim.

L'étang du Stock est situé à environ 260 m d'altitude, alors que Sarreguemines est à 200 m d'altitude. Les écluses permettent donc le franchissement des 60 mètres de dénivelé d'une extrémité à l'autre du réseau de cette UT.

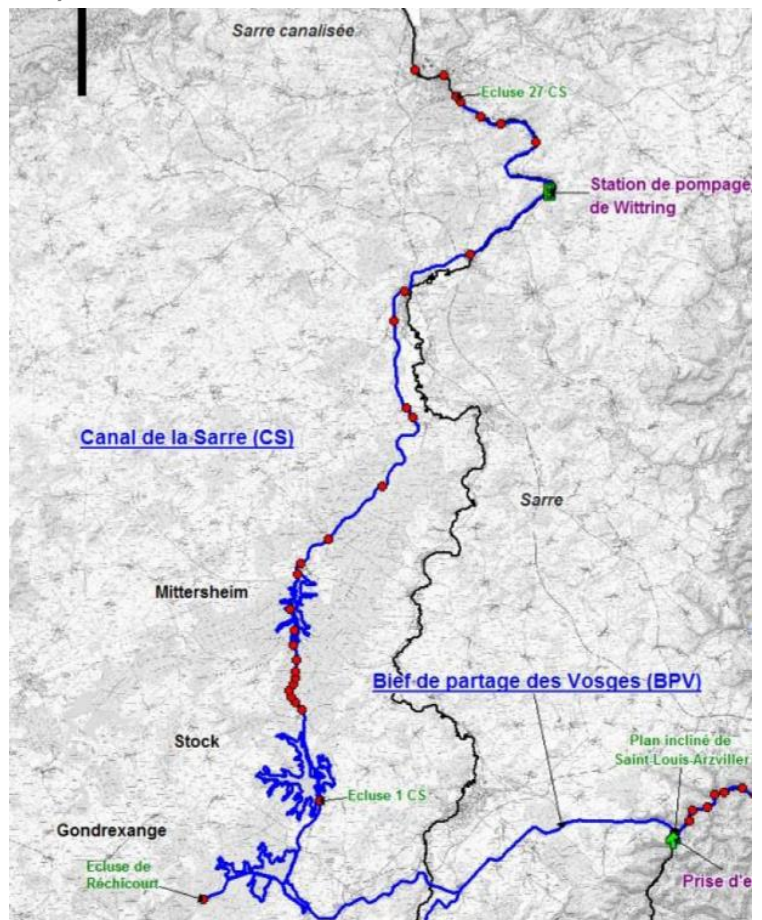
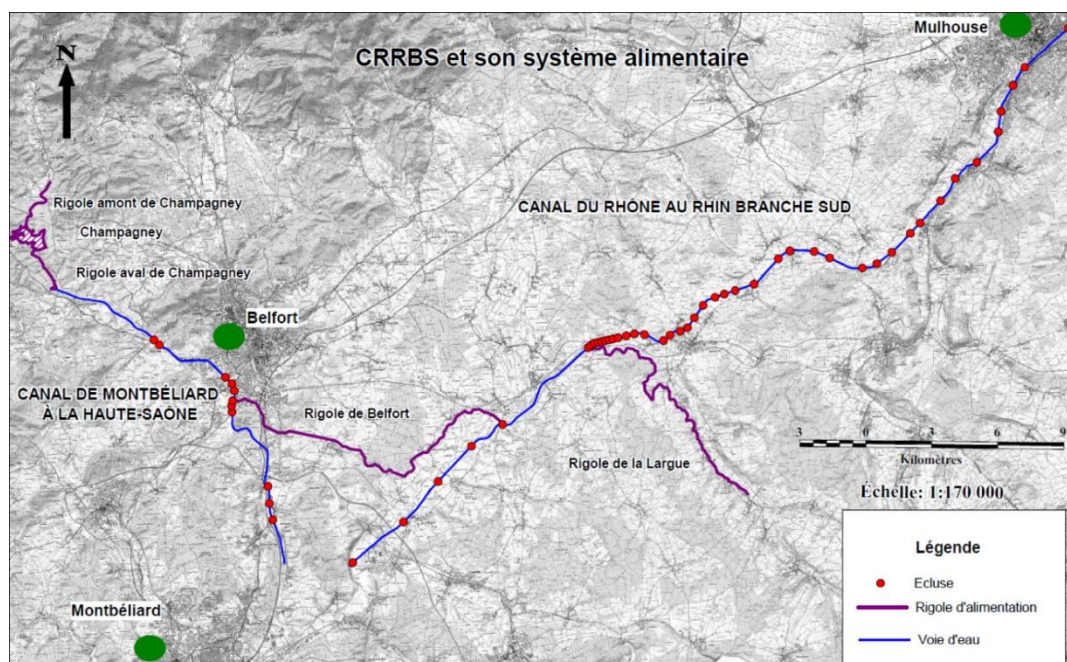


Figure 13 : Carte de l'UT CS et son système alimentaire

2. Unité Territoriale Canal du Rhône au Rhin Branche Sud (UT CRRBS)



L'UT CRRBS se situe au sud du réseau s'entend globalement de Belfort à Mulhouse et relie l'UT Rhin, à grand gabarit, à l'est avec la Direction Territoriale Rhône-Saône à l'ouest (en direction de Montbéliard).

Le système alimentaire comprend, de l'amont vers l'aval, un barrage de prise d'eau sur le Rahin, alimentant une rigole servant au remplissage du barrage réservoir de Champagne. Cet ouvrage imposant permet d'ajuster l'alimentation des biefs tout au long de l'année mais supporte surtout la quasi-totalité du soutien d'étiage, les autres apports étant des prises d'eau directes sur rivières, sans stockage, et donc fortement diminués en périodes sèches. Une rigole relie le barrage de Champagne au Canal de Montbéliard à la Haute-Saône (CMHS) puis à la rigole de Belfort afin de rejoindre finalement bief de partage et le réseau navigable. Une partie de l'alimentation est donc dirigée vers le réseau de la DTRS. Sur la partie de la DTS, plusieurs rivières se jettent directement dans le canal, sans régulation. Une dernière prise d'eau est présente sur la Largue. Une rigole d'amenée achemine l'eau prélevée jusqu'au bief de partage. Le canal se confond avec l'Ill à Illfurth, où un barrage permet la séparation entre la rivière et le canal plus à l'aval tout en maintenant le niveau amont sur l'Ill navigable. La même configuration se répète quelques kilomètres en aval, à Zillisheim, avec deux barrages en parallèle, permettant le maintien du niveau amont navigable et le débit réservé de la rivière.

En plus de ces deux ensembles de barrages, des déversoirs sont présents le long du canal afin de maintenir le niveau de chaque bief et ainsi lutter contre les crues. L'eau écrêtée est rejetée dans les nombreux ruisseaux avoisinant le canal.

A titre d'exemple, les prélèvements de Champagne s'élèvent en moyenne à 12 millions de mètres cubes chaque année, et ceux sur la Largue à 4 millions. Ces prélèvements sont complétés par l'assimilation de plusieurs rivières ainsi que les apports importants du bassin versant, mais limités par les fuites du réseau et l'évaporation.

Le dénivelé depuis le Rahin jusqu'à Mulhouse est de 173 mètres, mais sur le réseau navigable il est n'est plus que de 95 mètres.

3. Unité Territoriale Rhin (UT Rhin)

L'UT Rhin sera très rapidement abordée : son réseau comprend tout simplement le cours du Rhin, depuis Huningue, à la frontière suisse, jusqu'à Lauterbourg, au nord, en incluant l'embranchement de Niffer à Mulhouse et le canal de Huningue. Le Rhin sert à l'alimentation de certains canaux de l'UT Centre-Alsace comme le canal de Colmar et le canal du Rhône au Rhin Branche Nord. Le canal de la Marne au Rhin le rejoint à Strasbourg, au niveau des institutions européennes.

De plus, le Rhin est ici une rivière canalisée sur laquelle coopère de nombreux acteurs, et présentant donc des problématiques différentes. En moyenne, ce sont 863 millions de mètres cubes qui sont ainsi prélevés tout au long du Rhin pour alimenter ces voies d'eau au niveau de Huningue, Niffer, Neuf-Brisach et Rhinau. Il y a environ 140 mètres de dénivelé d'une extrémité à l'autre du Rhin français.

4. Unité Territoriale Centre Alsace (UT CA)

Le réseau de l'UT CA comprend le canal de Colmar, le canal du Rhône au Rhin Branche Nord navigable, ainsi que les embranchements de Neuf-Brisach et de Rhinau. L'UT gère également le secteur de Strasbourg, où se rejoignent le CRRBN et le CMR. Le CRRBN est un canal reliant le bief de Niffer, au sud, à Strasbourg au nord. On distingue les parties non-naviguées, ne dépendant pas de VNF, des parties qui le sont. On parle alors de canal déclassé du bief de Niffer jusqu'à l'embranchement de Neuf-Brisach, et de Artzenheim jusqu'à l'embranchement de Rhinau.

L'alimentation en eau du linéaire se fait essentiellement grâce aux prélèvements sur le Rhin, aux niveaux de Neuf-Brisach et de Rhinau. Une partie des apports se fait via le canal déclassé, et donc depuis le bief de Niffer et le Rhin. Cependant, certains cours d'eau se jettent dans le canal ou le traversent. Les nappes phréatiques d'accompagnement de l'III et du Rhin participent également au remplissage du canal.

Divers systèmes de vannages permettent de gérer les niveaux d'eau dans les biefs et les apports des prises d'eau. Un barrage clapets est présent au niveau de la séparation du canal de Colmar et de l'III, permettant le maintien du niveau d'eau amont, l'alimentation de l'III à l'aval et l'évacuation des crues.

L'UT CA gère également les ouvrages du secteur de Strasbourg, qui servent au maintien de la navigation dans la ville et le port, ainsi qu'à l'évacuation des crues de l'III et de la Bruche. Il y a 23 mètres de dénivelé sur le CRRBN, depuis l'embranchement de Rhinau jusqu'au port du Rhin à Strasbourg.

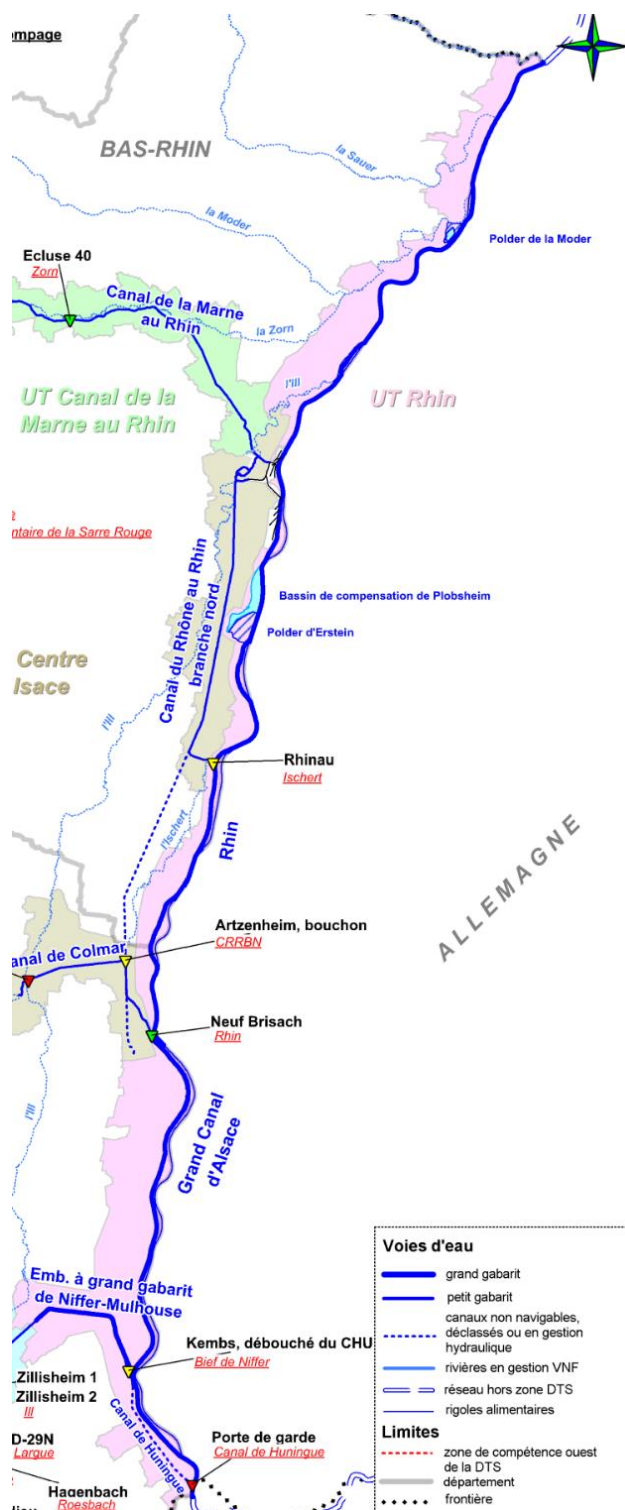


Figure 15 : Réseaux des UT CA et UT Rhin

5. Unité Territoriale Canal de la Marne au Rhin (UT CMR)

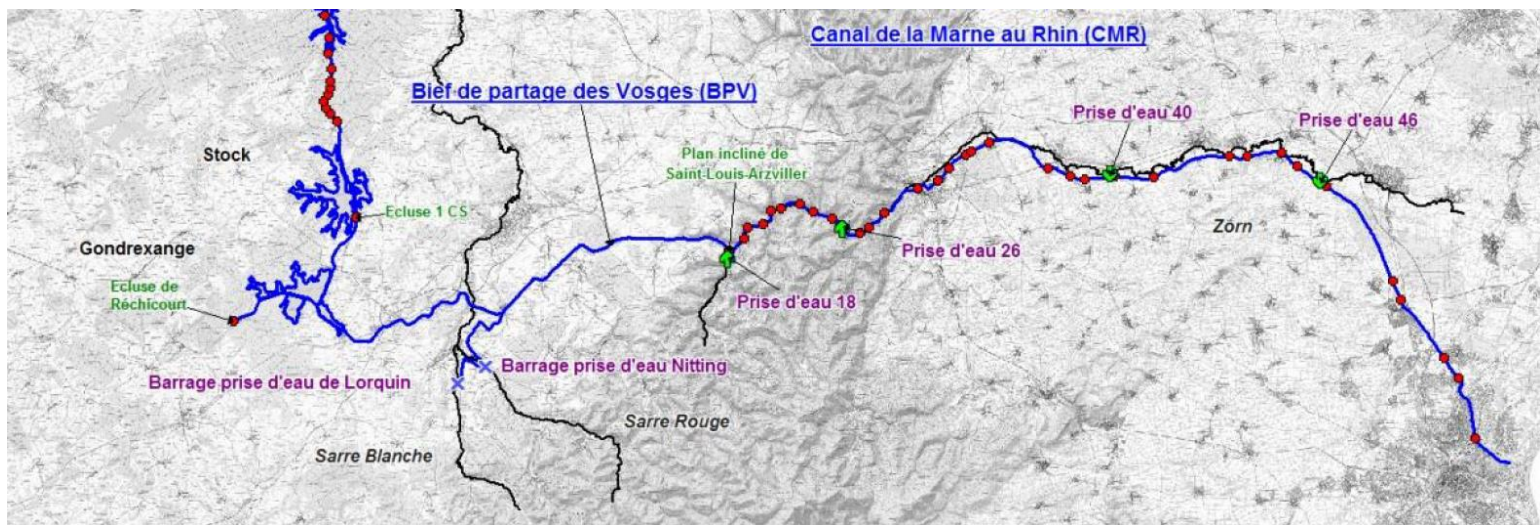


Figure 16 : Carte de l'UT CMR et son système alimentaire

L'UT CMR couvre le linéaire allant de l'étang de Gondrexange, à l'ouest, à Strasbourg à l'est. Elle comprend le Bief de Partage des Vosges (BPV) qui alimente le Canal de la Marne au Rhin (CMR) à l'est, le Canal de la Sarre au nord, ainsi que la partie ouest du CMR gérée par la Direction Territoriale Nord-Est (DTNE).

Du point de vue de la gestion hydraulique, deux étangs réservoirs (étang de Gondrexange et étang du Stock) sont en interaction avec le BPV et jouent un rôle tampon en fournissant de l'eau pendant les périodes d'étiage, et en recueillant et stockant les surplus en hiver, notamment grâce à des stations de pompage sur le BPV. Une partie de la ressource des étangs est alimentée jusqu'à l'étang de Mittersheim au nord via le Canal de la Sarre.

L'alimentation du BPV se fait également grâce à deux barrages de prise d'eau : Lorquin sur la Sarre Blanche, et Nitting sur la Sarre Rouge. Une rigole relie Lorquin à Nitting, puis au BPV. Ce dernier est clôturé à l'est par le Plan Incliné, au pied duquel commence le Canal de la Marne au Rhin. Une conduite forcée permet d'alimenter le CMR depuis le BPV, bien qu'elle ne doive être utilisée que lorsque les autres prélèvements sont insuffisants sur le CMR. Ces autres prélèvements sont trois prises d'eau (PE18, PE26 et PE40) sur la rivière Zorn. La prise d'eau 46 n'est plus fonctionnelle. Là encore, des déversoirs permettent d'évacuer les trop-pleins d'eau vers le milieu naturel, généralement la Zorn.

En moyenne, 13,2 millions de mètres cubes sont prélevés à Lorquin chaque année et 31,5 millions à Nitting. L'alimentation du CMR, quant à elle, se décompose comme suit : 8,4 millions de mètres cubes depuis les étangs lorrains (via le BPV), 4,6 millions à la PE18, 2,5 millions à la PE26 et 2,7 millions à la PE40.

Le réseau de l'UT CMR présente un dénivelé de 132 mètres depuis les prises d'eau de deux Sarres et du bief de partage jusqu'à Strasbourg.

2. Ouvrages d'art et métrologie

1. Ouvrages d'art

Afin d'assurer la gestion hydraulique du réseau, il existe plusieurs types d'ouvrages hydrauliques. Ceux-ci diffèrent de par leur rôle, leur fonctionnement, leur contexte, voire leur histoire. De plus, certains ne sont pas uniquement dédiés à la gestion hydraulique et doivent assurer un grand nombre de fonctions, ce qui augmente les contraintes sur ces sites et implique des solutions et des configurations propres.

Les vannes d'alimentation :

C'est l'ouvrage de gestion hydraulique le plus commun et le plus rustique sur le réseau. Ces vannes levantes sont notamment présentes au niveau des prises d'eau et régulent les prélèvements. Elles marquent généralement les extrémités des rigoles ou des conduites d'alimentations, que ce soit du milieu naturel vers le réseau, entre deux tronçons au sein même du réseau, ou encore du réseau vers le milieu naturel (restitution de débit). Certains aqueducs de contournement en sont équipés à l'amont.

Ces ouvrages concentrent donc les flux d'eau en un point où la section d'écoulement est relativement réduite et maîtrisée, présentant un génie-civil robuste. Ces ouvrages présentent par conséquent un certain intérêt du point de vue de la récupération d'énergie cinétique, ainsi que potentielle au droit d'éventuelles chutes.



Figure 17 : Vanne du barrage de la PE de Lorquin, sur la Sarre Blanche

Les rigoles d'amenée :

Ces petits canaux sont dédiés au transport d'eau, depuis le site de prélèvement jusqu'au réseau navigable. Ces ouvrages présentent de nombreux avantages : l'essentiel du débit d'alimentation des canaux transite via des rigoles, leurs caractéristiques sont généralement connues, elles sont équipées d'instruments de mesures et présentent assez peu de contraintes d'exploitation car les interventions se font surtout sur les ouvrages amont et aval, plus sensibles. Un canal de dimensions connues, instrumenté, ne posant pas de problèmes particuliers pour l'exploitation et concentrant une grande partie des flux du réseau est bien évidemment d'un grand intérêt pour l'étude de la récupération d'énergie hydraulique. De plus, ne s'agissant pas de cours d'eau, la réglementation y est moins contraignante qu'en rivière.



Figure 18 : "Grande rigole", de la PE de Nitting sur la Sarre Rouge au BPV

Les barrages de prise d'eau :

Ces barrages sont installés en travers d'un cours d'eau naturel ; leur rôle est de rehausser la ligne d'eau amont afin que son niveau soit suffisant pour alimenter l'ouvrage de prise d'eau (déversoir, vanne, conduite). De plus, ces barrages doivent garantir la restitution du débit minimal réservé au milieu naturel. Ils sont constitués d'une ou plusieurs passes mobiles (vannes, clapets) afin de réguler les flux et les niveaux d'eau suivant les situations et les besoins. Ils peuvent être équipés de passes à poissons afin de garantir la continuité piscicole de l'ouvrage.

Ces ouvrages peuvent être étudiés du point de vue de la récupération d'énergie potentielle (présence d'une chute d'eau) et cinétique, en raison des vitesses se développant au niveau des bouchures.

Certains de ces ouvrages sont automatisés et équipés d'appareils de mesure afin de suivre l'évolution des prélèvements et garantir les débits minimaux réservés.



Figure 19 : Barrage clapets de la PE 26 sur la Zorn

Les barrages réservoirs :

Ces barrages sont à l'origine de la formation d'une retenue d'eau artificielle dont le but est de stocker la ressource abondante en période humide pour pouvoir l'utiliser lors des périodes sèches. Ils peuvent être alimentés par les apports directs de leur bassin versant (précipitations, ruissellement, ruisseaux) ainsi que par des prises d'eaux sur rivière. Le barrage alimente une rigole qui transporte l'eau jusqu'au réseau navigable.



Figure 20 : Barrage de Champagny, pendant sa vidange

L'intérêt de ces ouvrages réside dans l'importante hauteur de chute qu'ils présentent : ainsi, c'est la récupération d'énergie potentielle qui est surtout intéressante ici. En plus des étangs lorrains (Gondrexange, Stock, Mittersheim), un autre ouvrage de ce type est présent sur le territoire de la DTS : le barrage réservoir de Champagny, sur l'UT CRRBS. C'est la prise d'eau du Rahin qui, via une rigole, assure la majeure partie des apports au bassin, qui à son tour alimente une rigole aval jusqu'au CMHS, et depuis là, tout le CRRBS.

Les barrages de navigation :

Les barrages de navigation fonctionnent globalement comme les barrages de prise d'eau : ils contrôlent le niveau d'eau amont, mais cette fois pour un souci de navigation et de gestion de crues. Ainsi, ils doivent conserver une cote amont comprise dans une fourchette particulière. Ainsi, si le niveau d'eau est inférieur au seuil bas, alors le mouillage n'est plus garanti, pouvant provoquer un blocage de certains bateaux. Le seuil supérieur correspond soit au tirant d'air minimal (au-dessus duquel les bateaux ne passent plus sous les ponts), soit à la cote avant débordement du bief, afin de ne pas provoquer d'inondations.

Ces ouvrages sont le plus souvent présents sur des biefs de rivière, et doivent s'adapter aux conditions hydrologiques du cours d'eau, et notamment permettre l'évacuation des crues.

Certains peuvent être équipés de passes à poissons, voire de passes à canoës. Ils peuvent être à vannes (levantes, déversantes), à clapets ou gonflables. La DTS possède également un barrage à aiguilles assurant ces mêmes fonctions à Strasbourg.

Là aussi, ces barrages présentent le double intérêt d'une chute d'eau pour l'énergie potentielle, et de vitesses importantes au niveau des passes existantes.



Figure 21 : Barrage de l'III à Colmar

Les déversoirs :

Les déversoirs peuvent se présenter sous la forme d'un seuil fixe en maçonnerie, d'une vanne fonctionnant en surverse ou encore d'un seuil ajustable fait de poutrelles de bois.

Le rôle de ces déversoirs est d'assurer une protection contre les crues en écrétant les surplus au-dessus d'une certaine cote. On les retrouve donc souvent le long des biefs, afin que le niveau n'augmente pas trop : en cas de crue, l'eau déborde par-dessus la crête du déversoir plutôt que par-dessus les berges. L'évacuation d'eau se fait donc en un point fixe, qui permet au surplus de rejoindre un cours d'eau voisin. Les aqueducs de contournement au niveau de certaines écluses fonctionnent également grâce à des déversoirs.



Figure 22 : Déversoir de l'Ecrevisse, CRRBS

Les ascenseurs à bateau :

Ces ouvrages imposants sont utilisés pour faire franchir un très important dénivelé aux embarcations. Ils permettent ainsi de court-circuiter un important linéaire de réseau et de nombreuses écluses. Chaque ouvrage est unique et présente donc des caractéristiques et un fonctionnement différent. Celui de la DTS, le Plan Incliné de Saint-Louis/Arzwiller, se présente comme un bac coulissant le long d'un rail, et reliant l'extrémité est du BPV au l'extrémité ouest du CMR, à l'aval. Dans le cadre de la présente étude, l'intérêt du Plan Incliné ne réside pas tellement dans l'ascenseur en lui-même, mais dans la conduite faisant transiter les eaux du bief amont vers le bief aval : il y a ici une alimentation connue et une forte hauteur de chute de 44,55 mètres à exploiter du point de vue de l'énergie potentielle qu'elle représente.

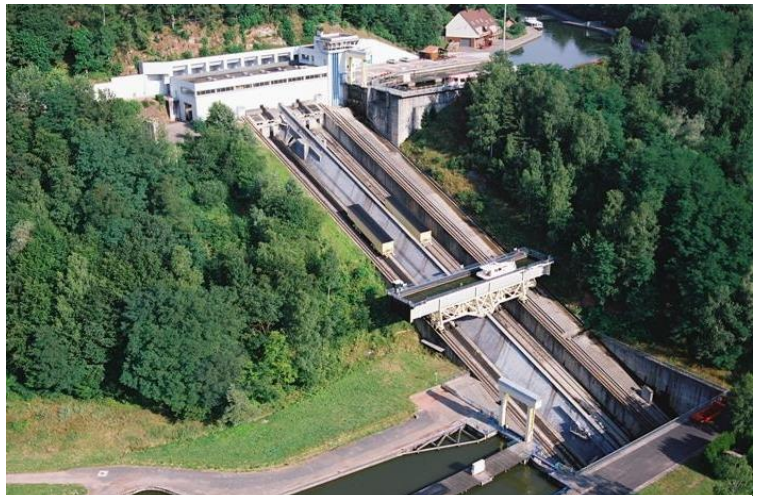


Figure 23 : Plan Incliné de Saint-Louis/Arzwiller

Les écluses :

Ouvrages de navigation récurrents des voies navigables, les écluses permettent aux embarcations de franchir le dénivelé entre deux biefs. Elles sont constituées d'un sas en maçonnerie, d'une porte amont et d'une porte aval. Les écluses au gabarit Freycinet sont les plus communes sur le réseau : leurs portes sont généralement équipées de vantelles afin de réaliser les bassinées et également d'alimenter le bief aval. Certaines sont équipées d'un aqueduc de contournement, qui se présente comme un seuil fixe déversant dans une conduite se jetant dans le bief aval, court-circuitant ainsi le sas de l'écluse. Cela permet d'alimenter en eau le bief aval une fois le bief amont suffisamment rempli, et également de lutter contre les débordements à l'amont.



Figure 24 : Ecluse n°42, CMR

Les écluses sont donc des ouvrages complexes présentant des organes de gestion hydraulique variés. De par le dénivelé franchissable, elles présentent une certaine énergie potentielle, et par les autres éléments (vantelles, aqueducs) des vitesses et débits intéressants peuvent être atteints. Cependant, l'équipement d'un tel ouvrage semble complexe et délicat.

2. Métrologie

Il est impératif pour VNF d'équiper son réseau d'outils de mesures afin de connaître et maîtriser le fonctionnement hydraulique de son réseau, ainsi que pour repérer d'éventuels dysfonctionnements ou respecter les contraintes réglementaires de prélèvements et de restitution.

Jusqu'à récemment, les ouvrages du réseau étaient très inégalement équipés, que ce soit en raison de leur type (écluse, rigole, barrage) ou de leur contexte géographique ou historique. Des installations et modernisations d'équipements ont été menées et se poursuivent encore actuellement dans le but de disposer d'une vision de la gestion hydraulique fiable et efficace. Les instruments de mesures les plus fréquents sont des échelles limnimétriques, des capteurs de hauteur d'eau et de vitesse (radars, doppler, cordes de vitesse).

Globalement, plus des trois quarts des prises et rejets sont instrumentés et les débits connus ; concernant les niveaux de biefs, cela dépend des itinéraires (tout ou rien) ; les niveaux des rigoles sont très bien connus, de même que les niveaux et volumes des réservoirs.



Figure 25 : Corde de vitesses, rigole de la Largue(droite) ; et Point de mesure de hauteur (radar) couplé avec une échelle limnimétrique, déversoir bief 29N

Toutes ces données sont rapatriées dans des SCADA (systèmes de contrôles et d'acquisition de données) pouvant être au niveau de toute la DT, localement en UT, et parfois même à une échelle encore plus locale. Au total, il existe dix SCADA différents, hébergés sur quatre logiciels eux aussi différents. Cette gestion très locale et hétérogène des données ne facilite pas leur accès ou leur utilisation par des agents ou des organismes extérieurs au secteur concerné. C'est pourquoi ces données sont régulièrement synthétisées et transmises au siège de la DTS, dont le SCADA sera à termes utilisé pour toutes les UT.

De plus, une application pour la gestion hydraulique de la ressource en eau (aGHyre) est en train d'être mise en place et testée au niveau national : elle a vocation à recueillir et conserver les données émanant des capteurs et des relevés de terrains sur du long terme, là où les SCADA ne les stockeront que quelques mois. De plus, elle permet le traitement des données, le développement d'outils d'aide à la décision et d'échanges, en interne comme en externe.

Concernant les prises d'eau et les rejets : la plus grande partie sont équipés. Les sites qui ne le sont pas se trouvent à l'amont de l'embranchement de Neuf-Brisach, vers Rhinau et l'arrivée du CRRBN déclassé, puis vers le BPV à l'arrivée de la Grande rigole ainsi que les rejets au niveau de l'étang du Stock.

Une certaine méconnaissance des prélèvements sur le réseau au niveau du CRRBN et du CS existe également.

Les sites concernés ne seront pas étudiés dans la suite, ou alors leurs caractéristiques seront déterminées par d'autres moyens. Certains sites instrumentés ne font pas remonter leurs données (notamment la prise d'eau du Rahin et la rigole qui suit) ; ces données sont à chercher au niveau local ou à déterminer autrement avec des points instrumentés à l'aval.

Pour ce qui est de l'instrumentation des biefs, seuls les niveaux d'eau sont suivis, et de façon inégale suivant les secteurs : ni le CRRBS ni le CRRBN ne sont équipés de capteurs permettant la remontée de données (le CRRBS n'étant pas équipé du tout). Les autres secteurs présentent au moins un capteur de niveau par bief, deux (amont/aval) dans le meilleur des cas.

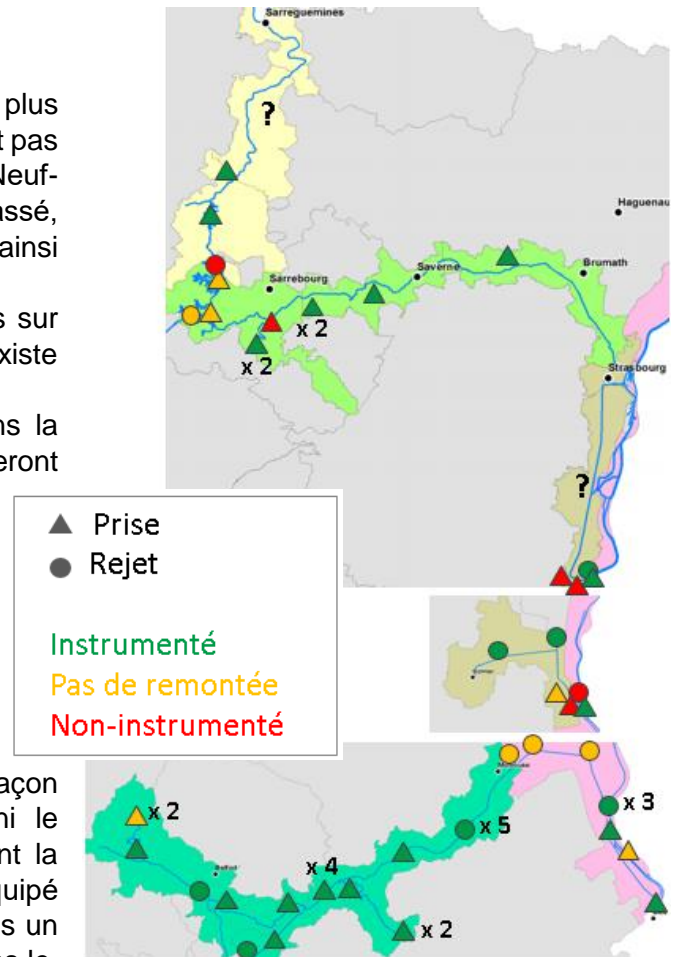


Figure 26 : Couverture métrologique des prises d'eau et des rejets

Les rigoles de Belfort (du CMHS au CRRBS) et de la Largue (depuis la prise d'eau de Friesen sur la Largue jusqu'au CRRBS) sont instrumentées, mais pas celles des prises d'eau de Nitting et Lorquin (Sarre Blanche et Sarre Rouge) alimentant le BPV, ni les rigoles amont et aval de Champagny. L'instrumentation porte sur les hauteurs d'eau, notamment afin de contrôler le risque de débordement.

Afin de combler le manque de données à certains points, et pour vérifier le bon fonctionnement des points de mesures existants, une campagne de jaugeage a été menée entre octobre 2018 et mai 2019, notamment grâce à un ADCP à effet Doppler et une perche d'intégration, afin de faire un tarage de stations de mesures récemment installées. Cela comprend une simple vérification des valeurs pour un capteur de vitesse, de même que la création d'une courbe de tarage pour une simple mesure de hauteur d'eau. Une partie des données récoltées lors de ces campagnes est utilisée pour les calculs de potentiels présentés par la suite.

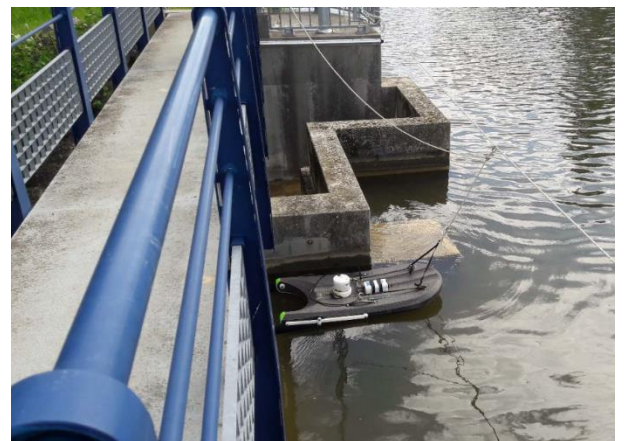


Figure 27 : Jaugeage avec ADCP, barrage 1 de Zillisheim 25/04/2019

3. Sites retenus pour l'étude

Ici seront présentés les sites retenus dans le cadre de cette étude. Le choix s'est fait en fonction de l'intérêt et du potentiel a priori de chacun, de la disponibilité des données ainsi que du fonctionnement « continu » ou par périodes claires des ouvrages. C'est pourquoi la plupart des systèmes de déversoirs, pour ne citer qu'eux, fonctionnant ponctuellement, en urgence, parfois de façon autonome, et non-répertoriée, ne seront pas inclus dans l'étude.

Les sites étant inégalement équipés, suivis, ou relevant de fonctionnements hydrologiques complètement différents, il sera détaillé pour chacun les hypothèses de calcul ou les approximations faites au cas par cas.

Une carte, présentée en **Annexe 2**, localise tous les sites retenus au vu de leur pertinence et de la disponibilité de leurs caractéristiques et de leur fonctionnement.

Vingt-deux sites ont été identifiés, représentant un total de trente-deux ouvrages et organes de gestion. Il ressort de cette sélection une très grande variété, que ce soit dans le rôle, le fonctionnement ou la structure de l'ouvrage. On remarque également qu'aucun site n'a été identifié sur les UT CS et Rhin car ne présentant que peu de sites, et qu'aucun n'était suffisamment renseigné pour la suite de l'étude. Leurs configurations et leurs fonctionnements particuliers sont également limitant pour la présente étude.

Afin de mieux apprécier la diversité des sites, voici le type d'ouvrages étudiés par la suite :

- 7 barrages de navigation ;
- 5 barrages de prise d'eau ;
- 7 rigoles d'alimentation ;
- 6 vannes d'alimentation ;
- 4 écluses désaffectées ;
- 1 aqueduc de contournement d'une écluse du Rhin utilisé comme prise d'eau ;
- 1 barrage réservoir (Champagne) ;
- 1 conduite d'alimentation forcée (Plan Incliné de Saint-Louis/Arzviller).

Dans le détail, et pour chaque unité territoriale, voici la description des sites qui ont été retenus en quelques mots. L'**Annexe 3** présente des schémas simples du fonctionnement hydraulique de chaque secteur, et les **Annexes 4, 5 et 6** présentent plus en détails chacun de ces sites.

1. UT CRRBS

- La prise d'eau du Rahin : Il s'agit d'un barrage sur le Rahin permettant le prélèvement de l'eau au niveau d'une vanne. Cette prise d'eau alimente la rigole dite « amont » jusqu'au barrage réservoir de Champagne. L'intérêt réside dans la chute d'eau au niveau de la rivière, et au niveau de la vanne de prélèvement, de même que les importants volumes qui transitent dans la rigole amont.
- Le barrage de Champagne : Il sert de réservoir pour assurer l'alimentation du réseau et le soutien d'étiage via la rigole dite « aval ». Sa hauteur de chute importante en fait un ouvrage intéressant, de même que les importants volumes qui transitent dans la rigole aval.
- Les quatre écluses désaffectées du CMHS (13, 11, 10 et 9) : Leurs portes ont été retirées afin de permettre l'écoulement de l'eau. La hauteur de chute présente à chaque écluse est intéressante. Deux anciennes écluses du canal de Huingue sont déjà utilisées dans cette optique.

- La prise d'eau et la rigole de la Largue : Une prise d'eau à Friesen permet d'alimenter le canal via la rigole de la Largue. Il est envisagé d'équiper la vanne de prise d'eau et la rigole en deux endroits (amont et aval) compte-tenu des différences de débits à ces deux points.
- Le barrage d'Illfurth : Il s'agit d'un barrage de navigation de l'III. Sont intéressants les débits de la rivière.
- Les barrages de Zillisheim : Il s'agit de deux barrages de navigation de l'III. Sont intéressants les débits de la rivière, les hauteurs de chutes ainsi que les vitesses d'eau sur la crête déversante.

2. UT CMR

- La prise d'eau de Lorquin : Il s'agit d'un barrage sur la Sarre Rouge permettant le prélèvement de l'eau au niveau d'une vanne. Cette prise d'eau alimente la « petite rigole » jusqu'à la Sarre Blanche. L'intérêt réside dans la chute d'eau au niveau de la rivière et les vitesses au niveau de la vanne, de même que les importants volumes qui transitent dans la petite rigole.
- La prise d'eau de Nitting : Il s'agit d'un barrage sur la Sarre Blanche permettant le prélèvement de l'eau au niveau d'une vanne. Cette prise d'eau alimente la « grande rigole » jusqu'au bief de partage des Vosges. L'intérêt réside dans la chute d'eau au niveau de la rivière et les vitesses au niveau de la vanne, de même que les importants volumes qui transitent dans la grande rigole.
- Le Plan Incliné de Saint-Louis/Arzwiller : Il s'agit d'un ascenseur à bateau faisant la jonction entre le BPV et le CMR. L'intérêt du site réside dans les conduites alimentant le CMR depuis le BPV, et leur importante hauteur de chute.
- La prise d'eau 18 : Il s'agit d'un barrage sur la Zorn permettant le prélèvement de l'eau au niveau d'une vanne. Cette prise d'eau alimente le CMR. L'intérêt réside dans la chute d'eau au niveau de la rivière et les vitesses au niveau de la vanne.
- La prise d'eau 26 : Il s'agit d'un barrage sur la Zorn permettant le prélèvement de l'eau au niveau d'une vanne. Cette prise d'eau alimente la « petite rigole » jusqu'à la Sarre Blanche. L'intérêt réside dans la chute d'eau au niveau de la rivière et les vitesses au niveau de la vanne.
- La prise d'eau 40 : Il s'agit d'une vanne sur un canal de la Zorn permettant le prélèvement de l'eau vers une rigole. L'intérêt réside dans les vitesses au niveau de la rigole.

3. UT CA

- Le barrage de l'III à Colmar : Il s'agit d'un barrage de navigation de l'III. Sont intéressants les débits de la rivière et les hauteurs de chute.
- La prise d'eau de Neuf-Brisach : Il s'agit d'une vanne sur le Rhin alimentant un aqueduc de contournement d'écluse. Les volumes sont très importants à cet endroit.
- Le barrage de l'Abattoir : Il s'agit d'un barrage de navigation de l'III. Sont intéressants les débits de la rivière et les hauteurs de chute.
- Le barrage de l'Aar : Il s'agit d'un barrage de navigation de l'III. Sont intéressants les débits de la rivière et les hauteurs de chute, de même que les vitesses au niveau des vannes déversantes.
- Le barrage à aiguilles de la Robertsau : Il s'agit d'un barrage de navigation de l'III. Sont intéressants les débits de la rivière et les vitesses d'écoulement.

Les sites retenus dans le cadre de cette étude sont présentés bien plus en détails par unité territoriale aux **Annexes 4, 5 et 6**.

B. Etude de potentiel hydroélectrique

1. UT Canal du Rhône au Rhin Branche Sud

1. Prise d'eau du Rahin

Les eaux du Rahin sont séparées au niveau de la prise d'eau située à Plancher-Bas. En situation de prélèvement, le clapet assure une retenue d'eau à l'amont, alimentant la rigole vers le bassin de Champagny. Un débit minimal de 0,05 m³/s est restitué par le clapet (et 0,25 m³/s par la passe à poissons) ; en réalité le débit restitué est bien supérieur au débit minimal en raison de la capacité hydraulique de la prise d'eau qui ne peut pas toujours prélever tout le débit disponible. De plus, pour des raisons de sécurité et d'exploitation des ouvrages, notamment en aval, des consignes régulent l'ampleur des prélèvements sur le Rahin. Les débits exploitables sont ici ceux prélevés et ceux restitués.

Une étude de 2014 a estimé les volumes prélevés et restitués au niveau du barrage sur les années 2009 à 2012. Deux périodes hydrologiques ont été retenues :

- Une saison « **hiver** » correspondant à la période de remplissage du bassin de Champagny (8 mois, d'octobre à mai inclus) ;
- Une saison « **été** » correspondant à la période de sollicitation maximale du bassin (4 mois, de juin à septembre).

Il ressort de cette étude que pour une année hydrologique normale, les volumes se répartissent comme suit :

- 39,2 millions de mètres cubes en amont du barrage (33,5 en hiver, 5,7 en été),
- 22,8 millions de mètres cubes prélevés (19,6 en hiver, 3,2 en été),
- 16,4 millions de mètres cubes restitués au Rahin (13,8 en hiver, 2,6 en été)

A partir de ces résultats, il est possible de calculer pour chaque saison les débits moyens prélevés et restitués. Actuellement, lorsque la prise d'eau fonctionne, le clapet est levé : il y a 4,31 m de chute entre la retenue amont et le niveau d'eau aval du Rahin; lorsque la prise d'eau ne fonctionne pas le clapet est couché. Pour les calculs de puissances suivants, le clapet est considéré comme relevé en permanence afin de maintenir les 4,31 mètres de chute, y compris pour les débits restitués.

	durée de la saison (mois)	V prélevé (m ³)	Q prélevé (m ³ /s)	V restitué (m ³)	Q restitué (m ³ /s)
Eté	4	3200000	0,309	2600000	0,251
Hiver	8	19600000	0,945	13800000	0,666

Tableau 1 : Débits calculés à la prise d'eau du Rahin

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h$$

		Q (m ³ /s)	h (m)	P brute (kW)
Barrage	été	0,251	4,31	10,603
	hiver	0,666	4,31	28,138

Tableau 2 : Puissances potentielles brutes au barrage de restitution du Rahin

L'entrée de la rigole se fait grâce à une vanne de 2,5 m de large. La rigole à proprement parler est un canal rectangulaire de 5 m de large pour 2 m de hauteur maximale. Sa pente moyenne sur ses 2,8 km de long est de 0,025%. Son radier est à la cote 410,4 m à l'aval de la vanne, et la retenue d'eau est à la cote 412,31 m : la hauteur de chute entre le niveau amont et le niveau de la rigole est déterminée grâce au calcul de la hauteur d'eau dans la rigole. Grâce à la formule de Manning-Strickler, il est possible de déterminer la hauteur d'eau moyenne dans la rigole pour le débit qui nous intéresse.

$$Q = K * S * Rh^{\frac{2}{3}} * \sqrt{i}$$

Avec :

- Q le débit, en m³/s,
- K le coefficient de rugosité de Strickler, en m^{1/3}/s, ici pris égal à 30,
- Rh le rayon hydraulique en m, ici égal à Section/Périmètre Mouillé,
- i la pente de la rigole, en m/m.

Les hauteurs d'eau moyennes calculées dans la rigole sont de 30,8 cm en été et 63 cm en hiver : les hauteurs de chute au droit de la prise d'eau sont donc de 1,6 et 1,28 m.

		Q (m ³ /s)	h (m)	P brute (kW)
Prise d'eau	été	0,309	1,60	4,849
	hiver	0,945	1,28	11,870

Tableau 3 : Calcul des puissances potentielles au droit de la prise d'eau du Rahin

Les puissances cinétiques sont calculées dans la rigole, au niveau de la vanne ainsi que plus en aval.

ÉTÉ							
K (m ^{1/3} /s)	L (m)	h (m)	P (m)	S (m ²)	Rh (m)	i (m/m)	Q (m ³ /s)
30	5	0,308	5,62	1,54	0,27	0,00025	0,309

	Q (m ³ /s)	h (m)	L (m)	S (m ²)	V (m/s)	P (kW)
rigole	0,309	0,308	5	1,54	0,200	0,0062
Vanne PE	0,309	0,308	2,5	0,771	0,401	0,025

HIVER							
K (m ^{1/3} /s)	L (m)	h (m)	P (m)	S (m ²)	Rh (m)	i (m/m)	Q (m ³ /s)
30	5	0,630	6,26	3,15	0,50	0,00025	0,945

	Q (m ³ /s)	h (m)	L (m)	S (m ²)	V (m/s)	P (kW)
rigole	0,945	0,630	5	3,15	0,300	0,0425
Vanne PE	0,945	0,630	2,5	1,575	0,600	0,170

Tableau 4 : Calcul des puissances cinétiques pour la rigole du Rahin

Sont également calculées pour ces périodes les vitesses d'écoulement dans la rigole et au niveau immédiat de la vanne. Cela nous permet d'estimer la puissance cinétique brute dans chaque cas de figure : en été elles sont de **6,2 à 25 Watts** ; et de **42,5 à 170 Watts** en hiver.

2. Barrage de Champagney

Le barrage de Champagney fournit de l'eau au réseau en fonction des besoins et de la disponibilité des autres ressources : son fonctionnement est périodique, présentant des débits plus importants l'été. Le fonctionnement du barrage a été analysé lors d'une étude de connaissance hydraulique [1], qui a été complétée avec les relevés d'exploitation des dernières années. Les années « exceptionnelles » ont été écartées de l'analyse, car correspondant à des changements temporaires d'exploitation, à la vidange décennale de l'ouvrage et à son remplissage intégral : pour ces années les débits en sortie de barrage ainsi que les niveaux ne sont donc pas représentatifs d'un fonctionnement normal de l'ouvrage.

Au vu des données disponibles, deux périodes ont été identifiées :

- **L'été** : de juin à septembre. Cela correspond à la période où le barrage fournit les débits les plus importants, **0,697 m³/s** ; et où le niveau d'eau moyen vaut **27 m**.
- **L'hiver** : d'octobre à mai. Cela correspond à la période où le barrage fournit les débits les plus faibles, **0,360 m³/s** ; et où le niveau d'eau moyen vaut **31 m**.

	Q(m ³ /s)	h (m)	Ppot brute (kW)
été	0,697	27	184,61
hiver	0,360	31	109,48

Tableau 5 : Puissances potentielles brutes au barrage de Champagney

Les puissances potentielles brutes au droit de l'ouvrage sont comprises entre **110** et **185 kW** environ.

Concernant la puissance cinétique brute de la rigole aval, certaines de ses caractéristiques sont inconnues : la relation de Manning-Strickler ne peut donc pas être appliquée de façon satisfaisante.

Plusieurs campagnes de jaugeage ont été menées, en mars, juillet et octobre, afin de recueillir certains éléments de géométrie et surtout d'établir une courbe de tarage pour la rigole.

La courbe de tarage permet de déterminer les hauteurs d'eau dans la rigole pour les débits précédemment identifiés : 54 cm en été, et 30 cm en hiver.

Le canal trapézoïdal présente une longueur de plafond $b = 2,5$ m, pour un fruit de berge $z = 2,5$ m/m. Une station de mesure débitmétrique permet de connaître le flux entrant dans la rigole.

Ainsi, les sections d'écoulement sont déterminées pour chaque période, puis les vitesses moyennes sur la section.

	Q(m ³ /s)	h (m)	S (m ²)	V (m/s)	Pcin (W)
été	0,6975	0,54	2,08	0,335	39,2
hiver	0,36	0,3	0,98	0,367	24,3

Tableau 6 : Puissances cinétiques brutes dans la rigole aval

3. Ecluses du CMHS

Les écluses désaffectées du CMHS utilisées uniquement pour le transport d'eau sont les écluses n°13, 11, 10, et 9. Seule cette dernière est équipée d'un système de mesure de débit. Trois campagnes de mesures menées en 2012 ont permis de mieux connaître les débits aux ouvrages, pour deux périodes caractéristiques :

- **L'été**, de juin à septembre : les débits sont les plus importants du fait des besoins d'alimentation du réseau aval.
- **L'hiver**, d'octobre à mai : les débits sont globalement moins importants car les besoins du réseau sont moindres. Cependant, les apports du bassin versant durant cette période hydrologiquement favorable expliquent certaines arrivées d'eau dans le canal au cours de cette période.

Les manœuvres de la prise d'eau de Champagny à l'amont ainsi que celles du batardeau de l'écluse n°8 à l'aval garantissent un niveau d'eau constant dans les biefs quelle que soit la période de l'année, le but étant de maintenir le plan d'eau au niveau de l'entrée de la rigole de Belfort située à l'aval de l'écluse 9.

	h (m)	été		hiver	
		Q(m ³ /s)	P _{pot} brute (kW)	Q(m ³ /s)	P _{pot} brute (kW)
E13	2,15	0,741	15,63	0,583	12,30
E11	1,8	0,417	7,36	0,378	6,67
E10	2,12	0,401	8,34	0,462	9,61
E9	1,84	0,291	5,25	0,332	5,99

Tableau 7 : Puissances potentielles brutes aux écluses du CMHS

Sur l'ensemble de ce secteur, la puissance potentielle brute totale est de **36,58 kW** l'été, pour **34,57 kW** l'hiver.

4. Rigole de la Largue (Friesen & Valdieu)

La rigole prend naissance au niveau du vannage de Friesen, et rejoint le CRRBS à Valdieu. Il existe un point de mesure sur la partie amont de la rigole, et un point de mesure sur la partie aval.

Il n'y a pas de fonctionnement significativement différent de la prise d'eau en été ou en hiver, les paramètres, moyennés, sont donc appliqués sur la totalité de l'année.

Les calculs de puissances cinétiques brutes sont faites au niveau du vannage, de la partie amont de la rigole, et au niveau de la partie aval, au moyen de la formule de Manning-Strickler.

A **Friesen** (partie amont de la rigole) : le débit est de 122 l/s en moyenne sur 4 années (2009-2012).

A **Valdieu** (partie aval de la rigole) : le débit est de 225 l/s en moyenne sur 4 années (2009-2012).

	K (m ^{1/2} /s)	L (m)	h (m)	P (m)	S (m ²)	Rh (m)	i (m/m)	Q (m ³ /s)
Friesen	30	2,5	0,209	2,92	0,52	0,18	0,0006	0,122
Valdieu	30	2,5	0,310	3,12	0,77	0,25	0,0006	0,225

	Q (m ³ /s)	h (m)	L (m)	S (m ²)	V (m/s)	P _{cin} (W)
Vanne PE	0,122	0,209	2	0,418	0,292	5,2
rigole amont (Friesen)	0,122	0,209	2,5	0,523	0,233	3,3
rigole aval (Valdieu)	0,225	0,310	2,5	0,775	0,290	9,5

Tableau 8 : Calculs des puissances cinétiques brutes sur la rigole de la Largue

Les puissances cinétiques brutes trouvées sont de l'ordre de quelques watts : **5,2 W** en sortie de vanne, **3,3 W** pour la partie amont, et **9,5 W** pour la partie aval.

5. Barrage Illfurth

Le barrage d'Illfurth évacue l'eau du bief de rivière 32N vers l'Ill non-navigable à l'aval. Le débit réservé garanti est de 0.33 m³/s, mais on considère que l'étiage est effectif pour un débit inférieur à **0,55 m³/s** (mesuré à la station de Altkirch) ; une crue correspond à un débit de l'Ill dépassant 10 m³/s environ.

Cet ouvrage étant un barrage de navigation (et non de prise d'eau), l'intégralité du débit de la rivière est conservé d'amont en aval.

Le module à Altkirch étant de **2,42 m³/s**, on prendra ce débit comme référence pour nos calculs au barrage.

La station hydrométrique de Altkirch est suffisamment proche du barrage pour qu'on considère que les débits sont conservés d'un site à l'autre.

Dans ce cas, en exploitation courante, la hauteur de chute est d'environ 80 cm. En situation d'étiage, pour 0.55 m³/s, la hauteur de chute avoisine les 1.2 m.

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h$$

	Q (m ³ /s)	h (m)	P brute (kW)
module	2,42	0,8	18,992
limite étiage	0,55	1,2	6,475

Tableau 9 : Puissances potentielles au barrage d'Illfurth

6. Barrages 1&2 Zillisheim

Ces deux barrages assurent la diffifluence entre l'III et le CRRBS. Ils ne sont pas instrumentés, que ce soit pour les débits ou les niveaux d'eaux. Les débits de l'III sont mesurés à la station de Didenheim, à l'aval de la confluence des flux des deux barrages. Une campagne de jaugeage a permis d'estimer qu'environ 39% du débit de l'III était évacué par le barrage amont 1, et 61% par le barrage aval 2. Pour les deux périodes, le traitement des débits des 57 dernières années disponibles sur le site de la Banque Hydro donne :

- **En été**, de juin à septembre : un débit de 3,075 m³/s pour l'III ; soit 1,119 au barrage 1 et 1,876 au barrage 2,
- **En hiver**, d'octobre à mai : un débit de 8,476 m³/s pour l'III ; soit 3,306 au barrage 1 et 1,170 au barrage 2.

Les hauteurs de chutes ne sont pas connues avec précisions, mais correspondent à la hauteur des clapets, soit 1,5 mètres. Cette unique valeur est appliquée sur l'ensemble de l'année.

		Q (m ³ /s)	h (m)	P (kW)
Zillisheim	été	1,119	1,5	16,47
1	hiver	3,306	1,5	48,65
Zillisheim	été	1,876	1,5	27,61
2	hiver	5,170	1,5	76,08

Tableau 10 : Puissances potentielles brutes à Zillisheim

La campagne de jaugeage a également permis de déterminer les vitesses des lames d'eau au-dessus des clapets. Pour les débits correspondants, ces vitesses sont de l'ordre de 1 m/s l'été et entre 0,2 et 0,5 m/s l'hiver.

		Vitesse (m/s)	Surface (m ²)	P (kW)
Zillisheim 1	été	1,025	8,5	4,58
	hiver	0,2	9,09	0,04
Zillisheim 2	été	1,01	9,16	4,72
	hiver	0,53	11,3	0,84

Tableau 11 : Puissances cinétiques brutes à Zillisheim

2. UT Canal de la Marne au Rhin

1. Prise d'eau de Lorquin

Le site de prélèvement de Lorquin sur la Sarre Blanche est équipé d'instruments de mesures aux niveaux de la restitution et de la prise d'eau. Il existe donc des chroniques de ces débits prélevés et restitués. L'analyse de ces chroniques montre qu'il y a peu de variabilité dans les débits suivant la période de l'année, bien que les prélèvements soient légèrement plus importants autour de janvier.

Ainsi, chaque jour sont prélevés 36 670 m³ en moyenne ; et 34 940 m³ sont restitués au cours d'eau. La hauteur de chute pour cet ouvrage est de 0,92 m en exploitation courante.

	Q (m3/j)	Q (m3/s)	h (m)	P (kW)
Barrage	34936	0,404	0,92	3,649

Tableau 12 : Puissance potentielle au barrage de la PE de Lorquin

Q (m3/j)	Q (m3/s)
36668	0,424

K ($\frac{1}{m^3/s}$)	L (m)	h (m)	P (m)	S (m ²)	Rh (m)	i (m/m)	Q (m3/s)
30	5	0,368	5,74	1,84	0,32	0,00027	0,424

	Q (m3/s)	h (m)	L (m)	S (m ²)	V (m/s)	P (kW)
rigole	0,424	0,368	5	1,84	0,231	0,0113
Vanne PE	0,424	0,368	2,47	0,908	0,467	0,046

Tableau 13 : Puissances cinétiques brutes de la PE de Lorquin

L'entrée de la « petite rigole » se fait grâce à une vanne de 2,47 m de large. La rigole à proprement parler est un canal rectangulaire de 5 m de large pour 1 m de hauteur maximale. Sa pente moyenne sur ses 2,7 km de long est de 0,027%. Grâce à la formule de Manning-Strickler, il est possible de déterminer la hauteur d'eau dans la rigole pour le débit qui nous intéresse.

La hauteur d'eau dans la rigole étant de 36,8 cm, la vitesse d'écoulement est de 0,467 m/s en sortie de vanne, et de 0,231 m/s dans le reste de la rigole. Cela représente des puissances brutes grossièrement comprises entre **10 et 45 Watts**.

2. Prise d'eau de Nitting

Le site de prélèvement de Nitting sur la Sarre Rouge est équipé d'instruments de mesures aux niveaux de la restitution et de la prise d'eau. Il existe donc des chroniques de ces débits prélevés et restitués. L'analyse de ces chroniques montre qu'il y a peu de variabilité dans les débits suivant la période de l'année, bien que les prélèvements soient légèrement plus importants autour de janvier.

Ainsi, chaque jour sont prélevés 96 269 m³ en moyenne ; et 60 471 m³ sont restitués au cours d'eau. La hauteur de chute pour cet ouvrage est de 1 m en exploitation courante.

	Q (m3/j)	Q (m3/s)	h (m)	P (kW)
Barrage	60471	0,700	1	6,866

Tableau 14 : Puissance potentielle au barrage de la PE de Nitting

L'entrée de la « grande rigole » se fait grâce à une vanne de 5 m de large. La rigole à proprement parler est un canal rectangulaire de 10 m de large pour 1,4 m de hauteur maximale. Sa pente moyenne sur ses 4,9 km de long est de 0,027%.

Grâce à la formule de Manning-Strickler, il est possible de déterminer la hauteur d'eau dans la rigole pour le débit qui nous intéresse.

Q (m ³ /j)	Q (m ³ /s)
96269	1,114

K (m ^{1/3} /s)	L (m)	h (m)	P (m)	S (m ²)	Rh (m)	i (m/m)	Q (m ³ /s)
30	10	0,423	10,85	4,23	0,39	0,00027	1,114

	Q (m ³ /s)	h (m)	L (m)	S (m ²)	V (m/s)	P (kW)
rigole	1,114	0,423	10	4,23	0,263	0,0386
Vanne PE	1,114	0,423	5	2,116	0,527	0,154

Tableau 15 : Puissances cinétiques brutes de la PE de Nitting

La hauteur d'eau dans la rigole étant de 42,3 cm, la vitesse d'écoulement est de 0,527 m/s en sortie de vanne, et de 0,263 m/s dans le reste de la rigole.

Cela représente des puissances brutes grossièrement comprises entre **40 et 150 Watts**.

3. Plan Incliné

Il s'agit ici d'étudier la puissance potentielle au niveau des conduites forcées du Plan Incliné permettant d'alimenter le CMR depuis le BPV. Cette alimentation est dépendante des prélèvements sur la Zorn en aval et des besoins du réseau. Au vu des données pertinentes disponibles (cinq dernières années) et des études précédentes [1], deux périodes de fonctionnement ont été distinguées :

- **L'été**, de juin à septembre : les débits y sont les plus importants, de l'ordre de **0,38 m³/s**.
- **L'hiver**, d'octobre à mai : les besoins d'alimentation sont moindres, avec **0,16 m³/s** en moyenne.

Les niveaux d'eau dans le BPV, à l'amont, et le CMR, à l'aval, sont maintenus tout au long de l'année, justement grâce à la gestion hydraulique de cette prise d'eau. La hauteur de chute est donc constante quelle que soit la période de l'année et vaut **44,55 m**.

	Q(m ³ /s)	h (m)	P _{pot} brute (kW)
été	0,38	44,55	166,07
hiver	0,16	44,55	69,93

Tableau 16 : Puissances potentielles brutes au P.I

Ainsi, les puissances potentielles brutes présentes au niveau de ces conduites sont globalement comprises entre **70 et 166 kW**.

4. Prise d'eau 18

Les chroniques des volumes prélevés et restitués sont disponibles au droit de cet ouvrage ; il est ainsi possible de déterminer les débits moyens, sur 8 années, pour deux périodes d'intérêt : l'été, de juin à septembre ; et l'hiver, d'octobre à mai.

Cependant, il n'existe aucune donnée relative à la hauteur de chute au droit du barrage. Sur site, en exploitation courante, la chute est de 1 m : faute de valeur plus précise, cette chute est appliquée pour les deux périodes.

Les puissances brutes potentielles sont étudiées au niveau du barrage de prise d'eau, et les puissances cinétiques au niveau de la vanne alimentant le CMR.

		Q (m ³ /s)	h (m)	P _{pot} (W)
Barrage	Été	1,464	1	14362
	Hiver	2,878	1	28233

		Q (m ³ /s)	S (m ²)	V(m/s)	P _{cin} (W)
Vanne	Été	0,065	0,565	0,115	0,4
	Hiver	0,168	0,565	0,297	7,4

Tableau 17 : Puissances brutes à la PE 18

5. Prise d'eau 26

Les chroniques des volumes prélevés et restitués sont disponibles au droit de cet ouvrage ; il est ainsi possible de déterminer les débits moyens, sur 8 années, pour deux périodes d'intérêt : l'été, de juin à septembre ; et l'hiver, d'octobre à mai.

Cependant, il n'existe aucune donnée relative à la hauteur de chute au droit du barrage. Sur site, en exploitation courante, la chute est de 1,35 m : faute de valeur plus précise, cette chute est appliquée pour les deux périodes.

Les puissances brutes potentielles sont étudiées au niveau du barrage de prise d'eau, et les puissances cinétiques au niveau de la vanne alimentant le CMR.

		Q (m ³ /s)	h (m)	P _{pot} (W)
Barrage	Été	2,547	1,35	33731
	Hiver	5,190	1,35	68734

		Q (m ³ /s)	S (m ²)	V(m/s)	P _{cin} (W)
Vanne	Été	0,068	0,196	0,346	4,1
	Hiver	0,082	0,196	0,417	7,1

Tableau 18 : Puissances brutes à la PE 26

La prise d'eau présente des puissances potentielles allant de **33,7** à **68,7 kW**. Concernant le potentiel cinétique, il n'est que de quelques watts : **4** à **7 W**.

6. Prise d'eau 40

La prise d'eau 40 n'est pas placée directement sur la Zorn, mais sur un canal usinier la reliant à un moulin. Les ouvrages de prélèvement sur la rivière ne sont pas gérés par VNF, il n'y a donc aucune connaissance des débits dans ce canal, mais aucun débit minimal à respecter non plus.

Des jaugeages ont été effectués en début d'année dans la rigole reliant la prise d'eau VNF au CMR. Deux séries de mesures ont été réalisées à 3 mois d'intervalle, pour des périodes représentatives du fonctionnement courant de la prise d'eau. Aucune de ces campagnes n'a permis d'identifier un fonctionnement saisonnier de la prise d'eau : les paramètres et mesures ont donc été moyennés ici.

La rigole d'alimentation est le seul ouvrage d'intérêt du site, car les mesures et calculs au niveau de la vanne font état d'un potentiel excessivement faible.

	Q (m ³ /s)	S (m ²)	V(m/s)	P _{cin} (W)
Rigole	0,218	0,655	0,333	12,07

Tableau 19 : Puissance cinétique brute à la PE 40

La puissance brute de l'écoulement dans la rigole est en moyenne de **12 Watts** sur la totalité de l'année.

3. UT Centre Alsace

1. Barrage de l'III à Colmar

Le barrage de l'III à Colmar assure le maintien du niveau d'eau dans le canal et la ville de Colmar. L'ouvrage est instrumenté, ainsi il existe des chroniques quotidiennes des hauteurs d'eau et des débits présents au barrage. Cependant, ces relevés étant exclusivement manuscrits, l'ensemble des données n'a pu être traité informatiquement. Grâce aux relevés quotidiens de la station de Sundhoffen, une analyse des débits de l'III a permis de déterminer les jours représentatifs du fonctionnement de l'ouvrage. Deux périodes ont été considérées pour l'étude :

- **L'été**, de juin à septembre : le débit moyen est de **5,5 m³/s** pour une hauteur de chute de **2,16 m**.
- **L'hiver**, d'octobre à mai. Le débit moyen vaut **18,25 m³/s** pour une hauteur de chute de **2,05 m**.

	Q (m ³ /s)	h (m)	P (kW)
Eté	5,5	2,16	116,54
Hiver	18,25	2,05	367,02

Tableau 20 : Puissances potentielles brutes au barrage de Colmar

Le barrage présente des puissances brutes relativement importantes, de **116 à 367 kW**.

2. Prise d'eau de Neuf-Brisach

La prise d'eau de Neuf-Brisach assure l'alimentation du CRRBN et du Canal de Colmar grâce aux apports du Rhin. Les prélèvements au niveau de cette prise d'eau varient peu au cours de l'année. Le débit moyen vaut **2,677 m³/s**.

	Q (m ³ /s)	S (m ²)	V(m/s)	P _{cin} (W)
Aqueduc	2,677	4	0,669	599,42

Tableau 21 : Puissance cinétique brute à la PE de Neuf-Brisach

La puissance cinétique brute au niveau de l'aqueduc avoisine les **600 Watts**. De plus, des jaugeages sur sites rapportent que les vitesses les plus importantes, en surface, sont de l'ordre de **1,6 m/s**.

Barrages strasbourgeois

Il n'existe pas d'historique de débits pour chaque ouvrage, seules les chroniques de débits de l'III sont disponibles à la station de Chasseur-Froid. Or, l'eau est répartie dans plusieurs chenaux à l'amont de cette station, et les ouvrages sont donc soumis à des débits différents, a priori inconnus.

Cependant, une précédente étude [2] a permis d'estimer la répartition des débits dans les différents bras du système, pour certaines conditions d'écoulement (étiage, module, crue).

Les débits utilisés dans le calcul des puissances brutes seront donc obtenus en considérant d'une part le débit total de l'III, et la fraction de ce débit associé à chaque bras d'autre part.

Deux cas de figures sont considérés : le débit moyen attendu Q_m , ou module ; et le $Q_{98\%}$ qui est le débit minimal disponible 98% du temps. Ces débits sont calculés sur 45 ans de données et sont disponibles sur le site de la banque hydro.

Pour l'III à Strasbourg, $Q_m = 60,7 \text{ m}^3/\text{s}$ et $Q_{98\%} = 31,8 \text{ m}^3/\text{s}$.

	part du Q_m total	Q_m (m ³ /s)	part du $Q_{98\%}$ total	$Q_{98\%}$ (m ³ /s)
III	100%	60,7	100%	31,8
ABATTOIR	32%	19,4	32%	10,2
AAR	14%	8,5	11%	3,5
ROBERTSAU	87%	52,8	89%	28,3

Tableau 22 : Calcul des débits de l'III à Strasbourg

Une campagne de jaugeage a été menée le 07/05/2019, dont le compte-rendu est présenté en **Annexe 7** dans le but d'étudier spécifiquement le potentiel cinétique du secteur lors de conditions hydrauliques et d'exploitation considérées comme représentatives du fonctionnement moyen, courant du secteur, c'est-à-dire au module. D'autres campagnes, en périodes spécifiques « été et hiver » n'ont pas pu être menées afin d'apporter une description plus fine du secteur : les résultats du jaugeage en condition d'exploitation courante seront donc appliqués à l'ensemble de l'année, été comme hiver.

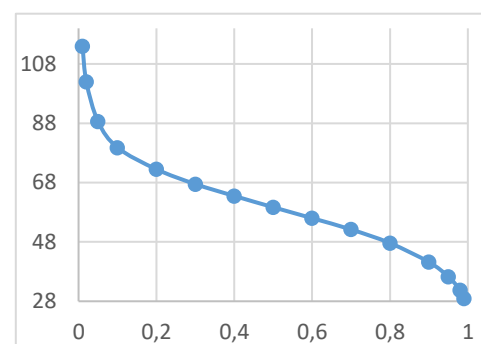


Figure 28 : Courbe des débits classés de l'III (station de Chasseur Froid - m³/s)

4. Barrage de l'Abattoir

Le barrage de l'Abattoir marque l'extrémité amont du Canal des Faux Remparts à Strasbourg. Y sont étudiées les puissances potentielles et cinétiques, brutes. Les chroniques de niveaux d'eau, traitées sur 5 ans, indiquent que la hauteur de chute au module est en moyenne de 1,57 m, et de 1,72 m en étiage.

	Q (m ³ /s)	h (m)	P (kW)
Module	19,4	1,57	298,79
Etiage	10,2	1,72	172,11

Tableau 23 : Puissances potentielles au barrage de l'Abattoir

Un jaugeage réalisé au moulinet le 07/05/2019, en conditions d'exploitation normales, fait état de vitesses en sortie de vannes de l'ordre de 4 m/s. Il s'agit d'un ordre de grandeur, car la puissance de l'écoulement et les conditions de jaugeage difficiles empêchent la mesure de valeurs précises. D'autres mesures, réalisées plus en aval de l'ouvrage, font état de vitesses de 1,5 m/s en moyenne.

La puissance cinétique brute a été calculée pour une section de vitesse homogène représentative de 1 m². En exploitation courante, les vannes sont ouvertes sur 12,5 mètres ; à l'aval, le canal fait 22 m de large.

	Vitesse (m/s)	Surface (m ²)	P (kW)/m ²	L (m)	P (kW)
Aux vannes	4	1	32	12,5	400,00
40m en aval	1,5	1	1,69	22	37,13

Tableau 24 : Puissances cinétiques au barrage de l'Abattoir

4. Barrage de l'Aar

Le barrage de l'Aar, à l'aval de Strasbourg, maintient le niveau navigable en ville en évacuant une partie des eaux de l'III. Y sont étudiées les puissances potentielles et cinétiques, brutes.

Au module, la hauteur de chute est de 1,8 m, mais il n'y a pas de mesures à l'aval permettant de connaître la chute en étiage. De par la configuration de l'ouvrage, et d'après les agents d'exploitation, il y a peu d'influence du niveau aval sur le niveau amont : une hauteur de chute de 1,8 m est donc également considérée en étiage, quitte à sous-estimer légèrement cette valeur.

	Q (m ³ /s)	h (m)	P (kW)
Module	8,5	1,8	150,09
Etiage	3,5	1,8	61,80

Tableau 25 : Puissances potentielles au barrage de l'Aar

Un jaugeage réalisé au moulinet le 07/05/2019, en conditions d'exploitation normale, fait état de vitesses au droit des vannes déversantes de 1,7 m/s (lame d'eau de 40 cm par-dessus les vannes). La puissance cinétique brute a été calculée pour une lame d'eau de 0,4 m et une longueur déversante de $3 \times 4,5 = 13,5$ m : la section de vitesse homogène vaut donc 5,4 m².

	Vitesse (m/s)	Surface (m ²)	P (kW)
Aux vannes	1,7	5,4	13,27

Tableau 26 : Puissance cinétique au barrage de l'Aar

5. Barrage à aiguilles de la Robertsau

Le barrage de la Robertsau, à l'aval de Strasbourg, maintient le niveau navigable en ville en évacuant une partie des eaux de l'III. Y sont étudiées les puissances potentielles et cinétiques, brutes.

Les chroniques de niveaux d'eau, traitées sur 5 ans indiquent qu'au module la hauteur de chute est de 0,72 m, et de 0,84 m en étiage.

	Q (m ³ /s)	h (m)	P (kW)
Module	52,8	0,72	372,94
Etiage	28,3	0,84	233,20

Tableau 27 : Puissances potentielles au barrage de la Robertsau

Un jaugeage réalisé au moulinet le 07/05/2019, en conditions d'exploitation normales, fait état de vitesses en surface (amont et aval) de 1,4 m/s. Plus en profondeur (0,5 à 1,1 m), les vitesses d'écoulement sont plus importantes : 1,7 m/s à mi-hauteur, et jusqu'à 2,1 m/s.

La puissance cinétique brute est calculée pour une section de vitesse homogène représentative de 1 m² ; la vitesse prise est la vitesse de mi-hauteur, à 0,5 m de fond, qui vaut 1,7 m/s. En exploitation courante, seuls 18 mètres d'aiguilles sont ouverts.

	Vitesse (m/s)	Surface (m ²)	P (kW)/m ²	L (m)	P (kW)
H moyenne	1,7	1	2,46	18	44,217

Tableau 28 : Puissance cinétique au barrage de la Robertsau

5. Récapitulatif

Dans sa configuration actuelle, le réseau présente une puissance brute totale de 1 200 kW l'été et 1 790 l'hiver. Pour indication, et compte-tenu des durées respectives de chaque saison, la puissance brute annuelle moyenne vaut 1 594 kW. En été, la puissance cinétique représente 8.7% de la puissance totale, contre seulement 5.4% en hiver.

Le secteur de Strasbourg présente le potentiel le plus important : entre 43 et 49% pour l'énergie potentielle ; ainsi que la quasi-totalité de la part cinétique avec 90 à 98% du potentiel total. Cependant, il ne s'agit que du potentiel effectivement identifié et quantifiable : d'autres secteurs n'ont pas pu être étudiés de ce point de vue.

Le tableau suivant, également en **Annexe 9**, fait la synthèse des paramètres et calculs précédents. Les caractéristiques de chaque site y sont rappelées.

Il convient de garder à l'esprit que ce potentiel brut total, absolu, n'est pas celui qui est utilisé par la suite : en effet, il est important de déterminer le potentiel utile brut à chaque ouvrage. Dans certains cas, par exemple, une partie de l'écoulement n'est pas exploitable de par la configuration du site : il convient alors de déterminer le potentiel brut réellement exploitable, découlant des réflexions d'aménagements. C'est à partir de là qu'est calculé le potentiel net de l'installation.

Ce nouveau potentiel brut exploitable est par ailleurs renseigné en **Annexe 10**.

Tableau récapitulatif des puissances potentielles brutes

RECAPITULATIF DU POTENTIEL BRUT			PUISSANCE POTENTIELLE						PUISSANCE CINETIQUE					
			été			hiver			été			hiver		
SITES			Q (m3/s)	H (m)	Ppot.brute (W)	Q (m3/s)	H (m)	Ppot.brute (W)	V (m/s)	Surface utile (m²)	Pcin brute (W)	V (m/s)	Surface utile (m²)	Pcin brute (W)
UT CRRBS	Rahin	Barrage	0,251	4,31	10613	0,666	4,31	28159	-	-	-	-	-	-
		Vanne de PE	0,309	1,6	4850	0,945	1,28	11866	0,401	0,771	25	0,600	1,575	170
		Rigole "amont"	-	-	-	-	-	-	0,200	1,54	6	0,300	3,150	43
	Champagney	Barrage	0,697	27	184614	0,360	31	109480	-	-	-	-	-	-
		Rigole "aval"	-	-	-	-	-	-	0,335	2,08	39	0,367	0,980	24
	CMHS	Ecluse 13	0,741	2,15	15629	0,583	2,15	12296	-	-	-	-	-	-
		Ecluse 11	0,417	1,8	7363	0,378	1,8	6675	-	-	-	-	-	-
		Ecluse 10	0,401	2,12	8340	0,462	2,12	9608	-	-	-	-	-	-
		Ecluse 9	0,291	1,84	5253	0,332	1,84	5993	-	-	-	-	-	-
	Largue	Vannes PE Friesen	-	-	-	-	-	-	0,292	0,418	5	0,292	0,418	5
		Rigole Friesen	-	-	-	-	-	-	0,233	0,523	3	0,233	0,523	3
		Rigole Valdieu	-	-	-	-	-	-	0,290	0,775	9	0,290	0,775	9
	Illfurth	Barrage	0,550	1,2	6475	2,42	0,8	18992	-	-	-	-	-	-
	Zillisheim	Barrage 1	1,119	1,5	16466	3,306	1,5	48648	1,025	8,5	4577	0,200	9,09	36
Barrage 2		1,876	1,5	27605	5,17	1,5	76077	1,01	9,16	4719	0,53	11,3	841	
UT CMR	Lorquin	Barrage	0,404	0,92	3649	0,404	0,92	3649	-	-	-	-	-	-
		Vanne PE	-	-	-	-	-	-	0,467	0,908	46	0,467	0,908	46
		Rigole	-	-	-	-	-	-	0,231	1,838	11	0,231	1,84	11
	Nitting	Barrage	0,700	1	6866	0,700	1	6866	-	-	-	-	-	-
		Vanne PE	-	-	-	-	-	-	0,527	2,116	154	0,527	2,12	154
		Rigole	-	-	-	-	-	-	0,263	4,232	39	0,263	4,23	39
	Plan Incliné	Conduites	0,380	44,55	166073	0,160	44,55	69926	-	-	-	-	-	-
	PE 18	Barrage	1,464	1	14362	2,878	1	28233	-	-	-	-	-	-
		Vanne	-	-	-	-	-	-	0,115	0,565	0	0,297	0,565	7
	PE 26	Barrage	2,547	1,35	33731	5,19	1,35	68734	-	-	-	-	-	-
Vanne		-	-	-	-	-	-	0,346	0,196	4	0,417	0,196	7	
PE 40	Rigole	-	-	-	-	-	-	0,330	0,650	12	0,330	0,650	12	
UT CA	Neuf-Brisach	Aqueduc	-	-	-	-	-	-	0,669	4	599	0,669	4	599
	Colmar	Barrage	5,5	2,16	116543	18,25	2,05	367017	-	-	-	-	-	-
	Strasbourg	B.Abattoir	10,2	1,72	172107	19,4	1,57	298793	1,5	22	37125	1,5	22	37125
		B.Aar	3,5	1,8	61803	8,5	1,8	150093	1,7	5,4	13265	1,7	5,4	13265
	B.Robertsau	28,3	0,84	233203	52,8	0,72	372937	1,7	18	44217	1,7	18	44217	

TOTAUX (kW) 1095,545

1694,041

104,857

96,615

Total été (kW)	1200,402
Total hiver (kW)	1790,656
Moyenne année (kW)	1593,905

III. Perspectives et faisabilité

A. Faisabilité et propositions d'aménagements

1. Choix d'équipements

Le choix d'équipement pour chaque site est déterminé en fonction :

- De ses caractéristiques hydrauliques : hauteur de chute, débit, vitesse d'écoulement ;
- Des enjeux de l'ouvrage : maintien de la ligne d'eau, sensibilité aux crues, franchissabilité piscicole ;
- Des contraintes d'exploitation : facilité d'installation et de maintenance, gestion des embâcles, non-perturbation de la gestion hydraulique ;
- D'enjeux locaux pour les riverains : nuisances sonores, impact visuel, emprise foncière.

Concernant la récupération d'énergie potentielle, les turbines VLH et les vis d'Archimède (notées VAV par la suite : Vis d'Archimède Verticale) introduites précédemment, présentent des gammes de fonctionnement compatibles avec la plupart des ouvrages.

De plus, elles ne nécessitent pas des travaux de génie civil importants, et sont ichtyocompatibles [4], [9], [13], [14]. L'emploi de ces turbines limite donc les modifications à apporter aux ouvrages et assurent une certaine transparence écologique.

L'installation de vis d'Archimède est préférée ici, car ce système est moins onéreux, plus rustique et résistant, notamment aux embâcles : la prise en charge de ce type de turbine est donc préférée par les équipes d'exploitation. De plus, les vis d'Archimède assurent un bon contrôle du niveau d'eau amont, ce qui est moins le cas des turbines VLH ; or le rôle d'un grand nombre d'ouvrages étudiés ici est avant tout d'assurer un niveau d'eau (navigation, prise d'eau). La turbine VLH est cependant préférée au niveau du barrage de l'Abattoir à Strasbourg en raison du secteur particulièrement sensible du centre-ville historique. En effet, la turbine VLH ne cause pas de nuisances sonores et a un faible impact visuel, contrairement à la vis d'Archimède. De plus, elle peut être mise hors d'eau afin de limiter son impact en cas de crues, ce qui la rend plus intéressante dans un secteur sensible aux inondations.

Deux ouvrages ne peuvent pas être équipés de ces systèmes : le Plan Incliné de Saint-Louis/Arzwiller, et le barrage de Champagny, en raison des fortes hauteurs de chute qu'ils présentent. Le choix de turbines s'est porté sur des turbines Pelton, en raison de leur capacité à fonctionner pour des débits variables (ce qui est le cas pour ces deux ouvrages au cours de l'année). L'eau utilisée transite déjà par des conduites forcées et ne transporte aucun embâcle. Il n'y a également aucun enjeu de continuité piscicole au droit de ces ouvrages.

Concernant le barrage à aiguilles de la Robertsau à Strasbourg, les hauteurs de chute sont trop faibles, quelle que soit la technologie envisagée : par conséquent, seule la récupération d'énergie cinétique peut à ce stade être étudiée.

Deux systèmes innovants ont été présentés afin d'exploiter les vitesses d'écoulement aux ouvrages : la vis d'Archimède horizontale (notée VAH par la suite) et le cylindre oscillant (noté C.O par la suite). Actuellement, les résultats des prototypes tendent à montrer que la vis a un rendement plus important et fonctionne pour des vitesses plus élevées, concentrées au niveau de la surface libre. Des vis seront par conséquent proposées pour des sites présentant des lames d'eau rapides, ce qui, dans les sites étudiés, correspond aux barrages de Zillisheim et de Strasbourg. Elles présentent l'avantage d'être peu contraignantes, tant pour la fabrication

et l'installation que pour la gestion en exploitation. Il était initialement envisagé d'en installer également au niveau des vannes de prises d'eau ; cependant l'étude précédente des sites fait état de vitesses trop faibles pour la vis d'Archimède horizontale : l'utilisation de cylindres oscillants est donc étudiée par la suite.

Les cylindres oscillants fonctionnent pour des vitesses plus faibles et sont sensibles aux écoulements turbulents [6], [11] : il est donc proposé d'en installer sur les rigoles d'alimentation, où les vitesses sont relativement faibles, et plus spécifiquement à proximité des vannes de prise d'eau (si elles ne provoquent pas de turbulences) afin de limiter le risque de dégâts dus aux embâcles.

2. Puissances nettes et implantations

Seront ici présentés de manière générale les aménagements envisagés pour chaque site, ainsi que la puissance nette de l'installation proposée. L'ensemble de ces résultats est repris de manière synthétique dans l'**Annexe 10**. La méthode permettant de déterminer la puissance nette d'une installation est la suivante : il convient en premier lieu de déterminer la puissance brute d'équipement, celle pour laquelle les aménagements sont proposés. Il peut s'agir de la puissance brute totale du site si l'ensemble du potentiel est exploité, ou d'une partie si seulement une portion de l'écoulement est utilisée. Certains aménagements modifient l'écoulement : la puissance brute est alors recalculée, de même que les autres impacts hydrauliques de l'équipement. Comme exposé à la **partie I**, la puissance nette d'une installation est le produit de la puissance brute d'équipement et du rendement de l'installation. Pour rappel, les rendements utilisés dans les calculs sont 0,85 pour les turbines Pelton, 0,8 pour les VAV et les turbines VLH, 0,3 pour les VAH, et 0,2 pour les C.O. Les caractéristiques de chaque site ont été rappelées au tableau **p.50**, ainsi qu'aux **Annexes 9 et 10**.

Les schémas d'implantation des aménagements sont présentés à l'**Annexe 8**, sur le même principe que l'exemple du Rahin inséré ci-après. Une note de calcul détaillée expose la démarche et les calculs menés pour le site du Rahin à l'**Annexe 13**. Une démarche analogue a été menée pour chaque site de l'étude.

1. UT CRRBS

Prise d'eau du Rahin, et rigole amont :

- La chute au niveau du barrage de restitution est compatible avec l'installation d'une vis d'Archimède pouvant prendre en charge la totalité du débit. Il est proposé de l'implanter en rive gauche de l'ouvrage, contre la passe à poissons : il n'y a ainsi pas de courant d'attrait parasite (1).
- La chute au niveau de la prise d'eau est également compatible avec l'installation d'une vis d'Archimède pouvant prendre en charge la totalité du débit. Il est proposé de l'implanter directement au niveau de la vanne et d'en réutiliser l'emprise (2).

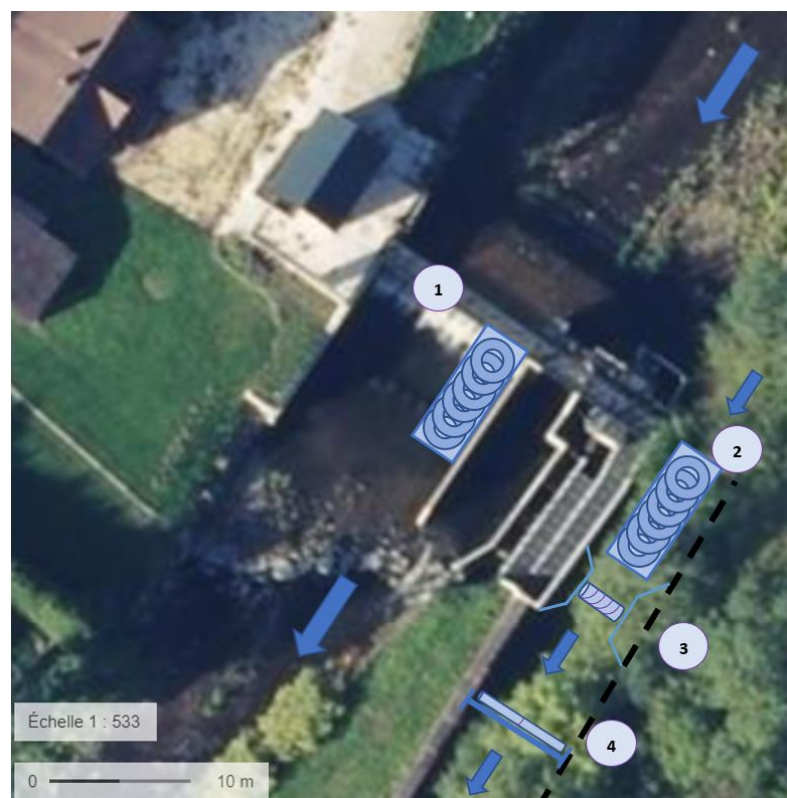


Figure 29 : Implantation des aménagements du Rahin

- Les vitesses dans la rigole en sortie de vanne sont actuellement trop faibles pour envisager la pose de vis d'Archimède horizontales, seuls des cylindres oscillants peuvent être installés. Il est proposé de profiter des travaux de génie civil nécessaires sur l'ouvrage pour réduire localement la largeur de la rigole en sortie de prise d'eau : en passant de 2,5 m à 1 m de large, les vitesses atteignent localement 1 m/s l'été et 1,5 m/s l'hiver, ce qui est favorable à l'implantation d'une vis d'Archimède horizontale (3). La reprise de la maçonnerie de la rigole sur un linéaire plus important n'est pas envisagée, afin de limiter les coûts et les modifications apportées à l'ouvrage : seul un cylindre oscillant est alors envisageable (4).

	Implantation	Barrage	Prise d'eau	Rigole proche	Rigole étendue	P nette totale (kW)
	Aménagement	VAV	VAV	rétrécissement et VAH	C.O	
P nette (W)	Été	8490	3880	47	1	12,418
	Hiver	22527	9493	319	9	32,348

Tableau 29 : Puissances nettes au Rahin

Le **rétrécissement local au niveau de la rigole** proche fait passer les vitesses de 0,4 à 1 m/s en été, et de 0,6 à 1,5 m/s en hiver : cet aménagement a donc un fort impact sur la puissance cinétique de l'écoulement. Sans cela, les puissances nettes auraient été de 7 et 42 W, contre 47 et 139 ici. **La production est donc multipliée entre 3 et 6 fois.**

Barrage de Champagney, et rigole aval :

- La chute au niveau du barrage de restitution est compatible avec l'installation d'une turbine Pelton pouvant prendre en charge la totalité du débit. Il est proposé de l'implanter au niveau bas d'arrivée des conduites forcées, en parallèle de la bonde de vidange. Cette dernière ne sera pas connectée à la turbine afin de conserver ses capacités d'évacuation.
- Comme précédemment, il est proposé de **réduire localement la largeur** de la rigole de 2,5 à 1 mètre. Les vitesses passent alors de 0,335 à 0,549 m/s l'été, et de 0,367 à 0,679 m/s l'hiver. Cela reste insuffisant pour l'implantation d'une VAH, mais améliore grandement l'énergie cinétique de l'écoulement pour un cylindre oscillant. Ainsi **la puissance nette triple** presque : de 8 à 21 W l'été, et de 24 à 83 W l'hiver.

	Implantation	Barrage	Rigole	P nette totale (kW)
	Aménagement	Pelton	C.O	
P nette (W)	Été	156922	21	156,943
	Hiver	93058	17	93,075

Tableau 30 : Puissances nettes à Champagney

Ecluses désaffectées du CMHS :

- La chute au niveau de chaque écluse est compatible avec l'installation d'une vis d'Archimède pouvant prendre en charge la totalité du débit. Il est proposé d'installer un seuil (maçonné, ou batardeau en bois mobile) sur la largeur inoccupée du sas afin de contraindre l'écoulement à emprunter la vis. Il n'y a de plus aucune problématique piscicole sur ce secteur.

	Implantation	E13	E11	E10	E9	P nette totale (kW)
	Aménagement	VAV	VAV	VAV	VAV	
P nette (kW)	Eté	12,503	5,891	6,672	4,202	29,268
	Hiver	9,837	5,34	7,687	7,794	30,658

Tableau 31 : Puissances nettes sur le CMHS

Prise d'eau et rigole de la Largue :

- Au vu des vitesses présentes, il est proposé de mettre en place des rétrécissements locaux de la largeur de la rigole, pour atteindre 1 mètre, au lieu de 2 et 2,5 mètres. Ainsi les vitesses calculées sont 2 à 2,5 fois plus élevées qu'avant aménagements, mais seuls des cylindres oscillants restent installables. Les puissances nettes trouvées sont, elles, multipliées par 4 sur la partie amont de la rigole, et par 6 sur la partie aval. Cependant, il convient de rappeler que ces puissances sont très faibles, même après aménagements : 4 W à l'amont et 12 à l'aval. On rappelle également qu'aucun fonctionnement saisonnier particulier n'a été observé. Le faible potentiel du site n'en fait a priori pas une priorité concernant l'équipement et le développement de la production hydroélectrique.

	Implantation	Vanne PE	Rigole amont	Rigole aval	P nette totale (W)
	Aménagement	C.O	C.O	C.O	
P nette (W)	Eté	4,15	4,15	11,9	20,2
	Hiver	4,15	4,15	11,9	20,2

Tableau 32 : Puissances nettes sur la rigole de la Largue

Barrage d'Ilfurth :

- La chute au niveau du barrage de restitution est compatible avec l'installation d'une vis d'Archimède. Cependant, elle reste faible et impose un débit réduit à travers la vis. Ainsi, une unique vis peut prendre en charge le débit d'été, mais deux sont nécessaires pour l'hiver. Le barrage étant long de 22 mètres, deux vis peuvent être installées sans causer de problèmes fonciers.

	Implantation	Barrage	P nette totale (kW)
	Aménagement	2 VAV	
P nette (W)	Eté	5180	5,18
	Hiver	15194	15,194

Tableau 33 : Puissances nettes au barrage d'Ilfurth

Barrages 1&2 de Zillisheim :

- Les chutes aux niveaux des barrages sont compatibles avec l'installation d'une vis d'Archimède pouvant prendre en charge la totalité du débit de chacun des ouvrages. Il est proposé de l'implanter contre la passe à poissons : il n'y a ainsi pas de courant d'attrait parasite.
- Les vitesses au niveau des clapets sont trop variables pour qu'une vis d'Archimède horizontale soit pertinente, d'autant que les clapets seront relevés afin de concentrer l'écoulement vers la vis.

	Implantation	Barrage 1	Barrage 2	P nette totale (kW)
	Aménagement	VAV	VAV	
P nette (W)	Eté	13173	22084	35,257
	Hiver	38918	60861	99,779

Tableau 34 : Puissances nettes aux barrages de Zillisheim

2. UT CMR

Prise d'eau de Lorquin, et petite rigole :

- La chute au niveau du barrage de restitution est compatible avec l'installation d'une vis d'Archimède pouvant prendre en charge la totalité du débit. Il est proposé de l'implanter en rive droite de l'ouvrage, contre le poste de contrôle : actuellement c'est en effet de ce côté que la vanne est préférentiellement ouverte.
- Les vitesses dans la rigole en sortie de vanne sont actuellement trop faibles pour envisager la pose de vis d'Archimède horizontales, seuls des cylindres oscillants peuvent être installés. Il est proposé de **réduire localement la largeur** de la rigole en sortie de prise d'eau : en passant de 2,47 m à 1 m de large, les vitesses atteignent localement 1,154 m/s sur toute l'année, au lieu de 0,467 m/s, ce qui est favorable à l'implantation d'une vis d'Archimède horizontale, la puissance nette est quant à elle **multipliée par 6**. La reprise de la maçonnerie de la rigole sur un linéaire plus important n'est pas envisagée, afin de limiter les coûts et les modifications apportées à l'ouvrage.

	Implantation	Barrage	Rigole proche	Rigole étendue	P nette totale (kW)
	Aménagement	VAV	VAH	C.O	
P nette (W)	Eté	2919	85	2	3,006
	Hiver	2919	85	2	3,006

Tableau 35 : Puissances nettes à Lorquin

Prise d'eau de Nitting, et grande rigole :

- La chute au niveau du barrage de restitution est compatible avec l'installation d'une vis d'Archimède pouvant prendre en charge la totalité du débit. Il est proposé de l'implanter en rive droite de l'ouvrage, contre le poste de contrôle : actuellement c'est en effet de ce côté que la vanne est préférentiellement ouverte.
- Les vitesses dans la rigole en sortie de vanne sont actuellement trop faibles pour envisager la pose de vis d'Archimède horizontales, seuls des cylindres oscillants peuvent être installés. Il est proposé de **réduire localement la largeur** de la rigole en sortie de prise d'eau : en passant de 5 m à 2 m de large, les vitesses atteignent localement 1,316 m/s sur toute l'année, au lieu de 0,527 m/s, ce qui est favorable à l'implantation d'une vis d'Archimède horizontale, la puissance nette est quant à elle **multipliée par 6**. La reprise de la maçonnerie de la rigole sur un linéaire plus important n'est pas envisagée, afin de limiter les coûts et les modifications apportées à l'ouvrage.

	Implantation	Barrage	Rigole proche	Rigole étendue	P nette totale (kW)
	Aménagement	VAV	VAH	C.O	
P nette (W)	Eté	5493	290	8	5,791
	Hiver	5493	290	8	5,791

Tableau 36 : Puissances nettes à Nitting

Plan Incliné de Saint-Louis/Arzviller :

- La chute au niveau du du plan incliné est compatible avec l'installation d'une turbine Pelton pouvant prendre en charge la totalité du débit. Il est proposé de l'implanter au niveau bas d'arrivée des conduites forcées, avant le bassin de dissipation.

	Implantation	Conduites	P nette totale (kW)
	Aménagement	Pelton	
P nette (W)	Eté	141162	141,162
	Hiver	59437	59,437

Tableau 37 : Puissances nettes au Plan Incliné

Prise d'eau 18 :

- La chute au niveau du barrage de restitution est compatible avec l'installation d'une vis d'Archimède pouvant prendre en charge la totalité du débit. Il est proposé de l'implanter en rive droite de l'ouvrage : actuellement c'est en effet de ce côté que le clapet est préférentiellement ouvert.
- Les vitesses au niveau de la vanne d'alimentation du bief 18 sont trop faibles pour une VAH ; de plus aucun aménagement simple ne permettrait d'augmenter les vitesses sans remettre en cause la capacité d'alimentation de l'ouvrage (par exemple la réduction du diamètre de la conduite aval). Le seul équipement non-intrusif pouvant alors être envisagé est un cylindre oscillant. Cependant, au vu de la puissance nette du cylindre, on n'envisagera de n'équiper que la chute du barrage sur ce site.

	Implantation	Barrage	Rigole	P nette totale (kW)
	Aménagement	VAV	C.O	
P nette (W)	Eté	11489	0	11,489
	Hiver	22587	1,5	22,5885

Tableau 38 : Puissances nettes à la PE 18

Prise d'eau 26 :

- La chute au niveau du barrage de restitution est compatible avec l'installation d'une vis d'Archimède pouvant prendre en charge la totalité du débit. Il est proposé de l'implanter en rive droite de l'ouvrage, contre la passe à poissons : il n'y a ainsi pas de courant d'attrait parasite.
- Les vitesses au niveau de la vanne d'alimentation du bief 27 sont trop faibles pour une VAH ; de plus aucun aménagement simple ne permettrait d'augmenter les vitesses sans remettre en cause la capacité d'alimentation de l'ouvrage (par exemple la réduction du diamètre de la conduite aval). Le seul équipement non-intrusif pouvant alors être envisagé est un cylindre oscillant. Mais là aussi, les cylindres sont très peu pertinents.

	Implantation	Barrage	Rigole	P nette totale (kW)
	Aménagement	VAV	C.O	
P nette (W)	Eté	26985	0,8	26,9858
	Hiver	54987	1,4	54,9884

Tableau 39 : Puissances nettes à la PE 26

Prise d'eau 40 :

- Seul un cylindre oscillant est adapté aux vitesses de ce site ; de plus la taille déjà réduite de la rigole ne permettrait pas un rétrécissement local garantissant suffisamment de place pour le cylindre.

P nette (W)	Implantation	Barrage	P nette totale (kW)
	Aménagement	C.O	
	Eté		2,4
Hiver		2,4	0,0024

Tableau 40 : Puissances nettes à la PE 40

3. UT CA

Barrage de l'III à Colmar :

- La chute au niveau du barrage est compatible avec l'installation de deux vis d'Archimède pouvant prendre en charge la totalité du débit. Il est proposé de les implanter en rive droite de l'ouvrage, contre la passe à poissons : il n'y a ainsi pas de courant d'attrait parasite.

P nette (W)	Implantation	Barrage	P nette totale
	Aménagement	2 VAV	
	Eté		93234
Hiver		293613	293,613

Tableau 41 : Puissances nettes au barrage de Colmar

Prise d'eau de Neuf-Brisach :

- La vitesse moyenne de l'écoulement permet l'installation d'un cylindre oscillant, qui, à lui seul représente une puissance installée de 120 W. De plus, lors de jaugeage, il a été observé que la vitesse superficielle de l'écoulement pour des débits proches avoisine les 1,6 m/s ; il est par conséquent proposé d'installer une VAH en complément du cylindre oscillant. La vis fera 1 m de long pour 40 cm de diamètre, soit une surface utile de 0,2 m² (pour rappel, seule la moitié de la vis est immergée), sa puissance brute est alors de 410 W. La vis sera placée à l'aval immédiat de la vanne, afin de bénéficier de plus de vitesse ; le cylindre sera placé légèrement plus loin afin de ne pas subir les perturbations éventuelles de la vanne et de la vis.

P nette (W)	Implantation	Corps d'aqueduc	Aval vanne	P nette totale (kW)
	Aménagement	C.O	VAH	
	Eté		120	123
Hiver		120	123	0,243

Tableau 42 : Puissances nettes à la PE de Neuf-Brisach

Barrage de l'Abattoir :

- La chute au niveau du barrage est compatible avec l'installation d'une vis d'Archimède, mais une turbine VLH est préférée ici car plusieurs vis auraient été nécessaires là où une seule VLH suffit. De plus, celle-ci génère moins de nuisances sonores, et moins de génie civil que deux vis. Enfin, elle est plus transparente que les vis lors de crues, ce qui est appréciable dans ce secteur sensible aux inondations.
- Il aurait été intéressant d'exploiter le potentiel cinétique du site, mais aucun des systèmes présentés dans cette étude n'est envisageable ici : en effet, si le débit est concentré au niveau de la VLH, les vannes restantes sont fermées, et une VAH n'aurait plus d'intérêt. Plus à l'aval, il n'existe pas d'emplacement suffisamment adapté à la mise en œuvre de ces systèmes (localisation, navigation, embâcles importants).

	Implantation	Barrage	P nette totale (kW)
	Aménagement	VLH	
P nette (W)	Eté	137685	137,685
	Hiver	239034	239,034

Tableau 43 : Puissances nettes au barrage de l'Abattoir

Barrage de l'Aar :

- La chute au niveau du barrage est compatible avec l'installation d'une vis d'Archimède pouvant prendre en charge la totalité du débit. Il est proposé de l'implanter dans l'emprise de la vanne centrale actuelle (n°3) afin de limiter l'érosion des berges à l'aval. Les autres vannes seront préférentiellement fermées afin de favoriser l'écoulement par la turbine.
- Dans la mesure où une vis d'Archimède verticale concentre le débit du barrage, les vannes restantes sont fermées et une VAH n'aurait plus d'intérêt.

	Implantation	Barrage	P nette totale (kW)
	Aménagement	VAV	
P nette (W)	Eté	49442	49,442
	Hiver	120074	120,074

Tableau 44 : Puissances nettes au barrage de l'Aar

Barrage à aiguilles de la Robertsau :

- La chute au niveau du barrage est insuffisante pour les techniques de récupération d'énergie potentielle, mais les importantes vitesses permettent l'installation de VAH. Les fermettes composant le barrage peuvent servir de structures porteuses pour les vis. Le barrage étant géré par mètre linéaire d'aiguilles (un mètre est « ouvert » à la fois, et les ouvertures sont réparties de manière homogène sur la longueur du barrage), il est proposé d'installer des vis longues d'un mètre. Comme pour l'aqueduc de Neuf-Brisach on considèrera des vis de section utile 0,2 m². Afin de ne pas être trop gênantes pour l'exploitation, on propose d'installer trois de ces vis, car il est rare d'avoir moins de trois mètres d'aiguilles d'ouverts. Au-delà de trois vis, certaines devraient être changées régulièrement de place, et seraient plus vulnérables aux embâcles. Chaque vis présente ainsi une puissance nette de 147,4 W.

	Implantation	Barrage	P nette totale (kW)
	Aménagement	3 VAH	
P nette (W)	Eté	442	0,442
	Hiver	442	0,442

Tableau 45 : Puissances nettes au barrage à aiguilles

3. Bilans et estimation financière

Tous les résultats des calculs menés précédemment sont présentés dans le tableau récapitulatif à l'**Annexe 10**. L'**Annexe 12** présente quant à elle la part de chaque UT et de chaque ouvrage dans le potentiel énergétique de la DT après les aménagements proposés. Il ressort de cette étude que les ouvrages les plus intéressants à équiper sont les barrages sur l'Ille de Colmar à Strasbourg, le barrage de Champagny et le Plan Incliné.

En quelques chiffres, il ressort de cette étude un potentiel brut moyen sur le réseau de **1 173 kW**. Après avoir décliné et pris en compte les options d'aménagement, la puissance nette de l'ensemble des aménagements s'approche de **950 kW** en moyenne sur l'année. L'analyse suivant des périodes de fonctionnement hydraulique comparables permet d'estimer le temps de turbinage sous ces conditions hydrauliques : ainsi l'énergie produite sur une année peut s'élever à **8,206 GWh**.

Est présentée ici l'étude économique globale dans le cas où les aménagements proposés précédemment sont installés. La comparaison de plusieurs projets d'installation de centrales hydroélectriques a permis de déterminer un coût moyen d'installation, comprenant entre autres les études de maîtrise d'œuvre, le matériel, le génie civil, les équipements divers ainsi que le raccordement **[3], [13], [20], [23]**. Ce prix a été estimé à 500 000 € TTC pour chacune des turbines suivantes : les vis d'Archimède verticales, la turbine VLH et les turbines Pelton. Cela représente un total de **10 M€** pour l'ensemble des vingt installations concernées. Est incluse dans ce chiffre une marge importante en cas d'aléas : les études de faisabilité et d'avant-projet détermineront un coût plus représentatif au cas par cas.

Les systèmes de récupération d'énergie cinétiques sont bien moins onéreux, les installations étant mobiles et peu intrusives ; les aménagements annexes (étranglement des flux) sont composés d'éléments mobiles pouvant être désinstallés en cas de nécessité hydraulique ou de maintenance. Il y a donc peu de génie civil nécessaire, la plupart de ces aménagements pouvant être pris en charge en interne : on prendra comme coût représentatif 2 000 € par cylindre et 10 000 € par vis d'Archimède verticale, qui nécessite une pièce usinée de dimensions relativement importantes. Ces estimations prennent en compte la conception, l'usinage des pièces et leur installation sur site, avec reprise éventuelle du génie civil pour l'étranglement d'une portion courte de rigole. Là aussi, ces chiffres tiennent compte des aléas pouvant survenir sur le projet. Les sept vis et les onze cylindres représentent ainsi un total de **92 000 €**. Ainsi, l'équipement total du réseau reviendrait à **10,1 M€**, avec une certaine marge prenant en compte les aléas et les biais d'estimations.

En fonction de la puissance produite ainsi que de l'exploitation de l'aménagement, l'État propose différents prix d'achat pour l'hydroélectricité. L'Arrêté du 13 décembre, appelé H16, fixe les conditions d'achat et de complément de rémunération pour l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie hydraulique des lacs, des cours d'eau et des eaux captées gravitairement. Il fixe en particulier les conditions tarifaires de l'Obligation d'Achat (OA) et précise que le contrat est conclu pour une durée de 20 ans. L'Obligation d'Achat est valable pour les installations nouvelles dont la puissance installée est strictement inférieure à 500 kW. La tarification à une composante, pour les ouvrages de basse chute, est de 132 €/MWh. Celle à deux composantes est de 96 €/MWh en été et de 182 €/MWh en hiver. Il faut prendre en compte le fait que cette seconde tarification considère deux saisons de durée égale, soit six mois d'été et six mois d'hiver alors que les périodes été/hiver considérées dans l'étude sont, elles, de quatre et huit mois. Ainsi, deux mois de la saison hiver sont traités selon la tarification « été ».

Avec la tarification 1, qui applique un prix unique sur toute l'année, les recettes sont de 1,083 M€ pour la production annuelle de 8,206 MWh. Selon la tarification 2, la saison été produit 2,041MWh, soit 187,742 k€. La saison hiver, avec 6,165 MWh, génère 8983,298 k€. Sur l'année totale, les revenus sont donc de **1,171 M€** selon la tarification 2. Cette seconde tarification est donc plus avantageuse. De plus, les équipements proposés sont robustes et facile d'entretien : ainsi les coûts de maintenance sont réduits. Les turbines classiques nécessitent environ 1 000 € de maintenance annuelle [3], [20]. Les dispositifs de récupération d'énergie cinétique présentent des coûts ponctuels et marginaux.

A ce stade, compte tenu des coûts d'installation et des recettes estimées, l'équipement total du réseau sera **rentable d'ici huit à neuf ans**. Il est bien entendu possible de n'équiper qu'une partie des sites étudiés et d'écarter les moins rentables. L'**Annexe 11** présente la rentabilité de chaque organe étudié : il est ainsi possible de déterminer les éléments les plus intéressants à équiper. Il ressort de cette étude que le potentiel cinétique ne représente que 0,1% des recettes annuelles de l'ensemble des sites étudiés. Le classement des sites à forte rentabilité est similaire à celui des sites à la plus grande production en **Annexe 12** ce qui correspond aux barrages de l'III, et fortes chutes de Champagny et du Plan Incliné de Saint-Louis/Arzviller. Dans cette étude, l'énergie potentielle apparaît comme la seule immédiatement valorisable compte-tenu des techniques actuelles et de l'état de développement des systèmes hydroliens considérés ici.

B. Limites et perspectives

1. Limites de l'étude

Cette étude s'est voulue la plus exhaustive possible, tout en cherchant à pouvoir trouver des terrains de comparaison entre les sites traités. C'est par exemple le cas de la définition des périodes hydrauliques été/hiver qui décrivent bien le fonctionnement saisonnier de l'ensemble des ouvrages du réseau, et qui résulte de l'analyse fine des données de gestion et de la bibliographie interne, ainsi que des échanges avec les équipes d'exploitation et les référents techniques.

Cependant, la présente étude repose sur un certain nombre de « zones d'ombre » concernant la description de plusieurs sites et leur fonctionnement : c'est par exemple le cas des barrages de navigation du CRRBS, à Illfurth et Zillisheim, sur lesquels ne s'appliquent aucun règlement d'eau, où il n'existe aucune donnée d'exploitation ni aucun système de mesure (encore aujourd'hui), et pour lesquels les dimensions mêmes de l'ouvrage sont méconnues (aucun plan ni relevé topographique disponible). Ainsi, des données issues de projets de règlement d'eau ont été utilisées, alors que ceux-ci ne sont pas encore approuvés : leur mise en application a été anticipée.

Un grand nombre d'ouvrages, comme dit précédemment, ne sont pas équipés d'instruments de mesures (niveaux d'eau, vitesses, débits) ; il a donc fallu déterminer ces données par d'autres moyens et hypothèses, comme par exemple avoir recours aux stations de la Banque Hydro, ou encore faire des estimations à partir de la géométrie des ouvrages et des habitudes de gestion. Il va sans dire que si rigoureuses que puissent être ces méthodes, elles ne peuvent être aussi fiables que la mesure directe, sur site, de la donnée.

Vient ensuite le cas des ouvrages instrumentés permettant le relevé des données : ils apportent une véritable vision sur le comportement et la gestion du site, ce qui est appréciable pour la qualité de l'étude. Cependant, ces données peuvent être conservées localement, parfois sous forme manuscrite, ce qui les rend difficiles d'accès et de traitement. Aussi, certaines ne sont accessibles qu'à un pas de temps important, souvent mensuel, parfois bi ou

tri-mensuel : l'analyse fine n'est donc pas toujours possible et certains phénomènes se retrouvent lissés dans la chronique. De plus, ces chroniques couvrent des périodes différentes suivant les ouvrages : ainsi certains disposent d'un suivi quotidien sur plusieurs dizaines d'années, quand d'autres n'ont que des moyennes mensuelles sur les cinq dernières. Il existe aussi le cas d'ouvrages très récemment équipés, dont les données ne sont disponibles que depuis quelques mois ; il faut d'ailleurs faire attention : certains de ces récents appareils de mesures ne sont parfois pas encore bien calibrés, et les données remontées sont inexploitable.

Ainsi, la principale limite de cette étude est de traiter simultanément, et sur un même niveau, des ouvrages à la description très inégale. La précision des données et la justesse des estimations présentées précédemment sont donc à remettre en perspectives avec le degré d'équipement et de suivi des ouvrages. Pour rappel, les **Annexes 4, 5 et 6** font état de l'instrumentation et du niveau de connaissances des ouvrages. Il est également important de relever que certains ouvrages n'ont pas été étudiés quand bien même ils pouvaient présenter un potentiel intéressant. Cela est dû au manque de données et de connaissances concernant le fonctionnement des sites. C'est par exemple le cas des écluses de Niffer et du canal de Huningue, ainsi que du système alimentaire de l'étang du Stock.

Reste enfin à évoquer le biais concernant la faisabilité réelle de chaque projet. En effet, une estimation très générale des coûts et contraintes a été menée afin d'affiner un peu plus la présente étude de potentiel, mais celle-ci ne saurait en aucun cas se substituer à une étude de faisabilité réelle prenant en compte, et dans le détail, les spécificités et enjeux de chaque site, les difficultés d'installations, d'exploitation et de maintenance.

2. Démarches complémentaires

Les démarches complémentaires sont destinées à l'amélioration et l'approfondissement de la présente étude. Parmi les points noirs relevés précédemment, on distingue surtout le manque d'homogénéité dans les données collectées, parfois même le manque de données tout court. Afin de pallier ce manque, des campagnes d'instrumentations sont actuellement en cours sur le réseau : si toutes n'ont pas pu être utilisées pour cette étude, il va sans dire qu'elles seront d'un grand intérêt pour son amélioration, une fois les sites équipés et calibrés. Une attention particulière devra également être portée à la description et au dimensionnement de certains ouvrages très mal connus et de leurs caractéristiques ; typiquement le barrage d'Ilfurth, ou encore certaines rigoles à la géométrie incertaine.

Dans l'attente de ces installations, et par nécessité de recueillir des données, quelques campagnes de jaugeages et de mesures ont été menées. Celles-ci furent très utiles et révélatrices des fonctionnements hydrauliques des sites. Malheureusement, il n'a pas été possible de jauger tous les sites sur plusieurs saisons : afin d'améliorer et de détailler la présente étude, il sera nécessaire de continuer et de compléter les jaugeages aux ouvrages afin d'en décrire précisément le fonctionnement.

Vient enfin le manque cruel de données fiables concernant les systèmes innovants de récupération d'énergie cinétique : afin de pouvoir mieux appréhender leurs possibilités d'implantation, leurs fonctionnements et leur production, il est important de prendre le temps de les étudier, en laboratoire comme sur le terrain, et de reprendre la présente étude avec une idée plus claire du potentiel de ces systèmes.

Ces démarches permettraient également d'intégrer des sites qui, faute de données ou de descriptions satisfaisantes, n'ont pas été inclus dans la présente étude ; c'est par exemple le cas des écluses de Niffer et du canal de Huningue, ou encore de la situation très particulière de l'alimentation gravitaire de l'étang du Stock.

3. Perspectives

Cette étude a pour but de faire un état des lieux du potentiel hydroélectrique de la DT et de présenter aux décideurs des pistes d'aménagements pour le réseau. Ce travail présente donc une première idée des sites les plus intéressants à équiper, ce qui donnera lieu à des réflexions plus poussées, à l'intégration de la question hydroélectrique lors de travaux sur les ouvrages, voire à la recherche exclusive de la valorisation du potentiel étudié.

En effet, suite à la première étude du réseau strasbourgeois, à laquelle ce travail fait suite, une réflexion sur la petite hydroélectricité a été intégrée au programme de reconstruction du barrage à aiguilles de la Robertsau. Une première étude de faisabilité concernant l'implantation de vis d'Archimède dans une station de pompage sur le Rhin a également vu le jour et est à présent portée au niveau national de l'établissement. Une autre étude de faisabilité est d'ailleurs évoquée concernant le potentiel du barrage de Champagny : les premières réflexions présentées précédemment serviront de base pour la compréhension et le traitement du sujet.

Ainsi, ces premières réflexions sur l'hydroélectricité témoignent d'un réel intérêt de l'établissement, qui se concrétise par la décision d'affiner les projets et de faire évoluer ces idées grâce à des opérations concrètes sur le terrain et les ouvrages. La présente étude permettra donc de déterminer les pistes prioritaires pour la DT dans la recherche de nouveaux potentiels hydroélectriques, et de fournir des éléments concrets lors de la définition des besoins d'étude.

Dans cette étude, l'énergie générée grâce aux installations hydroélectriques a été présentée en considérant la revente de la totalité de la production au réseau EDF. Cette perspective est tout à fait envisageable, mais l'électricité pourrait également être stockée et utilisée sur place dans une logique d'autoconsommation. Ainsi, les ouvrages seraient alimentés directement avec de l'énergie produite localement. Cet aspect est surtout intéressant dans le cas de sites isolés, typiquement des stations de mesures, à proximité desquels il n'existe aucun réseau électrique, que ce soit pour l'alimentation du site, ou pour la revente de l'hydroélectricité générée.

Le dernier point important de cette étude est la prise en compte et la mise en avant de dispositifs innovants, et ce pour la première fois. En plus de leur donner une certaine visibilité à travers cette première étude, il a été identifié plusieurs sites d'implantation possibles, présentant une grande diversité de configurations et de caractéristiques hydrauliques. Un prototype n'a malheureusement pas pu être conçu, fabriqué et installé dans les délais de ce travail de fin d'étude, mais ce dernier a permis le rapprochement entre l'établissement VNF, ses équipes et le laboratoire de recherche ICube. A présent, une grande partie du personnel VNF a été informé et impliqué dans la recherche et la réflexion sur ces sites, et est à présent familiarisée avec ces nouvelles technologies émergentes. Une convention visant au développement des sites test identifiés lors de cette étude est actuellement en cours de rédaction, ce qui concrétisera encore plus l'intérêt et l'avenir du présent travail.

Conclusion générale

Cette étude a pour but d'améliorer la connaissance de Voies navigables de France concernant le potentiel hydroélectrique du réseau géré par la direction territoriale de Strasbourg vis-à-vis de ses ouvrages non-exploités. Cela concerne des ouvrages à faible potentiel : dans le cas présent, il est question de micro et pico-hydroélectricité, c'est-à-dire de sites dont la puissance est de quelques centaines, voire bien souvent de quelques dizaines, de kilowatts. Sont étudiées indifféremment les puissances potentielles et cinétiques, au moyen de types de turbines traditionnellement utilisées, ainsi que grâce à la prise en compte de nouveaux dispositifs expérimentaux basés sur les vitesses des écoulements.

Outre l'estimation du potentiel du réseau de la DTS, cette réflexion apporte des propositions d'aménagements pour les sites étudiés ainsi que des pistes d'améliorations concernant la démarche mise en œuvre. Afin de réaliser les estimations les plus justes, chaque site a été étudié séparément sur deux périodes hydrauliques caractéristiques du fonctionnement général du réseau. La démarche mise en place lors de cette étude consiste en premier lieu au diagnostic du secteur d'étude, tant en termes de fonctionnement que d'équipements et d'enjeux. C'est à partir de ce point qu'ont été identifiés les sites pertinents pour l'étude : vingt-deux, pour un total de trente-deux implantations et organes distincts. Les types d'ouvrages sont variés, allant de barrages réservoirs à de simples vannes d'alimentation. La phase de diagnostic préliminaire a également permis de déterminer les deux périodes représentatives de fonctionnement du réseau : de juin à septembre et d'octobre à mai, et c'est pour ces deux saisons que les sites retenus ont été étudiés. Les données nécessaires à l'estimation des potentiels hydroélectriques ont été recueillies grâce à des supports variés : historiques de données, relevés locaux, études antérieures ou organismes extérieurs. Suite aux calculs du potentiel, des aménagements ont été proposés, afin que l'exploitation des sites reste compatible avec les activités de gestion de VNF et son fonctionnement actuel. Une rapide estimation financière de la totalité des aménagements proposés et de leur productible est également proposée, permettant d'apprécier le potentiel du réseau de la DTS grâce à une vision plus complète. En dernier lieu, le présent rapport fait état de toutes les limites de l'étude réalisée, propose des pistes destinées à son amélioration, et fait le point sur les perspectives s'ouvrant à VNF, du point de vue de la petite hydroélectricité.

Cette étude a estimé le potentiel de l'ensemble des vingt-deux sites à une puissance brute annuelle moyenne de 1 673 kW au total, mais dont seulement **1 173 kW** sont exploitables en raison des possibilités d'aménagements des sites. Ces puissances sont réparties comme suit : 1 326 kW en hiver et 867 kW en été. Après prise en compte des propositions d'aménagements, le **potentiel réalisable net moyen** est de **950 kW**, 1 070 en hiver et 709 en été, ce qui correspond à une production annuelle de **8,206 GWh**. Compte-tenu des recettes liées à la vente de cette hydroélectricité, soit **1,171 M€** par an, et des frais engendrés par ces aménagements, soit environ **10,1 M€**, l'ensemble de l'équipement du réseau serait rentable au bout de **9 ans**. Compte-tenu du faible potentiel mis en valeur par les prototypes hydroliens, il ressort de l'analyse de sites que la récupération d'énergie cinétique ne représente actuellement qu'une infime part du potentiel hydroélectrique réalisable sur le réseau.

Cette étude permet à la Direction territoriale de Strasbourg de porter un regard plus complet sur les ressources de son réseau et d'identifier des actions prioritaires à mettre en œuvre dans le but de développer son potentiel hydroélectrique. De plus, elle donne de la visibilité à des systèmes innovants et favorise leur développement grâce aux premières réflexions sur leur installation et leur production, en ouvrant la porte à de futurs projets de recherche et des conventionnements entre laboratoires et gestionnaires du réseau.

Bibliographie

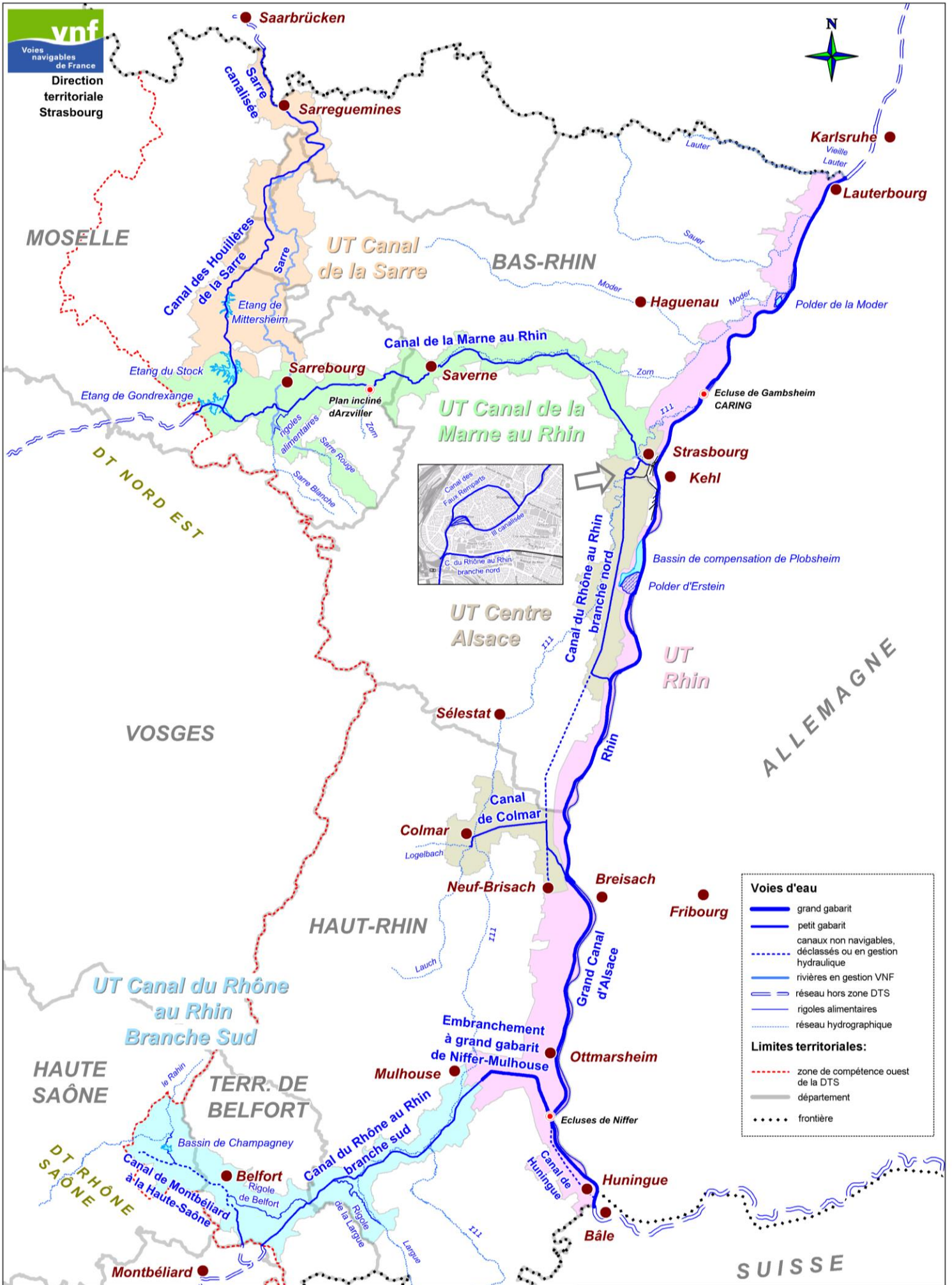
- [1] VNF. (2014). **Etude de connaissance et d'amélioration du fonctionnement hydraulique du réseau de la DTS**. Rapport d'étude, Setec Hydratec, Sepia Conseils.
- [2] VNF. (2013). **Diagnostic de franchissabilité piscicole du système III à Strasbourg, diagnostic et étude de faisabilité**. Rapport d'étude, Artelia.
- [3] VNF. (2017). **Etude de faisabilité technico-économique en vue de l'installation d'une micro-centrale de production hydroélectrique à Niffer**. Rapport d'étude, Hydrostadium.
- [4] Auger, A., Laureau, M., Motz, J.G., Proisy, J.A., Thierry, J.L. (2013). **La vis d'Archimède : De l'irrigation antique à l'énergie moderne**. Hydrauxois.
- [5] Barda, K. (1999). **Wasserkraftschnecke ermöglicht stromerzeugung über kleinkraftwerke**. *MM. Maschinenmarkt*, 105:52-56.
- [6] Bernitsas, M.M., Raghavan, K., Ben-Simon, Y., and Garcia, E.M.H. (2008). **VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A New Concept in Generation of Clean and Renewable Energy From Fluid Flow**. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 130(4), 041101.
- [7] Butera, I., and Balestra, R. (2015). **Estimation of the hydropower potential of irrigation networks**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 140–151.
- [8] De Almeida, A.T., Inverno, C., Lopes de Almeida, J., Alfeu Sà Marques, I., and Santos, B. (2011). **Small-hydropower integration in a multi-purpose dam-bridge for sustainable urban mobility**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 5092–5103.
- [9] Dellinger, G. (2015). **Etude expérimentale et optimisation des performances hydrauliques des vis d'Archimède utilisées dans les micro centrales hydroélectriques**. Thèse doctorale, Université de Strasbourg.
- [10] Dellinger, G., Terfous, A., and Ghenaim, A. (2014). **Optimisation des vis d'archimède pour produire de l'énergie dans les microcentrales hydroélectriques**. *AUGC 2014*.
- [11] Dellinger, N., François, P., Lefebure, D., Mose, R., Garambois, P-A. (2017). **An experiment of a hydropower conversion system based on vortex-induced vibrations in a confined channel**. *Renewable Energy*, 115, 54–63.
- [12] Duarte, L., Dellinger, N., Dellinger, G., Ghenaim, A.; and Terfous, A. (2019). **Experimental investigation on the dynamic behavior of a fully passive flapping foil hydrokinetic turbine**. *Journal of Fluids and Structures*, 88:1-12.
- [13] Fraser R., Deschênes, C., O'Neil, C., and Leclerc, M. (2007). **VLH: Development of a new turbine for Very Low Head sites**. *Waterpower XV*, paper n°157.
- [14] Kiebel, P., Pike, R., and Coe, T. (2009). **The Archimedes screw turbine: Assessment of the three leading edge profiles**. Technical report, Fishetek Consulting.

- [15] Lashofer, A., Hawle, W., and Pelikan, B. (2012). **State of technology and design guidelines for the Archimedes screw turbine.** *Hydro 2012*.
- [16] Müller, G, and Senior, J. (2009). **Simplified theory of Archimedean screws.** *Journal of Hydraulic Research*, 47:5, 666-669.
- [17] Münch-Alligné, C., Avellan, F. (2013). **Exploitation du potentiel de la petite hydraulique.** *Bulletin ElectroSuisse*, 2 : 41-45.
- [18] Paish, O. (2003). **Small hydro power: technology and current status.** *Fuel and Energy Abstracts*, 44(4), 242.
- [19] Schmitt, J. (2013). **Construction d'un modèle visant à optimiser la gestion des voies d'eau de la Direction Territoriale VNF de Strasbourg.** Mémoire de fin d'études, ENGEES.
- [20] Watrin, A. (2016). **Etude du potentiel hydroélectrique de l'III domaniale et analyse de faisabilité.** Mémoire de fin d'études, ENGEES.
- [21] Williamson, S., Strak, B., and Booker, J. (2014). **Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis.** *Renewable Energy*, 61:43-50.
- [22] REN21, (2018). **Renewables 2018 Global Status Report.**
- [23] Canada, Department of Natural Resources, Ottawa. (2004). **Micro-hydropower Systems – A Buyer's Guide.**
- [24] Lamoën, J. (1947). **Note sur quelques types de Canaux Venturi (Canaux à ressaut).** *Annales des Travaux Publics de Belgique*.

Annexes

Annexe 1 : Carte du réseau et des Unités Territoriales de la DTS	67
Annexe 2 : Carte des sites retenus pour l'étude	68
Annexe 3 : Schémas de fonctionnement des secteurs	69
Annexe 4 : Description des sites d'étude : UT CRRBS	73
Annexe 5 : Description des sites d'étude : UT CMR	77
Annexe 6 : Description des sites d'étude : UT CA	82
Annexe 7 : Compte-rendu de la campagne de jaugeage des ouvrages strasbourgeois.....	84
Annexe 8 : Aménagement des sites	86
Annexe 9 : Tableau récapitulatif des puissances potentielles brutes	93
Annexe 10 : Tableau récapitulatif du potentiel global de la DTS pour les cas envisagés	94
Annexe 11 : Tableau récapitulatif du productible et des recettes de chaque site	95
Annexe 12 : Bilans du productible par UT et par ouvrage.....	96
Annexe 13 : Note de calcul des puissances nettes au barrage du Rahin.....	98

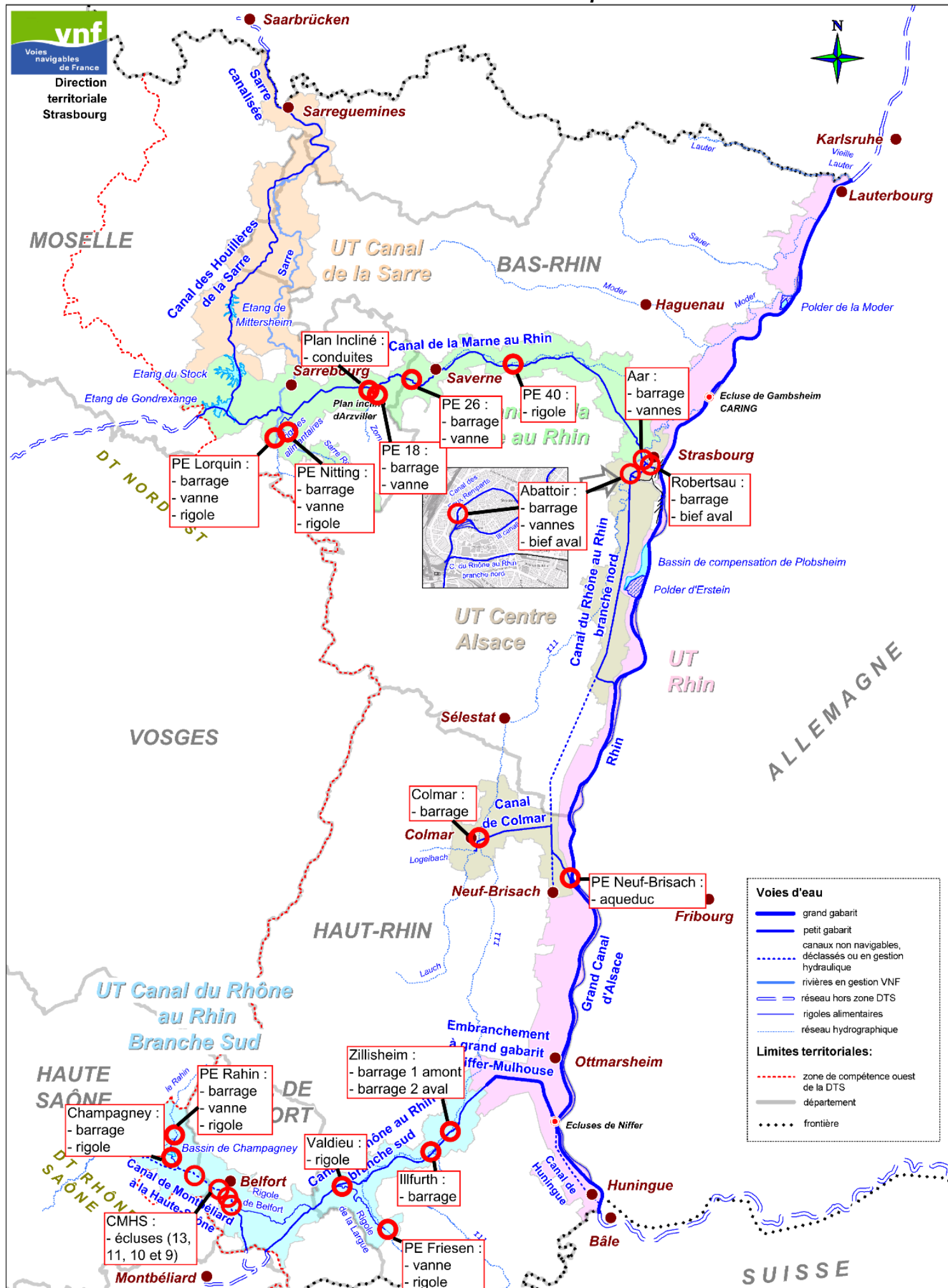
Annexe 1 : Carte du réseau et des Unités Territoriales de la DTS



Voies d'eau	
	grand gabarit
	petit gabarit
	canaux non navigables, déclassés ou en gestion hydraulique
	réseaux en gestion VNF
	réseau hors zone DTS
	rigoles alimentaires
	réseau hydrographique

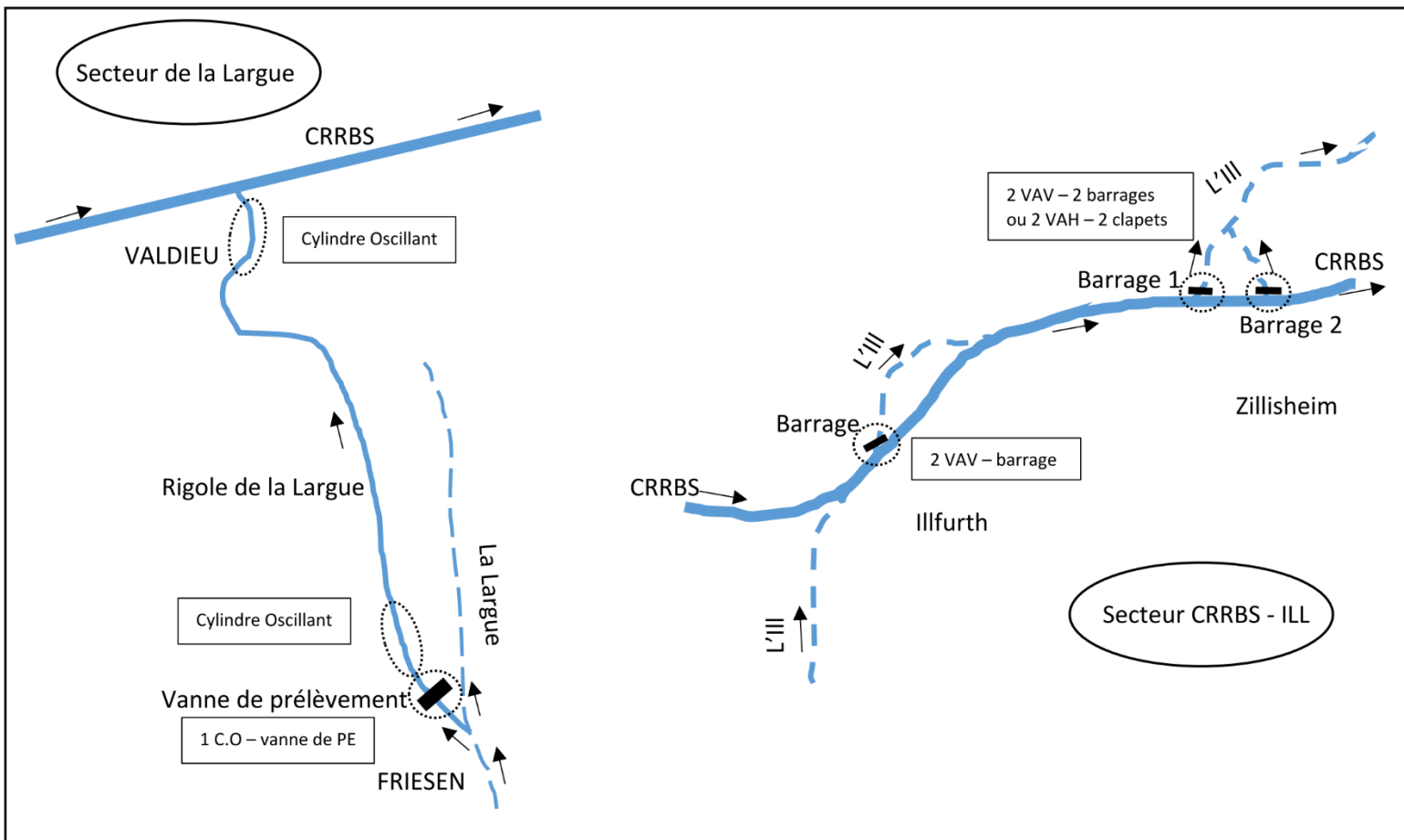
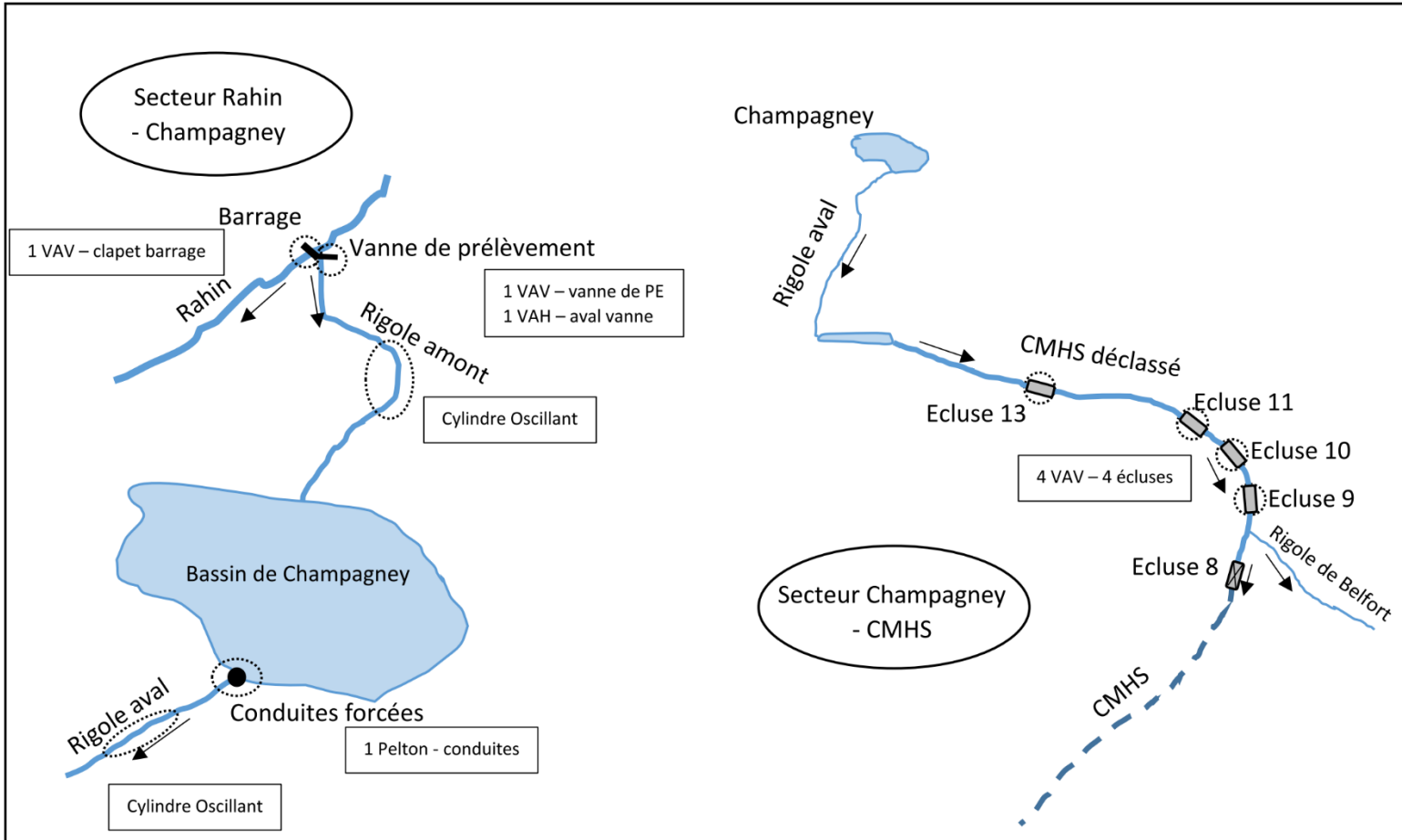
Limites territoriales:	
	zone de compétence ouest de la DTS
	département
	frontière

Annexe 2 : Carte des sites retenus pour l'étude

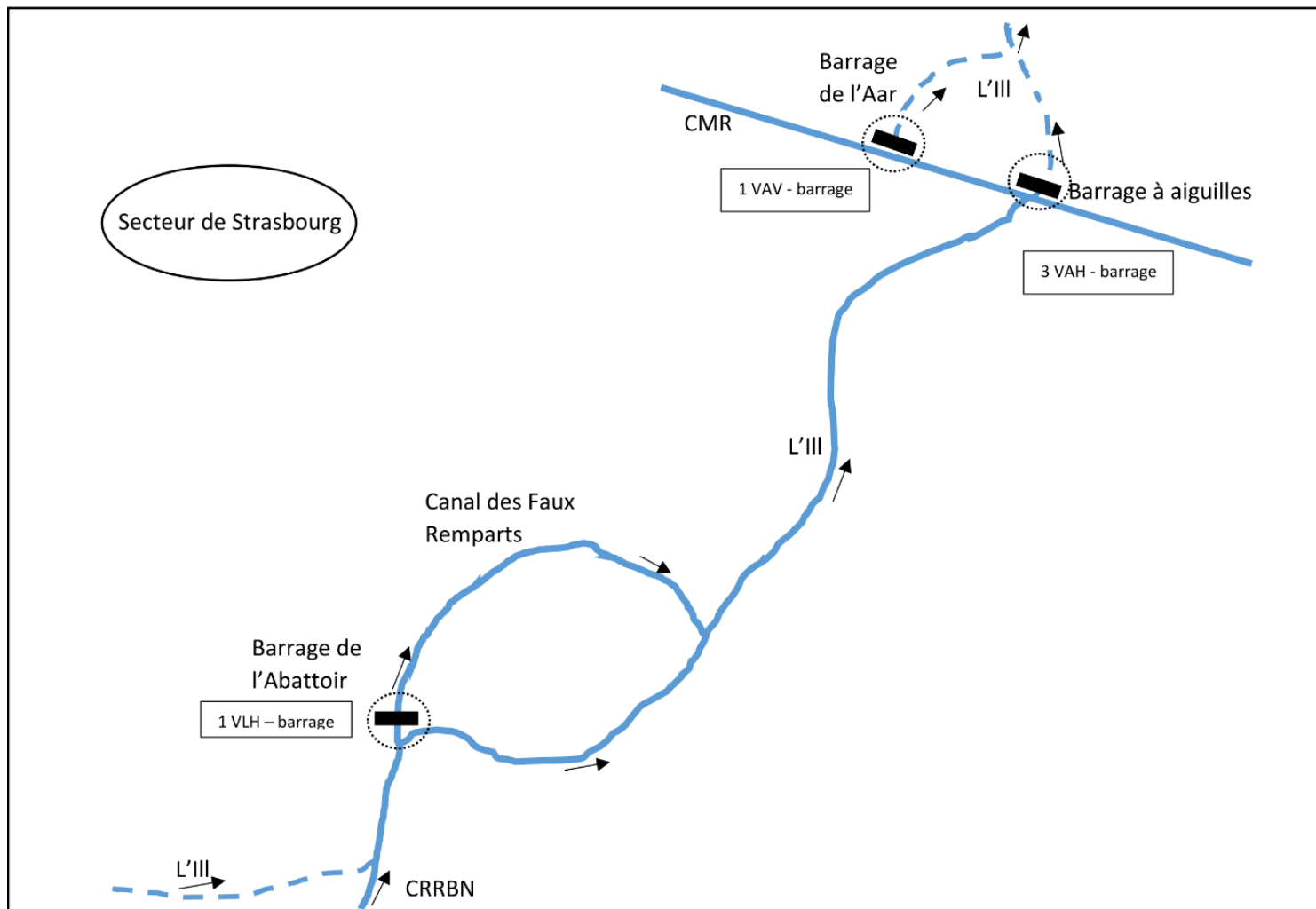
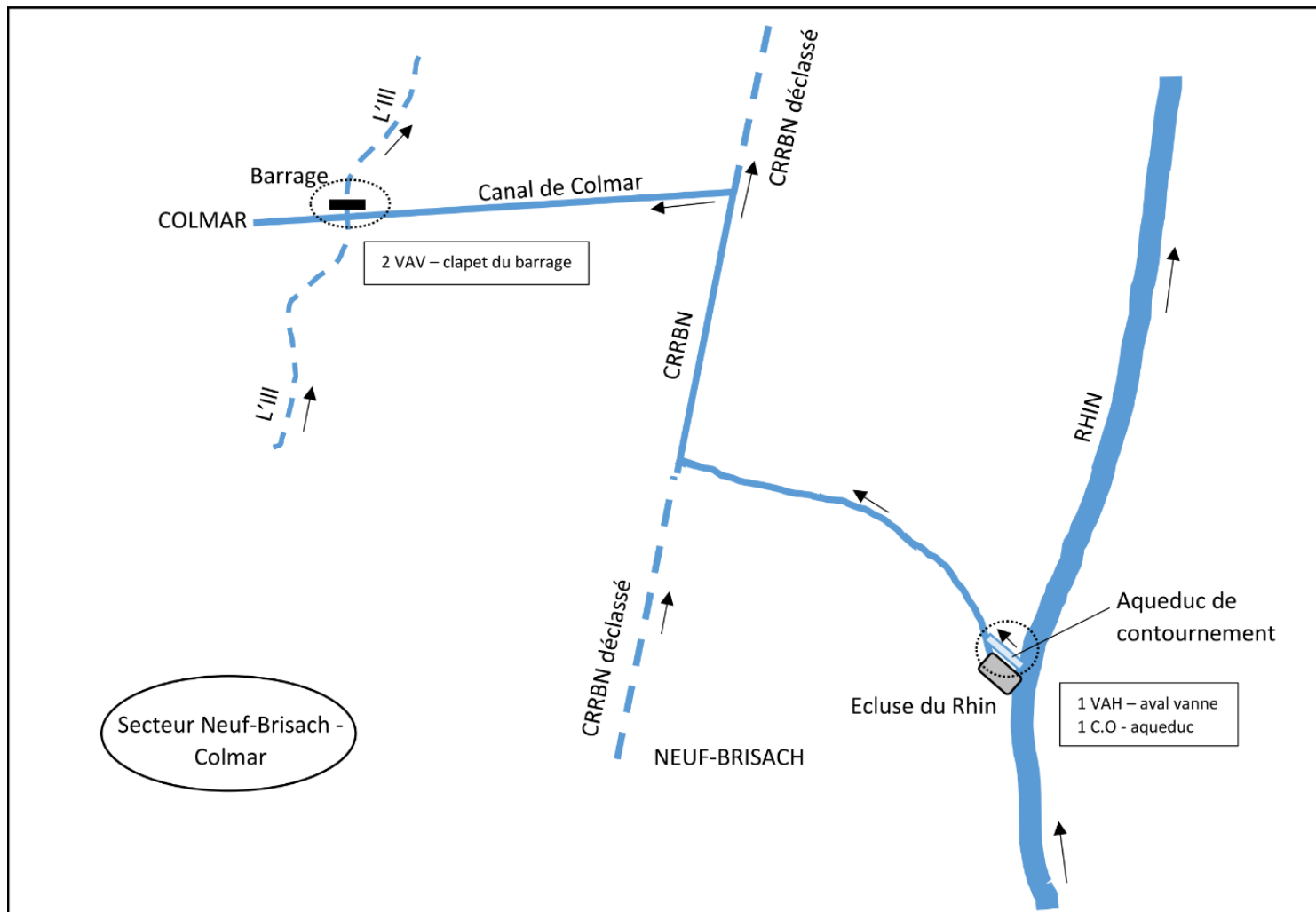


Annexe 3 : Schémas de fonctionnement des secteurs d'étude

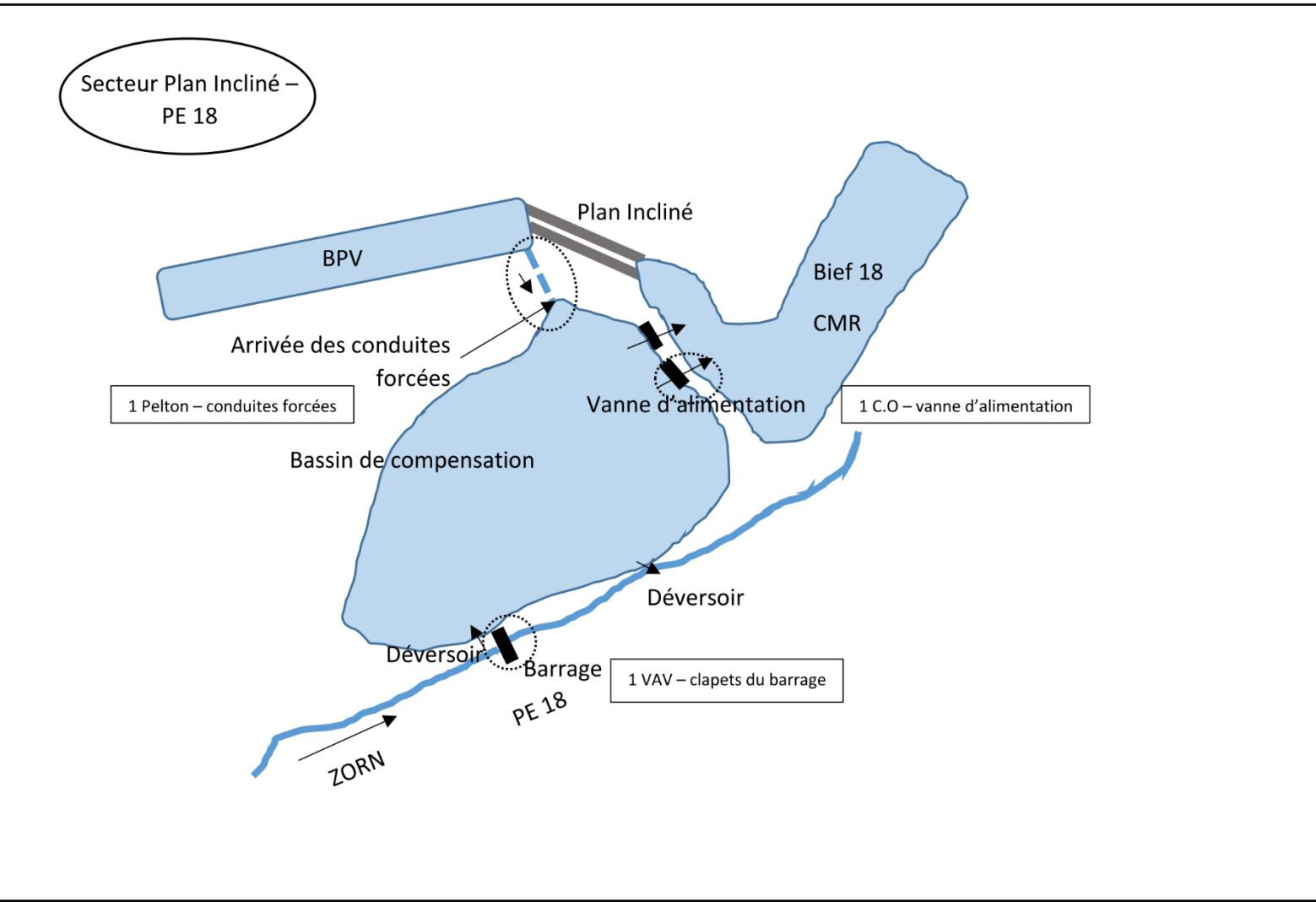
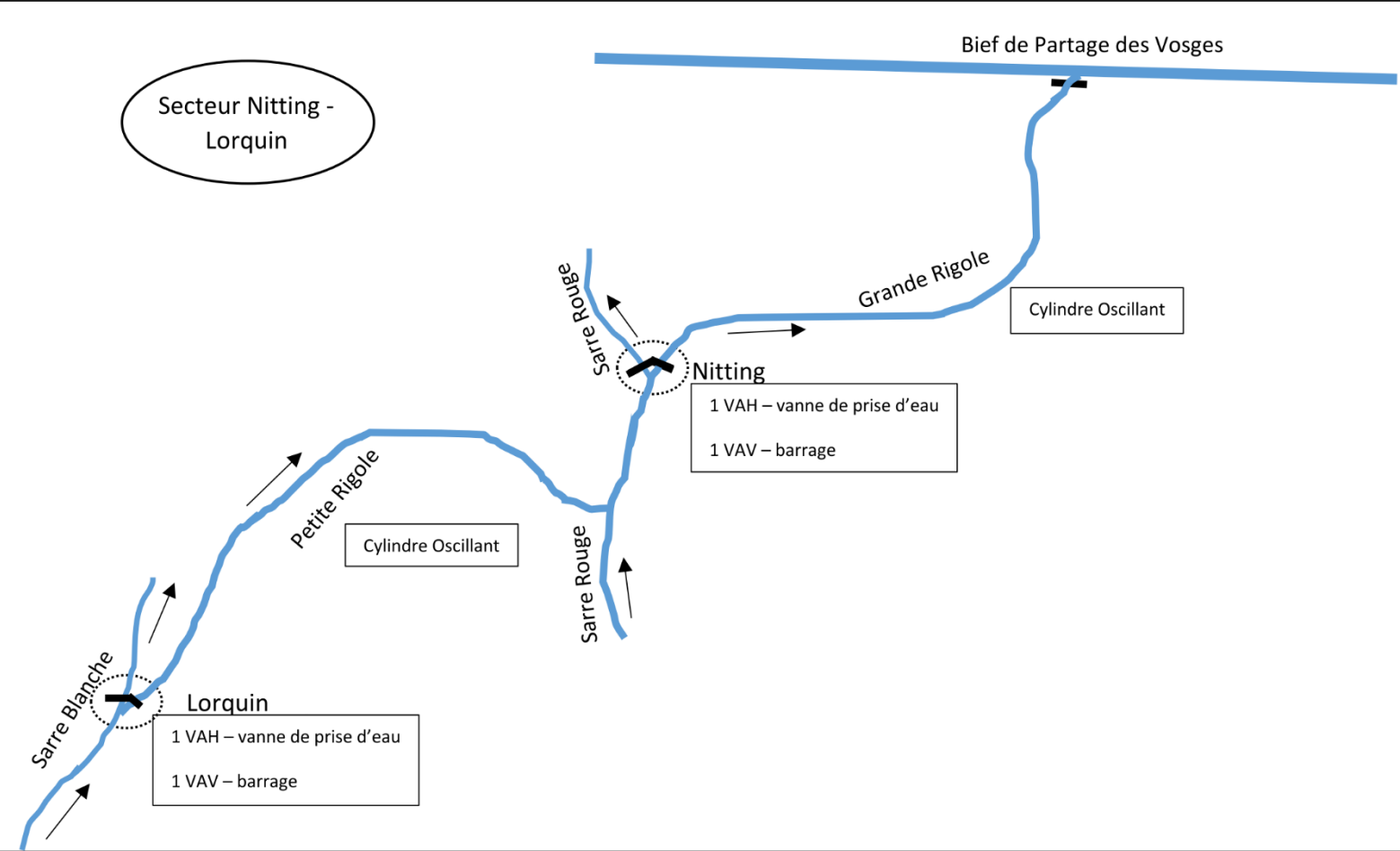
UT CRRBS :

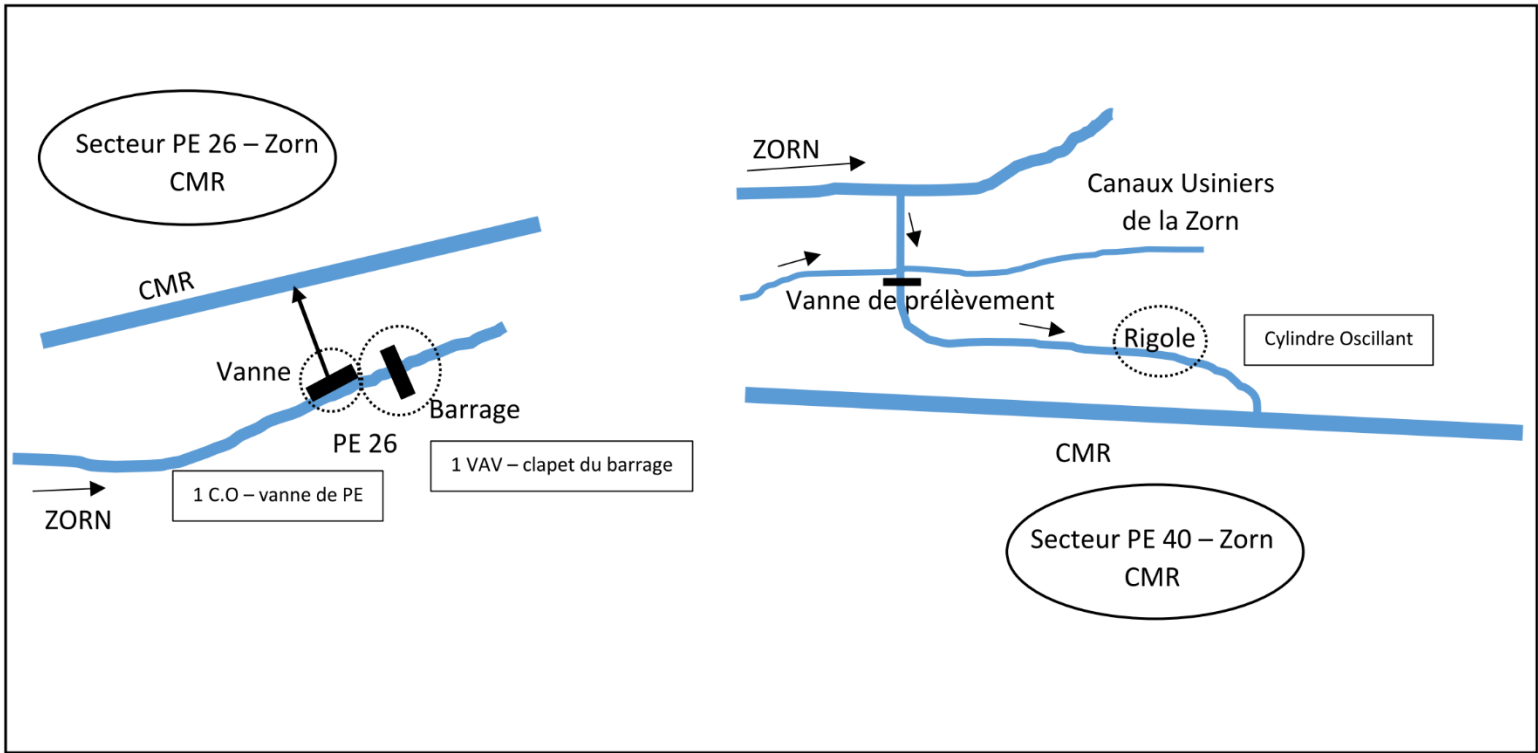


UT CA :



UT CMR :





Annexe 4 : Description des sites d'étude : UT CRRBS

1) Prise d'eau du Rahin et rigole « amont »

Le barrage de la prise d'eau sur le Rahin, à Plancher-Bas dans la Haute-Saône, a pour but d'alimenter le bassin de retenue de Champagny.

Le barrage se compose d'un seuil fixe surmonté d'une vanne clapet de 12.5 m de long ainsi que d'une passe de dégrèvement. La prise d'eau se fait grâce à deux vannes levantes marquant l'entrée de la rigole vers le bassin Champagny. Une double passe à poissons équipe l'ouvrage et permet le maintien du débit réservé.

La prise d'eau a deux configurations principales de fonctionnement : en prélèvement, ou non. Dans le premier cas, le clapet est totalement relevé, provoquant l'augmentation du niveau d'eau amont. La hauteur de chute est alors de 4.31 m. En cas de non-prélèvement, le clapet est abaissé et la hauteur de chute est de l'ordre de 2 m.

Le débit minimal à garantir à l'aval de l'ouvrage est de 0.3 m³/s ; dont 0.25 sont assurés par la passe à poissons.

Un canal maçonné, appelé « rigole amont », relie la prise d'eau au barrage réservoir de Champagny, 2.8 km plus loin.



2) Barrage Champagny et rigole « aval »

Le barrage-poids de Champagny assure une retenue d'eau importante permettant d'alimenter le CMHS, la rigole de Belfort, le bief de partage et le CRRBS tout au long de l'année. Ce bassin est principalement rempli grâce aux prélèvements réalisés au niveau du barrage du Rahin.

La rigole dite « amont » relie la prise d'eau du Rahin au lac de retenue, et une rigole, dite « aval », relie le barrage au CMHS.



Le barrage fait 785 m de long pour 35 m de haut. A son niveau normal, la retenue est de 13 millions de mètres cubes, couvrant une superficie de 102 hectares.

L'ouvrage présente deux prises d'eau, supérieure et inférieure, ainsi qu'une bonde de vidange en pied d'ouvrage. En exploitation normale, c'est la prise d'eau supérieure qui est utilisée, et ce toute l'année car les niveaux le permettent, y compris l'été.

Le barrage est également équipé de trop-pleins permettant d'évacuer les apports de crue vers le milieu naturel. Des portes de garde sont d'ailleurs présentes sur la rigole amont afin d'éviter un reflux d'eau du barrage vers le Rahin.

Le barrage est surtout sollicité l'été, pour participer au soutien d'étiage, du CRRBS notamment. En période hydrologique favorable, les réserves du barrage sont reconstituées grâce aux prélèvements sur le Rahin et aux apports de son bassin versant.

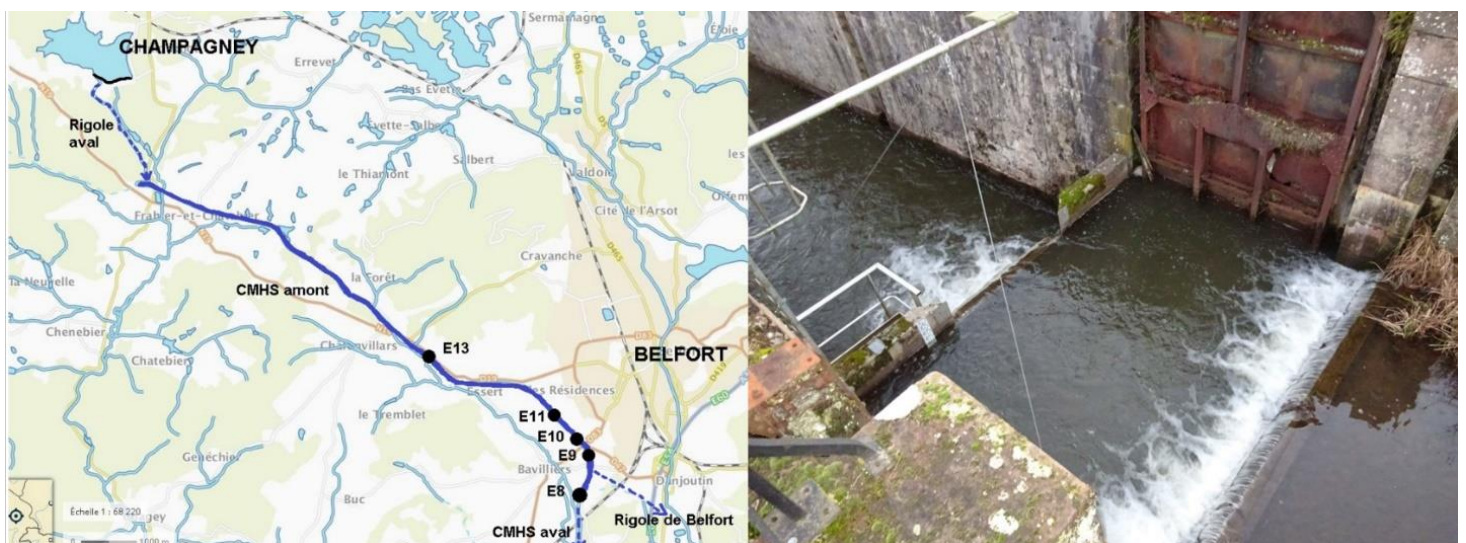
Le niveau d'eau maximal du barrage est de 411.85 m R.L, la prise d'eau supérieure est à la cote 397.15 m, la prise d'eau inférieure à 384.70 m, et la bonde de vidange à 379.00 m.

En moyenne, le barrage fournit chaque année 12 millions de mètres cubes afin d'assurer le fonctionnement du réseau.

Un dispositif de mesure permet d'évaluer les débits à la sortie du barrage, au niveau de la rigole aval. Cette rigole est un canal maçonné trapézoïdal de 2 m de large au plafond, et long de 2.5 km.

3) Ecluses déclassées du CMHS

La partie amont du canal de Montbéliard à la Haute-Saône n'est plus naviguée : par conséquent, elle sert uniquement au transfert d'eau depuis Champagny vers la rigole de Belfort et le CMHS navigable. Ainsi, les écluses présentes sur ce secteur ne sont plus utilisées par la navigation : les écluses n°13, 11, 10 et 9 sont constamment ouvertes afin de laisser s'écouler l'eau ; l'écluse n°8 est batardée afin de maintenir un niveau d'eau minimal à l'amont pour assurer l'alimentation de la rigole de Belfort. Les niveaux d'eaux dans les biefs sont maintenus grâce aux apports depuis Champagny et à la manœuvre du batardeau de l'écluse n°8. Les chutes des quatre écluses amont sont donc potentiellement exploitables.



4) Prise d'eau de Friesen et rigole de la Largue

L'ouvrage de prise d'eau dans la Largue permet l'alimentation en eau du Canal du Rhône au Rhin Branche Sud (CRRBS) dans le Bief de Partage à l'écluse 2N par le biais de la rigole d'alimentation, dénommée "rigole de la Largue". Cette rigole a un linéaire de 15 km depuis Friesen jusqu'au Bief de Partage du CRRBS à Valdieu. A l'aval du barrage de cette prise d'eau, la Largue se déverse dans le canal du Moulin.

La prise d'eau est composée :

- d'un déversoir de prise d'eau : seuil fixe situé en rive gauche de La Largue, à l'entrée de la rigole d'alimentation du CRRBS dite "rigole de la Largue", qui permet par surverse de prélever l'eau de la rivière pour alimenter cette rigole.
- d'un ouvrage à vannes : ouvrage constitué de deux vannes guillotines à crémaillères, situé dans la rigole de la Largue à 50 mètres à l'aval du seuil et réglé manuellement à l'aide d'une manivelle.

Concernant la connaissance des débits sur le site, les mesures enregistrées sur la période 1998-2013 à la station hydrométrique de Friesen (station située à environ 1 km en amont de la prise d'eau et gérée par la DREAL Alsace) font état d'un module de la Largue de 1.15 m³/s (source : Banque Hydro).

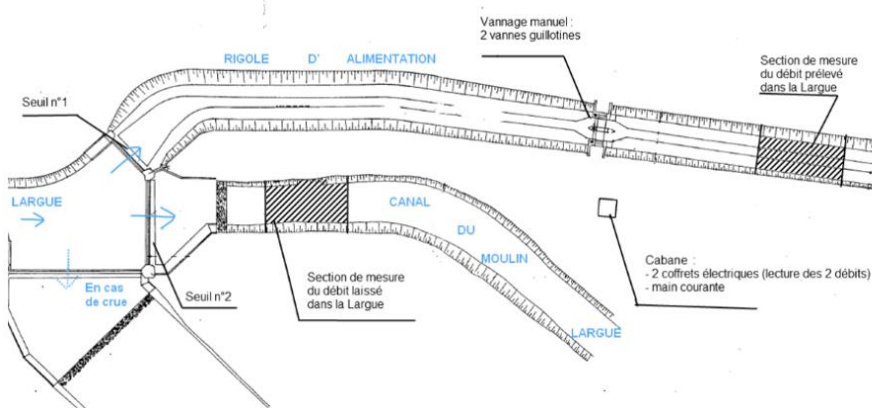
Le débit réservé étant de 1/10^{ème} de ce module, le débit minimal laissé dans la Largue à l'aval de la prise d'eau ne pourra être inférieur à 0.115 m³/s.

Si le débit de la Largue en amont de la prise d'eau s'avérait être inférieur à ce débit réservé, la totalité du débit amont serait laissé au cours d'eau, la prise d'eau pour l'alimentation du CRRBS sera fermée.

De plus, conformément aux dispositions du SDAGE du bassin Rhin-Meuse du 27 novembre 2009 et du SAGE de la Largue du 24 septembre 1999 en cours de révision, le maximum prélevable dans la Largue ne doit pas dépasser un débit moyen mensuel de 200 l/s. Cependant, les conditions hydrologiques de la Largue sont telles que ce débit de 200 l/s n'est pas prélevable en moyenne 20 % du temps, sur une année.

La rigole capte d'important apports depuis son bassin versant, ainsi les débits en sortie de rigole sont 1.5 à 2 fois supérieurs aux débits de prélèvement au niveau de la prise d'eau de Friesen. Pour donner un ordre d'idée, les débits annuels moyens dans la rigole sont de 120 l/s à Friesen et de 241 l/s à Valdieu.

Une échelle limnimétrique, un capteur de hauteur d'eau ainsi que trois paires de cordes de vitesse sont présent en aval des vannes de prélèvement. De plus, ce site a été étudié lors de la campagne de jaugeage, ainsi que la sortie de la rigole, à Valdieu. En moyenne, 3.9 millions de mètres cubes sont prélevés à Friesen chaque année ; et 7.8 millions sont apportés au CRRBS au niveau de Valdieu.



5) Barrage Illfurth

Le barrage de navigation d'Illfurth sur la rivière Ill, construit vers 1840, a pour vocation de garantir la ligne d'eau dans le bief de rivière 32N du Canal du Rhône au Rhin Branche Sud (CRRBS) pour les besoins de la navigation. Ce barrage assure la restitution en aval des débits de l'Ill, cours d'eau qui conflue peu après avec la Largue. Il est constitué d'un déversoir à crête mobile de 22 m de long, d'une vanne de fond pour les crues (et d'une passe à poissons inopérante).



La station de référence sur le secteur, du point de vue hydrologique, est la station hydrométrique de Altkirch, située à environ 7 km en amont du barrage et gérée par la DREAL Grand Est. Le débit réservé est fixé à 0.33 m³/s, ce qui représente 1/10^{ème} du module inter-annuel correspondant au débit naturel reconstitué de l'Ill à l'amont du confluent de la Largue (1971-1990) de l'agence de l'eau Rhin-Meuse.

Si le débit de l'Ill en amont du barrage s'avérait être inférieur au débit réservé mentionné ci-dessus, la totalité du débit amont serait laissée au cours d'eau.

La hauteur d'eau amont est mesurée sur une échelle limnimétrique au niveau de l'écluse 32.

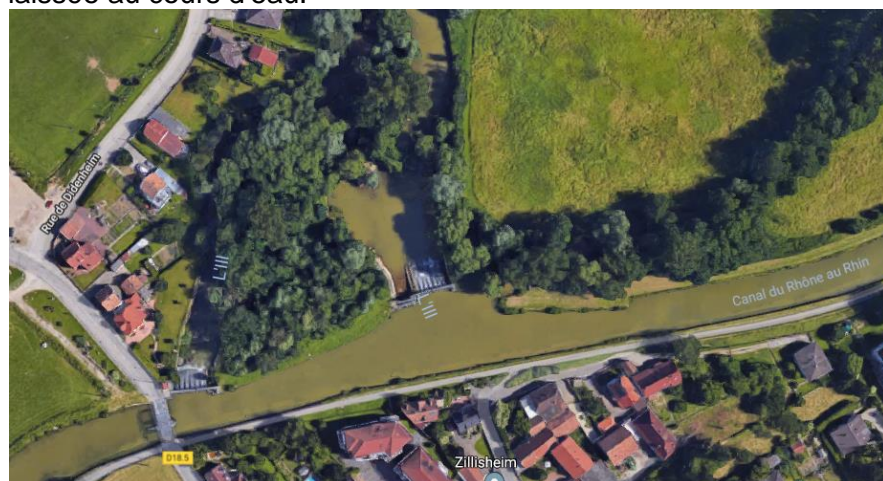
6) Barrages 1&2 de Zillisheim

Les deux barrages de navigation de Zillisheim sur la rivière Ill ont pour vocation de garantir, pour les besoins de la navigation, la ligne d'eau dans le bief de rivière 35N du Canal du Rhône au Rhin Branche Sud (CRRBS). En amont de ce bief et de ces deux barrages, l'Ill bénéficie de l'apport de la Largue, la confluence de ces deux cours d'eau se situant sur la commune d'Illfurth. Les deux barrages sont équipés d'un clapet automatique de 15 m de large qui assure le niveau d'eau du bief pour la navigation (ainsi que d'une passe à poissons hors service). Le barrage 2 aval est également équipé de deux vannes de fond utilisées en cas de crue.

La station de référence sur le secteur, du point de vue hydrologique, est la station hydrométrique de Didenheim, située à environ 3 km à l'aval des barrages et gérée par la DREAL Grand Est. Le module de l'Ill à cette station, calculé sur la chronique 1962 - 2019 est de 6,69 m³/s (source : Banque Hydro). Le débit réservé étant là aussi de 1/10^{ème} du module. Si le débit de l'Ill en amont du barrage s'avérait être inférieur au débit réservé mentionné ci-dessus, la totalité du débit amont serait laissée au cours d'eau.

Ces barrages ne sont équipés que de capteurs de hauteur à l'amont : il n'y a aucune donnée sur les niveaux avals, ni sur les débits transitants.

La campagne de jaugeage a permis de déterminer qu'un débit moyen, en période plutôt favorable, de 2.90 m³/s passait par le barrage 1 amont, et que 7.39 m³/s passaient par le barrage 2 aval. Cependant aucune chronique ne permet de valider ces valeurs, surtout sur une année complète.



1) Prise d'eau de Lorquin et « petite » rigole

La prise d'eau de Lorquin sur la Sarre Blanche contribue à l'alimentation du Canal de la Marne au Rhin (CMR) et du Canal de la Sarre (CS) à partir du bief de partage des Vosges. L'eau prélevée dans la Sarre Blanche à Lorquin transite via une rigole d'alimentation d'une longueur de 2 698 m, qui rejoint la Sarre Rouge à environ 220 m en amont de la prise d'eau de Nitting. L'eau prélevée dans la Sarre Rouge à Nitting transite via une rigole d'alimentation d'une longueur de 4 872 m, qui rejoint le Canal de la Marne au Rhin au niveau de la commune de Hesse. Cette prise d'eau est constituée d'une vanne guillotine de 2.47 m de large à l'entrée de la rigole, et d'un barrage composé de deux vannes guillotines sur la Sarre Blanche.



Les mesures enregistrées durant la période 1968-2013 à la station hydrométrique de Laneuveville-lès-Lorquin, située en tête de bassin et gérée par la Direction Régionale Environnement Aménagement Logement Alsace-Champagne-Ardenne-Lorraine (DREAL ACAL), font état d'un module de la Sarre Blanche de 1.28 m³/s (source : Banque Hydro septembre 2015), la surface du bassin versant à cette station étant de 72 km².

La surface du bassin versant déterminée à la prise d'eau de Lorquin étant de 78.5 km², le module retenu, calculé à partir de celui de la station hydrométrique de Laneuveville-Lès-Lorquin selon la méthode des débits spécifiques et validé par la Direction Départementale des Territoires de la Moselle (DDT 57), est de 1.40 m³/s. La faiblesse des perturbations anthropiques de la Sarre Blanche, en amont de la rigole d'alimentation, permet de considérer ce module comme naturel.

Le débit réservé étant de 1/10^{ème} de ce module, le débit minimal laissé dans la Sarre Blanche à l'aval de la prise d'eau de Lorquin ne pourra être inférieur à 0.14 m³/s.

L'exploitant se doit de respecter en permanence le débit réservé dans la Sarre Blanche ou d'assurer à l'aval de l'ouvrage le même débit qu'à l'amont si ce dernier est inférieur au débit réservé. Ainsi, si le débit de la Sarre Blanche s'avérait être inférieur à ce débit réservé, la prise d'eau de Lorquin serait fermée et la totalité du débit amont laissée au cours d'eau jusqu'à rétablissement du débit réservé.

Le site est équipé de capteurs de niveaux d'eau à l'amont et à l'aval du barrage, ainsi que dans la rigole. En moyenne, 13.2 millions de mètres cubes sont prélevés chaque année à cette prise d'eau et transitent par la rigole.



2) Prise d'eau de Nitting et « grande » rigole

La prise d'eau sur la Sarre Rouge contribue à l'alimentation du Canal de la Marne au Rhin (CMR) et du Canal de la Sarre (CS) à partir du bief de partage des Vosges. L'eau prélevée dans la Sarre Blanche à Lorquin transite via une rigole d'alimentation d'une longueur de 2 698 m, qui rejoint la Sarre Rouge à environ 220 m en amont de la prise d'eau de Nitting. L'eau prélevée dans la Sarre Rouge à Nitting transite via une rigole d'alimentation d'une longueur de 4 872 m, qui rejoint le Canal de la Marne au Rhin au niveau de la commune de Hesse. La Sarre Blanche et la Sarre Rouge se rejoignent à Hermelange pour former la Sarre.

Cette prise d'eau est constituée d'une vanne guillotine de 5 m de large à l'entrée de la rigole, et d'un barrage composé de deux vannes guillottes sur la Sarre Blanche.

Les mesures enregistrées durant la période 1968-2013 à la station hydrométrique de Vasperviller, située en tête de bassin et gérée par la Direction Régionale Environnement Aménagement Logement Alsace-Champagne-Ardenne-Lorraine (DREAL ACAL) font état d'un module de la Sarre Rouge de 1.48 m³/s (source : Banque Hydro septembre 2015), la surface du bassin versant à cette station étant de 89 km².



La surface du bassin versant déterminée à la prise d'eau de Nitting étant de 106 km², le module retenu, calculé à partir de celui de la station hydrométrique de Vasperviller selon la méthode des débits spécifiques et validé par la Direction Départementale des Territoires de la Moselle (DDT 57), est de 1.76 m³/s. La faiblesse des perturbations anthropiques de la Sarre Rouge, en amont du canal d'alimentation, permet de considérer ce module comme naturel.

Le débit réservé étant de 1/10^{ème} de ce module, le débit minimal laissé dans la Sarre Rouge à l'aval de la prise d'eau de Nitting ne pourra être inférieur à 0.176 m³/s.

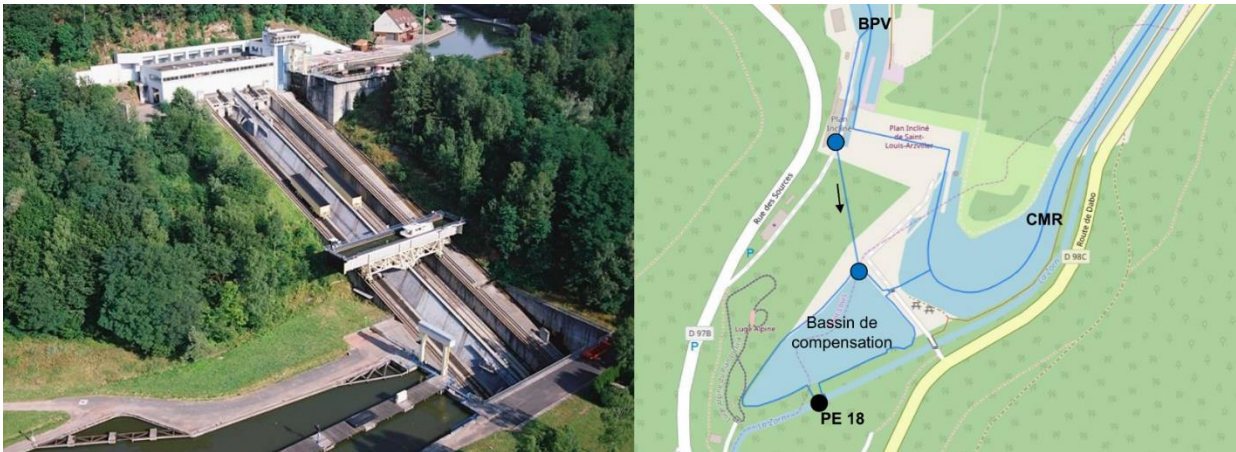
L'exploitant se doit de respecter en permanence le débit réservé dans la Sarre Rouge ou d'assurer à l'aval de l'ouvrage le même débit qu'à l'amont si ce dernier est inférieur au débit réservé. Ainsi, si le débit de la Sarre Rouge s'avérait être inférieur à ce débit réservé, la prise d'eau de Nitting serait fermée et la totalité du débit amont laissée au cours d'eau jusqu'à rétablissement du débit réservé.

Le site est équipé de capteurs de niveaux d'eau à l'amont et à l'aval du barrage, ainsi que dans la rigole. En moyenne, 31.5 millions de mètres cubes sont prélevés chaque année à cette prise d'eau et transitent par la rigole.



3) Plan Incliné de Saint-Louis/Arzwiller

Le Plan Incliné de Saint-Louis/Arzwiller est un ascenseur à bateaux mis en service en 1969 dont le but est de court-circuiter une portion de canal de 4 km de long et comportant 17 écluses. Cet ouvrage permet donc aux navigateurs de franchir les 44.55 m de dénivelé séparant le BPV à l'amont et le CMR à l'aval. Le CMR étant en partie alimenté en eau par le BPV, l'ouvrage présente une prise d'eau amont rejoignant le bassin de compensation et le CMR à l'aval, grâce à trois conduites forcées. Les débits prélevés sont plus importants en été, lorsque les besoins en eau du canal sont les importants. Cependant, VNF à l'obligation de prélever en priorité sur la Zorn plutôt que sur le BPV, afin d'éviter au maximum les échanges d'eau inter bassins versants. Un débitmètre permet de connaître les apports du BPV : en moyenne, ce sont 8.4 Mm3 d'eau qui rejoignent chaque année le CMR par le plan incliné.



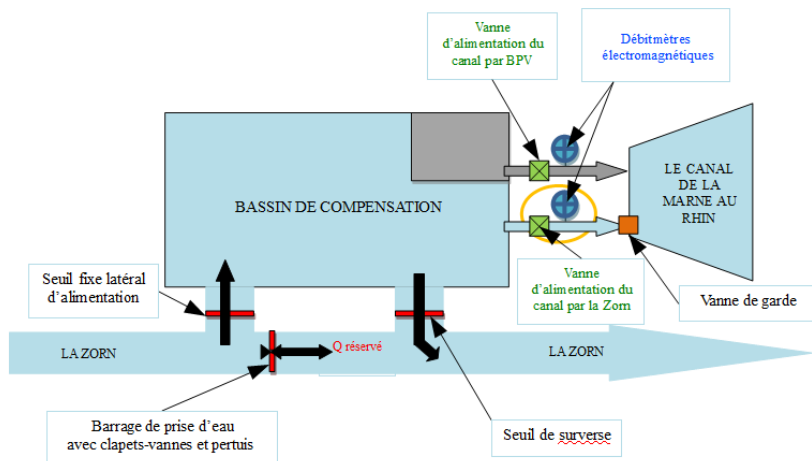
4) Prise d'eau 18

La prise d'eau 18 sur la rivière la Zorn a pour vocation d'alimenter le Canal de la Marne au Rhin au niveau du plan incliné de Saint-Louis/Arzwiller par le biais d'un bassin de compensation équivalent à une journée de navigation. Le système d'ouvrages qui compose PE 18 est constitué, d'amont en aval :

- d'un seuil de 10 m de long, latéral à la Zorn, qui permet de prélever de l'eau dans ce cours d'eau pour alimenter un bassin de compensation qui joue le rôle d'intermédiaire entre la prise d'eau et le canal,
- d'un barrage de prise d'eau, constitué de deux clapets-vannes frontaux mobiles identiques de part et d'autre d'un pertuis situé au milieu du lit mineur de la Zorn, qui crée une retenue d'eau pour assurer le prélèvement susvisé.

Des ouvrages annexes sont présents au niveau du bassin de compensation :

- un seuil de surverse, à l'aval, permettant à l'eau du bassin de compensation d'être rejeté dans la Zorn en cas de trop-plein de ce bassin,
- une vanne clapet frontal mobile avec moteur hydraulique, en sortie du bassin de compensation, permettant l'alimentation du canal,
- une vanne de garde (vanne guillotine) en entrée dans le canal, destinée à assurer la sécurité en cas d'incident ou à isoler le dispositif de mesures pour assurer la maintenance.
- Le seuil latéral d'alimentation étant un seuil fixe, aucune régulation du prélèvement n'est possible à ce lieu. La régulation se fait au niveau du barrage de prise d'eau.



Les mesures enregistrées durant la période 1966-2016 à la station hydrométrique de Saverne-Schinderthal, située en tête de bassin versant et gérée par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement de la région Grand Est (DREAL Grand Est), font état d'un module de la Zorn de 2.20 m³/s (source banque Hydro juillet 2017), la surface du bassin versant à cette station étant de 185 km².

La surface du bassin versant déterminée à la PE18 étant de 83 km², le module retenu, calculé à partir de celui de la station hydrométrique de Saverne-Schinderthal selon la méthode des débits spécifiques, est de 0.987 m³/s. L'absence de rejet/prélèvement significatif dans la Zorn, entre la station hydrométrique de Saverne-Schinderthal et la PE18 permet de retenir ce module à l'aval de la PE18.

La valeur du débit réservé déterminée à l'aval de la PE18 est 0.098 m³/s, ce qui correspond à 1/10^{ème} du module précité.

L'exploitant se doit de respecter en permanence le débit réservé dans la Zorn ou d'assurer à l'aval de l'ouvrage le même débit qu'à l'amont si ce dernier est inférieur au débit réservé.

Ainsi, si la hauteur d'eau dans la Zorn est supérieure à la hauteur du seuil d'alimentation, le débit réservé est assuré par le débit transitant par le pertuis.

Dans le cas contraire, la configuration géométrique du site ne permet pas de prise d'eau au niveau du seuil pour l'alimentation du canal. Le contrôle du débit restitué à la Zorn à la PE18 est assuré par la géométrie du pertuis situé entre les deux clapets-vannes du barrage de prise d'eau.

Le système de mesure est composé de deux débitmètres électromagnétiques de 600 mm de diamètre, situés dans les buses en aval de la vanne d'alimentation. L'un mesure le débit prélevé dans la Zorn, via le bassin de compensation, pour l'alimentation du canal de la Marne au Rhin ; L'autre mesure le débit prélevé dans le bief de partage des Vosges (BPV) pour l'alimentation du canal de la Marne au Rhin. Les débits prélevés dans la Zorn et dans le BPV sont déterminés en temps réel à partir de ce système de mesure par l'automate situé à proximité de la PE18. En moyenne, cette prise d'eau fournit 4.6 millions de mètres cubes par an (là où les apports du BPV à cet endroit sont de l'ordre de 8.4 millions).

5) Prise d'eau 26

L'ouvrage est situé dans le département du Bas-Rhin (67) et sur le territoire de la commune de Haegen. Il sert à alimenter le canal de la Marne au Rhin en prélevant de l'eau dans la Zorn au niveau du bief 27 grâce à une buse. La prise d'eau se fait grâce à l'ouverture et la fermeture du clapet, réalisées à l'aide d'un actionneur hydraulique. Les consignes sont données par un automate. Le clapet est manœuvrable grâce à un dispositif manuel de secours permettant la descente lente du clapet sans énergie et la montée à l'aide d'une pompe à main. La vanne papillon est manœuvrée manuellement à partir d'un volant de manœuvre situé sur la rive gauche de la Zorn en amont du barrage de prise d'eau.

La surface du bassin versant déterminée à la PE26 étant de 155 km², le module retenu, calculé à partir de celui de la station hydrométrique de Saverne selon la méthode des débits spécifiques, est de 1.84 m³/s. L'absence de rejet/prélèvement significatif dans la Zorn, entre

la PE26 et la station hydrométrique de Saverne, permet de retenir ce module à l'aval de la PE26.

La valeur du débit réservé déterminée à l'aval de la PE26, étant égale au 1/10^{ème} du module précité, est 0.184 m³/s. Les mesures enregistrées durant la période 1966-2016 à la station hydrométrique de Saverne-Schinderthal, située en tête de bassin versant et gérée par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement de la région Grand Est (DREAL Grand Est), font état d'un module de la Zorn de 2.20 m³/s (source banque Hydro juillet 2017), la surface du bassin versant à cette station étant de 185 km².

L'exploitant se doit de respecter le débit réservé dans la Zorn ou d'assurer à l'aval de l'ouvrage le même débit qu'à l'amont si celui-ci est inférieur au débit réservé. Ainsi, lorsque le débit de la Zorn s'avère être inférieur à ce débit réservé, la PE26 est fermée et la totalité du débit amont est laissée au cours d'eau jusqu'à rétablissement du débit réservé. Le contrôle du débit restitué à la Zorn à l'aval de la PE26 est assuré par la géométrie du site, la passe à poissons ayant été calibrée pour assurer le 10^{ème} du module.

Le système de mesure est composé d'une sonde de niveau d'eau en amont du barrage et d'un débitmètre mesurant le débit prélevé dans la Zorn pour l'alimentation du CMR au niveau du bief 27. En moyenne, cette prise d'eau fournit 2.5 millions de mètres cubes par an.



6) Prise d'eau 40

La prise d'eau 40 est un prélèvement réalisé sur un canal usinier de la Zorn, en amont d'un moulin. Le prélèvement dépend des conditions de turbinage du moulin et de l'entretien d'un ouvrage amont sur la Zorn : VNF ne maîtrise pas les conditions de prélèvement à cette prise d'eau. Une vanne marque l'entrée d'une rigole alimentant le CMR au niveau du bief 41.

Le débit prélevé fait l'objet d'une mesure de débit à travers trois cordes vibrantes associée à une mesure de hauteur d'eau. Un clapet anti-retour est installé sur la rigole afin d'empêcher les reflux d'eau du canal vers la Zorn.

En moyenne, cette prise d'eau fournit 2.7 millions de mètres cubes par an.



1) Barrage de l'III à Colmar

Le barrage a pour vocation de maintenir, pour les besoins de la navigation, un niveau d'eau dans l'III de la jonction du Canal de Colmar et de la Lauch canalisée jusqu'au port de plaisance de Colmar.

Il est équipé de deux passes à clapets automatiques de 31.75 m de long chacun, garantissant le niveau d'eau du bief pour la navigation, d'une glissière pour canoës et d'une passe à poissons.

Les mesures enregistrées sur la période 1997-2019 à la station hydrométrique de Sundhoffen (station située à environ 6 km en amont du barrage de l'III et gérée par la DREAL Alsace), font état d'un module de l'III de 13,9 m³/s (source : Banque Hydro). Le débit réservé étant de 1/10^{ème} du module, le débit minimal laissé dans l'III à l'aval de l'ouvrage de retenue ne pourra être inférieur à 1,39 m³/s. Si le débit de l'III en amont du barrage s'avérait être inférieur à ce débit réservé, la totalité du débit amont serait laissé au cours d'eau. L'ouvrage est équipé de sondes de niveaux d'eau à l'amont et à l'aval du barrage. Un automate calcule le débit transitant à partir de ces mesures.



2) Prise d'eau de Neuf-Brisach

La prise d'eau de Neuf-Brisach sert à alimenter le CRRBN et le canal de Colmar grâce à un prélèvement sur le Rhin. Il s'agit d'une vanne frontale débouchant sur un aqueduc de contournement au niveau de l'écluse du Rhin. L'aqueduc est une conduite rectangulaire de 2x2 m. Il n'existe aucune contrainte réglementaire concernant cette prise d'eau au vu des volumes prélevés et de l'importance du cours d'eau, le Rhin. En moyenne, plus de 83.26 Mm³ sont captés sur le Rhin au niveau de cette prise d'eau, qui alimente une grande partie du réseau (navigable ou non) de la plaine d'Alsace et des syndicats d'agriculture.



3) Barrage de l'Abattoir

Le barrage de l'Abattoir, situé dans le centre de Strasbourg, marque la limite amont du canal des Faux Remparts, il possède six vannes levantes et est équipé d'une passe à poissons non fonctionnelle. Une écluse est présente en rive droite de l'ouvrage.

Il régule le niveau aval parallèlement avec le système des canaux usiniers de la Petite France, ainsi la répartition des débits de l'III entre ces deux ouvrages dépend des manœuvres et de l'exploitation qui peuvent se concentrer sur un barrage plutôt que l'autre suivant la situation (hydrologie, délais d'action, attrait piscicole, disponibilité du personnel, accessibilité/propriété). Cependant, suite à une campagne de jaugeage, il a été estimé qu'en situation normale, environ 32 % du débit de l'III transitait par cet ouvrage. Des capteurs de niveaux amont et aval sont installés sur l'écluse. Les hauteurs de chutes varient entre 1.5 et 1.8 mètres environ.



4) Barrage de l'Aar

Ce barrage est situé à Strasbourg, au niveau de la confluence de l'Aar et du CMR, puis de l'Ill canalisée. Il possède cinq vannes déversantes. Les vannes 1 et 5 sont fermées en exploitation afin de prévenir l'érosion des berges ; elles ne sont utilisées qu'en crue. La station hydrométrique de référence est située à Chasseur Froid, quelques kilomètres en aval.



Il régule le niveau amont parallèlement

avec le barrage à aiguilles, ainsi la répartition des débits de l'Ill entre ces deux ouvrages dépend des manœuvres et de l'exploitation qui peuvent se concentrer sur un barrage plutôt que l'autre suivant la situation (hydrologie, délais d'action, attrait piscicole, disponibilité du personnel).

Cependant, suite à une campagne de jaugeage, il a été estimé qu'en situation normale, environ 13 % du débit de l'Ill transitait par cet ouvrage. Les hauteurs de chutes ne sont pas connues précisément, sauf en exploitation courante, où elles sont de l'ordre de 1.8 m.

5) Barrage à aiguilles de la Robertsau

Le barrage à aiguilles est situé à Strasbourg au niveau des institutions européennes, au débouché de l'Ill canalisée. Il consiste en une structure métallique d'une cinquantaine de mètres de long contre laquelle sont appuyées des aiguilles en bois dont le nombre et la disposition varient suivant les besoins de gestion. Ce barrage, bien que lourd en exploitation, permet une gestion fine des niveaux d'eau amont et est très efficace dans l'évacuation des crues. Une écluse non fonctionnelle est présente en rive droite.

La station hydrométrique de référence est située à Chasseur Froid, quelques kilomètres en aval. Ce barrage est équipé de capteurs de hauteur d'eau à l'amont et à l'aval.

Il régule le niveau amont parallèlement avec le barrage de l'Aar, ainsi la répartition des débits de l'Ill entre ces deux ouvrages dépend des manœuvres et de l'exploitation qui peuvent se concentrer sur un barrage plutôt que l'autre suivant la situation (hydrologie, délais d'action, attrait piscicole, disponibilité du personnel).

Cependant, suite à une campagne de jaugeage, il a été estimé qu'en situation normale, environ 87 % du débit de l'Ill transitait par cet ouvrage. Les hauteurs de chutes ne dépassent pas les 80 cm (70 en exploitation normale), et le barrage pouvant s'effacer au fond du cours d'eau, il ne présente aucun obstacle en crue.

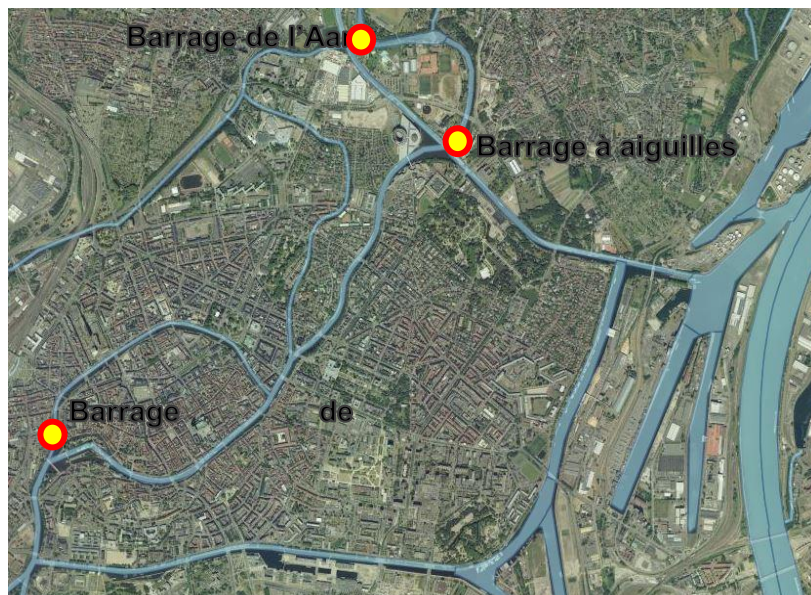


Annexe 7 : Compte-rendu de la campagne de jaugeage des ouvrages strasbourgeois

Synthèse des mesures 07/05/2019

Conditions hydrauliques et d'exploitation « normales »

Sites testés : Barrages à aiguilles, de l'Aar et de l'Abattoir



Barrage à aiguilles :

	Site 1	Site 2	Site 3
amont	En surface : - 1.36 m/s à l'amont immédiat - 1.2 m/s un peu plus en amont (30 cm) A mi-hauteur (50 cm de profondeur ?) - 1.7 m/s à l'amont immédiat	En surface : - 1.28 m/s	/
aval	En surface : - 1.4 m/s	Au fond (1.10m) : - 2.1 m/s	Au fond (1.10 m) : - 1.65 m/s



Il ressort de cette série de mesures que les vitesses de **surface** sont de l'ordre de **1.3 m/s**. Les vitesses plus importantes sont trouvées en **profondeur**, plutôt à l'aval et au centre de la section du barrage.

Les vitesses présentes à l'aval sont intéressantes, notamment pour le « caisson profilé » ; la hauteur d'eau de 1.10m est assez faible mais reste correcte.

Pour un test éphémère (1-2 semaines), possibilité d'avoir une ouverture plus importante d'aiguilles ponctuellement.

Barrage de l'Aar :

	Milieu de vanne	Limite de vanne	Amont vanne
Vanne ouverte ¼ (20 cm d'eau)	1.4 m/s	1.1 m/s	0.7 m/s (50 cm en amont)
Vanne ouverte ½ (40 cm d'eau)	1.7 m/s	1.7 m/s	1.25 m/s (20 cm en amont) 1 m/s (30 cm en amont)

Les vitesses présentes au niveau de la vanne déversante sont intéressantes pour une vis horizontale, mais les écarts sont importants entre les vitesses quelques dizaines de cm à l'amont et au droit de la vanne. Cela est problématique si la vis n'est pas perpendiculaire à l'écoulement (parallèle à la vanne). Or on récupère plus d'énergie si la vis est inclinée : elle prend donc une certaine profondeur vers l'amont par rapport à l'axe de la vanne. Augmenter l'ouverture de la vanne permet d'augmenter les vitesses et aussi de réduire les écarts entre l'amont et la vanne : la vis peut donc fonctionner avec un angle optimal. De plus, cela permet aussi de placer une vis avec un diamètre plus important.



On peut faire un test sur 1-2 semaines avec une ouverture garantie de $\frac{1}{2}$ pour une vis avec un bon angle et un diamètre plus important. Elle pourrait aussi être fixée directement dans la maçonnerie (facilités d'accès pour l'installation, et aussi pour la manœuvre de la vis : régler la hauteur et l'angle).

Barrage de l'Abattoir :

N.B : On a mesuré 1.1 m/s encore plus en aval, avant le pont.

Aval, rive gauche :

	Aval rive gauche
En surface	1.6 m/s
A 60 cm de profondeur	1.5 m/s
A 1 m de profondeur	1.15 m/s

Le site présente des vitesses

intéressantes pour le « caisson profilé » : bonnes vitesses et profondeur suffisante (jusqu'à 1.6m). De plus, il n'y a pas de risque de gêner la navigation.



Extrémité du bajoyer :

	Extrémité du bajoyer
Vanne 6 fermée ; contre le bord, en surface	0.95 m/s
Vanne 6 ouverte $\frac{1}{4}$; contre le bord, en surface	1.45 m/s
Vanne 6 ouverte $\frac{1}{4}$; à 1m du bord, 50 cm de profondeur	0.5 m/s
Vanne 6 ouverte $\frac{1}{4}$; à 1,5m du bord, 50 cm de profondeur	0.7 m/s

Les vitesses sont assez faibles, même en ouvrant la vanne 6, et elles sont de moins en moins intéressantes à mesure qu'on s'éloigne de la surface. Ce site n'est donc pas forcément le plus adapté. Au niveau de la vanne, les vitesses sont trop importantes pour qu'une vis « modeste » puisse être installée (et résister).

Bilan :

Les vannes de l'Abattoir sont difficiles d'accès et « trop puissantes » pour une vis horizontale modeste. Elle serait plus adaptée à l'Aar au droit d'une vanne déversante (facilité de mise en œuvre et bonnes vitesses).

Le site à l'aval de l'Abattoir, en rive gauche, est très intéressant pour le caisson profilé ; le barrage à aiguilles pourrait l'être aussi, et simple d'accès et d'installation. L'extrémité du bajoyer est moins adaptée car présentant des vitesses plus faibles et perturbant l'exploitation et la navigation.

Annexe 8 : Aménagement des sites

Barrage du Rahin

1. Barrage de restitution – Vis d'Archimède

	Q (m ³ /s)	H (m)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,251	4,31	10613	0,8	8490	24451	2250	500000	19,3
HIVER	0,666	4,31	28159		22527	129756	23616		

Verticale (VAV)

2. Prise d'eau - Vis d'Archimède Verticale (VAV)

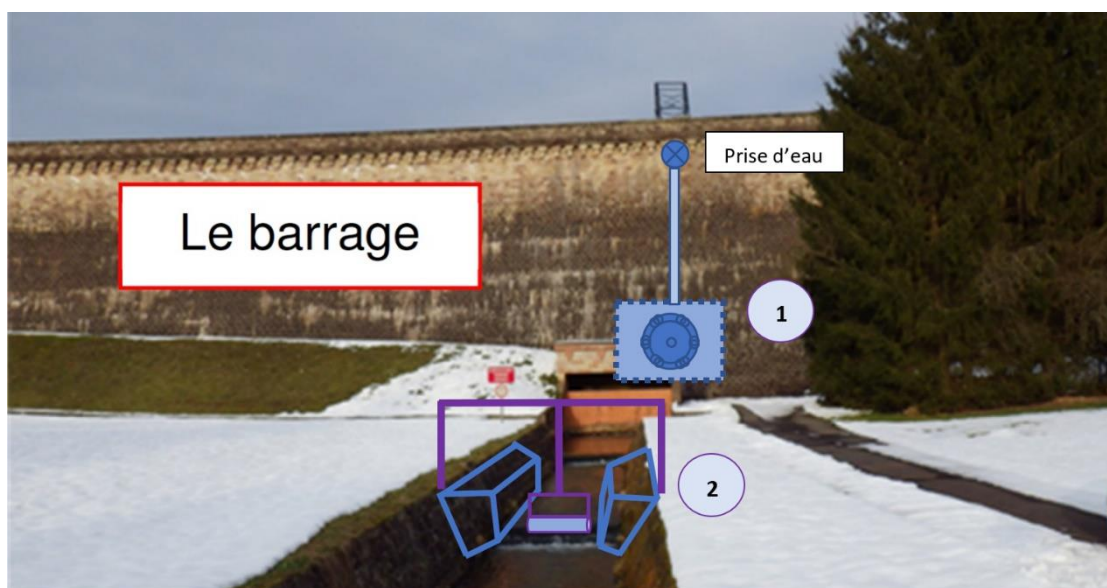
	Q (m ³ /s)	H (m)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,309	1,6	4850	0,8	3880	11174,4	1028	500000	45,5
HIVER	0,945	1,28	11866		9493	54679,7	9952		

3. Rigole – Etranglement et Vis d'Archimède Horizontale (VAH)

	V (m/s)	S (m ²)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	1,002	0,308	155	0,3	47	135	12	10000	28,8
HIVER	1,5	0,63	1063		319	1837,44	334		

4. Rigole – Cylindre Oscillant

	V (m/s)	S (m ²)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,200	1,54	6	0,2	1	2,88	0	2000	206,2
HIVER	0,300	3,150	43		9	51,84	9		



Barrage de Champagny

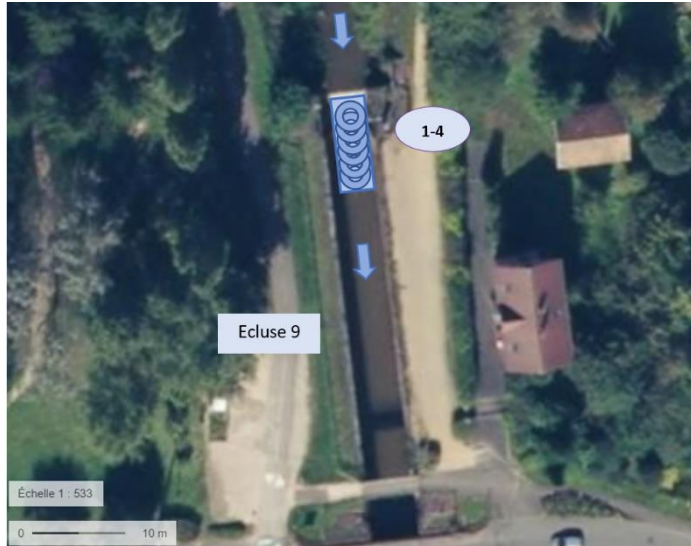
1. Barrage et prise d'eau – Turbine Pelton

	Q (m ³ /s)	H (m)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,697	27	184614	0,85	156922	451935	41578	500000	3,6
HIVER	0,360	31	109480		93058	536014	97555		

2. Rigole – Etranglement et Cylindre Oscillant (CO)

	V (m/s)	S (m ²)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,548	1,27	105	0,2	21	60	6	2000	85,5
HIVER	0,679	0,53	83		17	98	18		

Ecluses CMHS



1.-4. Ecluses désaffectées du CMHS (n°13-11-10-9) – Vis d'Archimède Verticales (VAV)

		Q (m3/s)	H (m)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
E13	ÉTÉ	0,741	2,15	15629	0,8	12503	36008,6	3313	500000	36,7
	HIVER	0,583	2,15	12296		9837	56661,1	10312		
E11	ÉTÉ	0,417	1,8	7363	0,8	5891	16966,1	1561	500000	69,8
	HIVER	0,378	1,8	6675		5340	30758,4	5598		
E10	ÉTÉ	0,401	2,12	8340	0,8	6672	19215,4	1768	500000	50,9
	HIVER	0,462	2,12	9608		7687	44277,1	8058		
E9	ÉTÉ	0,291	1,84	5253	0,8	4202	12101,8	1113	500000	53,9
	HIVER	0,332	1,84	5993		7794	44893,4	8171		

Rigole de la Largue



1. Vanne de la PE de la Largue (Friesen) – Etranglement et Cylindre Oscillant

	V (m/s)	S (m ²)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,584	0,209	21	0,2	4	12	1	2000	367
HIVER	0,584	0,209	21		4	24	4		

2. Rigole de la Largue (Friesen) - Etranglement et Cylindre Oscillant

	V (m/s)	S (m ²)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,584	0,209	21	0,2	4	12	1	2000	367
HIVER	0,584	0,209	21		4	24	4		

3. Rigole de la Largue (Valdieu) - Etranglement et Cylindre Oscillant

	V (m/s)	S (m ²)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,726	0,31	59	0,2	12	34	3	2000	128
HIVER	0,726	0,31	59		12	69	12		

Barrage d'Illfurth



1. Barrage d'Illfurth – 2 Vis d'Archimède Verticales

	Q (m3/s)	H (m)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,550	1,2	6475	0,8	5180	14918,4	1372	1000000	57,8
HIVER	2,42	0,8	18992		15194	87517,4	15928		

Barrages de Zillisheim



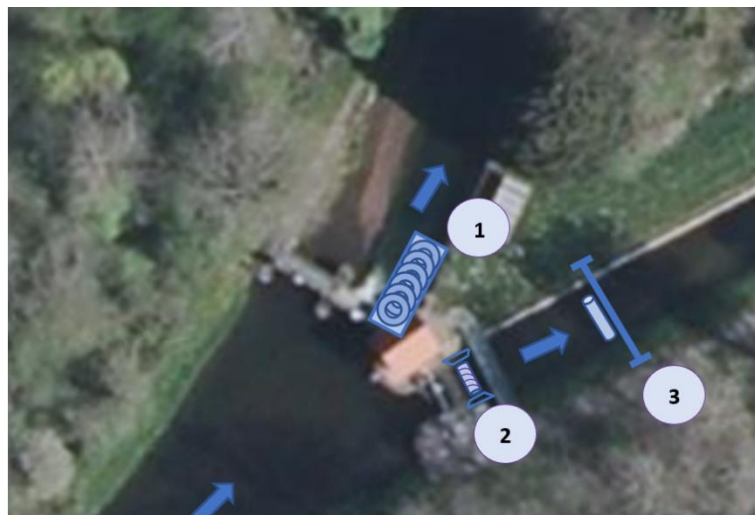
1. Barrage de Zillisheim 1 – Vis d'Archimède Verticale

	Q (m3/s)	H (m)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	1,119	1,5	16466	0,8	13173	37938,2	3490	500000	11,3
HIVER	3,306	1,5	48648		38918	224168	40799		

2. Barrage de Zillisheim 2 – Vis d'Archimède Verticale

	Q (m3/s)	H (m)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	1,876	1,5	27605	0,8	22084	63601,9	5851	500000	7,2
HIVER	5,17	1,5	76077		60861	350559	63802		

Prise d'eau de Lorquin



1. Barrage de restitution – Vis d'Archimède Verticale

	Q (m3/s)	H (m)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,40435	0,92	3649,3563	0,8	2919	8406,72	773	500000	130,4
HIVER	0,40435	0,92	3649,3563		2919	16813,4	3060		

2. Rigole – Etranglement et Vis d'Archimède Horizontale

	V (m/s)	S (m ²)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	1,154	0,368	2828	0,3	85	245	23	10000	89,6
HIVER	1,154	0,368	2828		85	490	89		

3. Rigole – Cylindre Oscillant

	V (m/s)	S (m ²)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,231	1,84	113	0,2	2	6	1	2000	2704,2
HIVER	0,231	1,84	113		2	12	0		



Prise d'eau de Nitting

1. Barrage de restitution – Vis d'Archimède Verticale

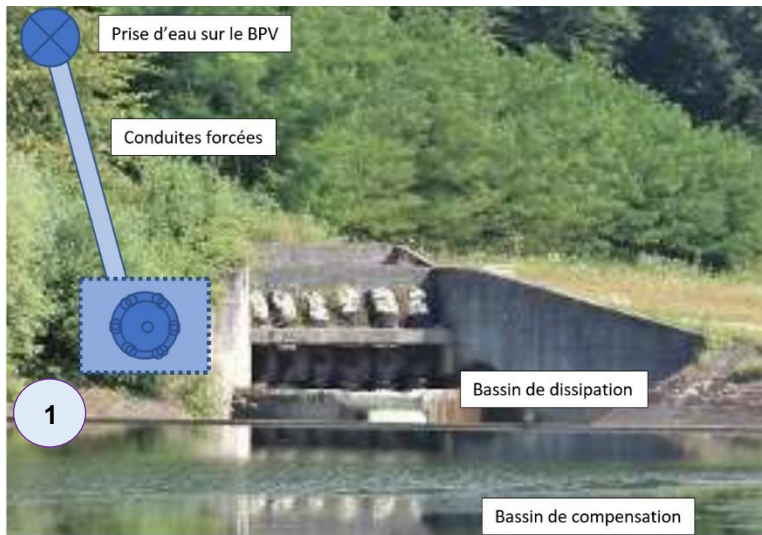
	Q (m3/s)	H (m)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,700	1	6866	0,8	5493	15819,8	1455	500000	69,3
HIVER	0,700	1	6865,9781		5493	31639,7	5758		

2. Rigole – Etranglement et Vis d'Archimède Horizontale

	V (m/s)	S (m ²)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	1,316	0,846	965	0,3	290	835	77	10000	26,3
HIVER	1,316	0,846	965		290	1670	304		

3. Rigole – Cylindre Oscillant

	V (m/s)	S (m ²)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,263	4,23	386	0,2	8	23	2	2000	190,4
HIVER	0,263	4,23	386		8	46	8		



Plan Incliné

1. Plan Incliné : alimentation CMR – Turbine Pelton

	Q (m3/s)	H (m)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,380	44,55	166073	0,85	141162	406547	37402	500000	5
HIVER	0,160	44,55	69926		59437	342357	62309		

Prise d'eau 18



1. Barrage de restitution – Vis d'Archimède Verticale

	Q (m3/s)	H (m)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	1,464	1	14362	0,8	11489	33088,3	3044	500000	18,7
HIVER	2,878	1	28233		22587	130101	23678		

2. Vanne d'alimentation du CMR – Cylindre Oscillant

	V (m/s)	S (m²)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,115	0,565	0	0,2	0	0	0	2000	1271,9
HIVER	0,297	0,565	7		2	9	2		

Prise d'eau 26



1. Barrage de restitution – Vis d'Archimède Verticale

	Q (m3/s)	H (m)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	2,547	1,35	33731	0,8	26985	77716,8	7150	500000	7,7
HIVER	5,19	1,35	68734		54987	316725	57644		

2. Prise d'eau – Cylindre Oscillant

	V (m/s)	S (m²)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,346	0,196	4	0,2	1	2	0	2000	1190,7
HIVER	0,417	0,196	7		1	8	1		



Prise d'eau 40

1. Rigole – Cylindre Oscillant

	V (m/s)	S (m ²)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,333	0,655	12	0,2	2	7	1	2000	634,5
HIVER	0,333	0,655	12		2	14	3		

1



Barrage de Colmar

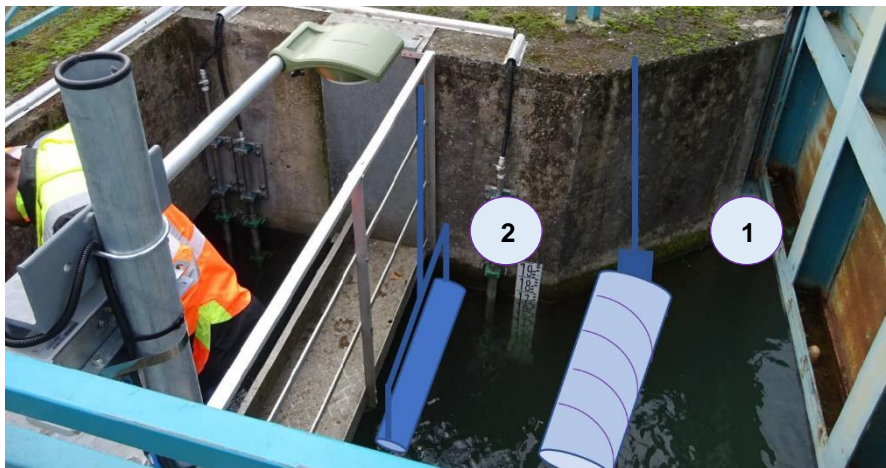
1. Barrage – 2 Vis d'Archimède Verticales

	Q (m3/s)	H (m)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	5,5	2,16	116543	0,8	93234	268514	24703	1000000	3
HIVER	18,25	2,05	367017		293613	1691211	307800		

1

Échelle 1 : 1 066

0 20 m



Prise d'eau de Neuf Brisach

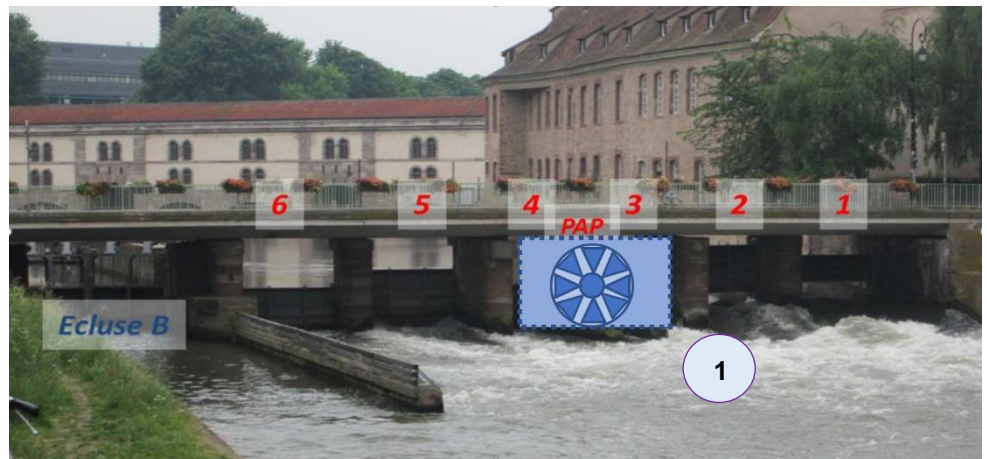
1. Vanne – Vis d'Archimède Horizontale

	V (m/s)	S (m ²)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	1,6	0,2	410	0,3	123	354	33	10000	61,9
HIVER	1,6	0,2	410		123	708	129		

2. Aqueduc – Cylindre Oscillant

	V (m/s)	S (m ²)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	0,669	4	599	0,2	120	346	32	2000	12,7
HIVER	0,669	4	599		120	691	126		

Barrage de l'Abattoir



1. Barrage – Turbine VLH

	Q (m3/s)	H (m)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	10,2	1,72	172107	0,8	137685	396533	36481	500000	1,7
HIVER	19,4	1,57	298793		239034	1376836	250584		

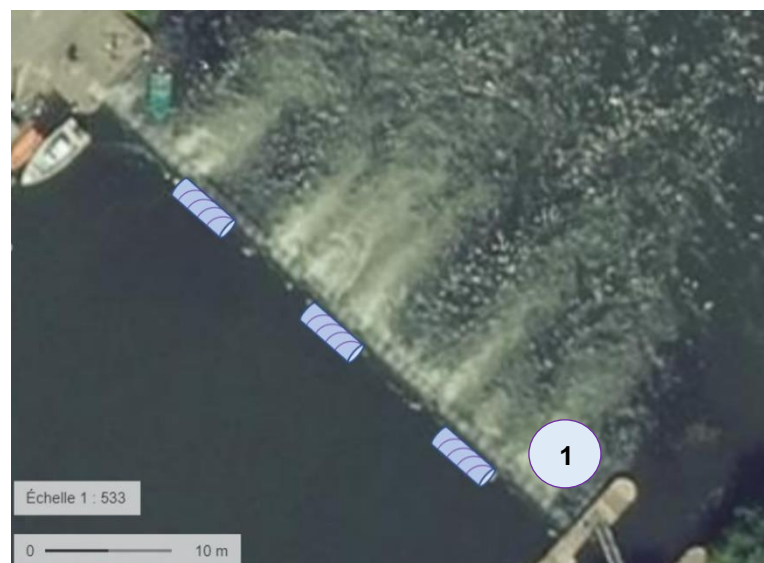
Barrage de l'Aar



1. Barrage – Vis d'Archimède Verticale

	Q (m3/s)	H (m)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	3,5	1,8	61803	0,8	49442	142393	13100	500000	3,6
HIVER	8,5	1,8	150093		120074	691626	125876		

Barrage à aiguilles



1. Barrage – 3 Vis d'Archimède Horizontales

	V (m/s)	S (m ²)	Pbrute (W)	rdt	Pnette (W)	E (kWh)	retours (€)	invest (€)	rentabilité (ans)
ÉTÉ	1,7	0,6	1474	0,3	442	1273	117	30000	51,7
HIVER	1,7	0,6	1474		442	2546	463		

Annexe 9 : Tableau récapitulatif des puissances potentielles brutes

RECAPITULATIF DU POTENTIEL BRUT			PUISSANCE POTENTIELLE						PUISSANCE CINETIQUE					
			été			hiver			été			hiver		
SITES			Q (m3/s)	H (m)	Ppot.brute (W)	Q (m3/s)	H (m)	Ppot.brute (W)	V (m/s)	Surface utile (m²)	Pcin brute (W)	V (m/s)	Surface utile (m²)	Pcin brute (W)
UT CRRBS	Rahin	Barrage	0,251	4,31	10613	0,666	4,31	28159	-	-	-	-	-	-
		Vanne de PE	0,309	1,6	4850	0,945	1,28	11866	0,401	0,771	25	0,600	1,575	170
		Rigole "amont"	-	-	-	-	-	-	0,200	1,54	6	0,300	3,150	43
	Champagney	Barrage	0,697	27	184614	0,360	31	109480	-	-	-	-	-	-
		Rigole "aval"	-	-	-	-	-	-	0,335	2,08	39	0,367	0,980	24
	CMHS	Ecluse 13	0,741	2,15	15629	0,583	2,15	12296	-	-	-	-	-	-
		Ecluse 11	0,417	1,8	7363	0,378	1,8	6675	-	-	-	-	-	-
		Ecluse 10	0,401	2,12	8340	0,462	2,12	9608	-	-	-	-	-	-
		Ecluse 9	0,291	1,84	5253	0,332	1,84	5993	-	-	-	-	-	-
	Largue	Vannes PE Friesen	-	-	-	-	-	-	0,292	0,418	5	0,292	0,418	5
		Rigole Friesen	-	-	-	-	-	-	0,233	0,523	3	0,233	0,523	3
		Rigole Valdieu	-	-	-	-	-	-	0,290	0,775	9	0,290	0,775	9
	Illfurth	Barrage	0,550	1,2	6475	2,42	0,8	18992	-	-	-	-	-	-
	Zillisheim	Barrage 1	1,119	1,5	16466	3,306	1,5	48648	1,025	8,5	4577	0,200	9,09	36
Barrage 2		1,876	1,5	27605	5,17	1,5	76077	1,01	9,16	4719	0,53	11,3	841	
UT CMR	Lorquin	Barrage	0,404	0,92	3649	0,404	0,92	3649	-	-	-	-	-	-
		Vanne PE	-	-	-	-	-	-	0,467	0,908	46	0,467	0,908	46
		Rigole	-	-	-	-	-	-	0,231	1,838	11	0,231	1,84	11
	Nitting	Barrage	0,700	1	6866	0,700	1	6866	-	-	-	-	-	-
		Vanne PE	-	-	-	-	-	-	0,527	2,116	154	0,527	2,12	154
		Rigole	-	-	-	-	-	-	0,263	4,232	39	0,263	4,23	39
	Plan Incliné	Conduites	0,380	44,55	166073	0,160	44,55	69926	-	-	-	-	-	-
	PE 18	Barrage	1,464	1	14362	2,878	1	28233	-	-	-	-	-	-
		Vanne	-	-	-	-	-	-	0,115	0,565	0	0,297	0,565	7
	PE 26	Barrage	2,547	1,35	33731	5,19	1,35	68734	-	-	-	-	-	-
Vanne		-	-	-	-	-	-	0,346	0,196	4	0,417	0,196	7	
PE 40	Rigole	-	-	-	-	-	-	0,330	0,650	12	0,330	0,650	12	
UT CA	Neuf-Brisach	Aqueduc	-	-	-	-	-	-	0,669	4	599	0,669	4	599
	Colmar	Barrage	5,5	2,16	116543	18,25	2,05	367017	-	-	-	-	-	-
	Strasbourg	B.Abattoir	10,2	1,72	172107	19,4	1,57	298793	1,5	22	37125	1,5	22	37125
		B.Aar	3,5	1,8	61803	8,5	1,8	150093	1,7	5,4	13265	1,7	5,4	13265
	B.Robertsau	28,3	0,84	233203	52,8	0,72	372937	1,7	18	44217	1,7	18	44217	

TOTAUX (kW) 1095,545

1694,041

104,857

96,615

Total été (kW)	1200,402
Total hiver (kW)	1790,656
Moyenne année (kW)	1593,905

Annexe 10 : Tableau récapitulatif du potentiel global de la DTS pour les cas envisagés

RECAPITULATIF DU POTENTIEL GLOBAL			ENERGIE POTENTIELLE						ENERGIE CINETIQUE					
			été			hiver			été			hiver		
SITES			Ppot.brut (W)	Ppot.nette (W)	E (kWh)	Ppot.brut (W)	Ppot.nette (W)	E (kWh)	Pcin.brut (W)	Pcin.nette (W)	E (kWh)	Pcin.brut (W)	Pcin.nette (W)	E (kWh)
UT CRRBS	Rahin	Barrage	10613	8490	24451	28159	22527	129756	-	-	-	-	-	-
		Vanne de PE	4850	3880	11174	11866	9493	54680	155	47	135	1064	319	1837
		Rigole "amont"	-	-	-	-	-	-	6	1	3	43	9	52
	Champagney	Barrage	184614	156922	451935	109480	93058	536014	-	-	-	-	-	-
		Rigole "aval"	-	-	-	-	-	-	105	21	60	83	17	98
	CMHS	Ecluse 13	15629	12503	36009	12296	9837	56661	-	-	-	-	-	-
		Ecluse 11	7363	5891	16966	6675	5340	30758	-	-	-	-	-	-
		Ecluse 10	8340	6672	19215	9608	7687	44277	-	-	-	-	-	-
		Ecluse 9	5253	4202	12102	5993	7794	44893	-	-	-	-	-	-
	Largue	Vannes PE Friesen	-	-	-	-	-	-	21	4	12	21	4	24
		Rigole Friesen	-	-	-	-	-	-	21	4	12	21	4	24
		Rigole Valdieu	-	-	-	-	-	-	59	12	34	59	12	69
	Illfurth	Barrage	6475	5180	14918	18992	15194	87517	-	-	-	-	-	-
	Zillisheim	Barrage 1	16466	13173	37938	48648	38918	224168	-	-	-	-	-	-
Barrage 2		27605	22084	63602	76077	60861	350559	-	-	-	-	-	-	
UT CMR	Lorquin	Barrage	3649	2919	8407	3649	2919	16813	-	-	-	-	-	-
		Vanne PE	-	-	-	-	-	-	283	85	245	283	85	490
		Rigole	-	-	-	-	-	-	11	2	6	11	0	1
	Nitting	Barrage	6866	5493	15820	6866	5493	31640	-	-	-	-	-	-
		Vanne PE	-	-	-	-	-	-	965	290	835	965	290	1670
		Rigole	-	-	-	-	-	-	39	8	23	39	8	46
	Plan Incliné	Conduites	166073	141162	406547	69926	59437	342357	-	-	-	-	-	-
	PE 18	Barrage	14362	11489	33088	28233	22587	130101	-	-	-	-	-	-
		Vanne	-	-	-	-	-	-	0	0	0	7	2	9
	PE 26	Barrage	33731	26985	77717	68734	54987	316725	-	-	-	-	-	-
Vanne		-	-	-	-	-	-	4	1	2	7	1	8	
PE 40	Rigole	-	-	-	-	-	-	12	2	7	12	2	14	
UT CA	Neuf-Brisach	Aqueduc	-	-	-	-	-	-	1009	243	700	1009	243	1400
	Colmar	Barrage	116543	93234	268514	367017	293613	1691211	-	-	-	-	-	
	Strasbourg	B.Abattoir	172107	137685	396533	298793	239034	1376836	-	-	-	-	-	-
		B.Aar	61803	49442	142393	150093	120074	691626	-	-	-	-	-	-
		B.Robertsau	-	-	-	-	-	-	1470	442	1273	1470	442	2546
TOTAUX			862341	707406	2037329	1321105	1068853	6156593	4160	1162	3348	5093	1439	8287

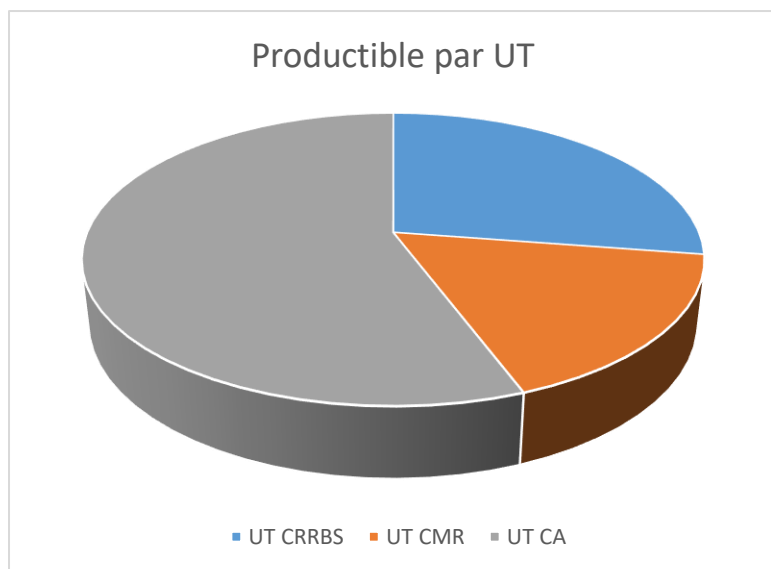
	Pbrute (kW)	Pnette (kW)	E (MWh)
Bilan été	866,502	708,568	2040,677
Bilan hiver	1326,198	1070,292	6164,880
Bilan année	1172,966	949,717	8205,557

Annexe 11 : Tableau récapitulatif de la production et des recettes de chaque site

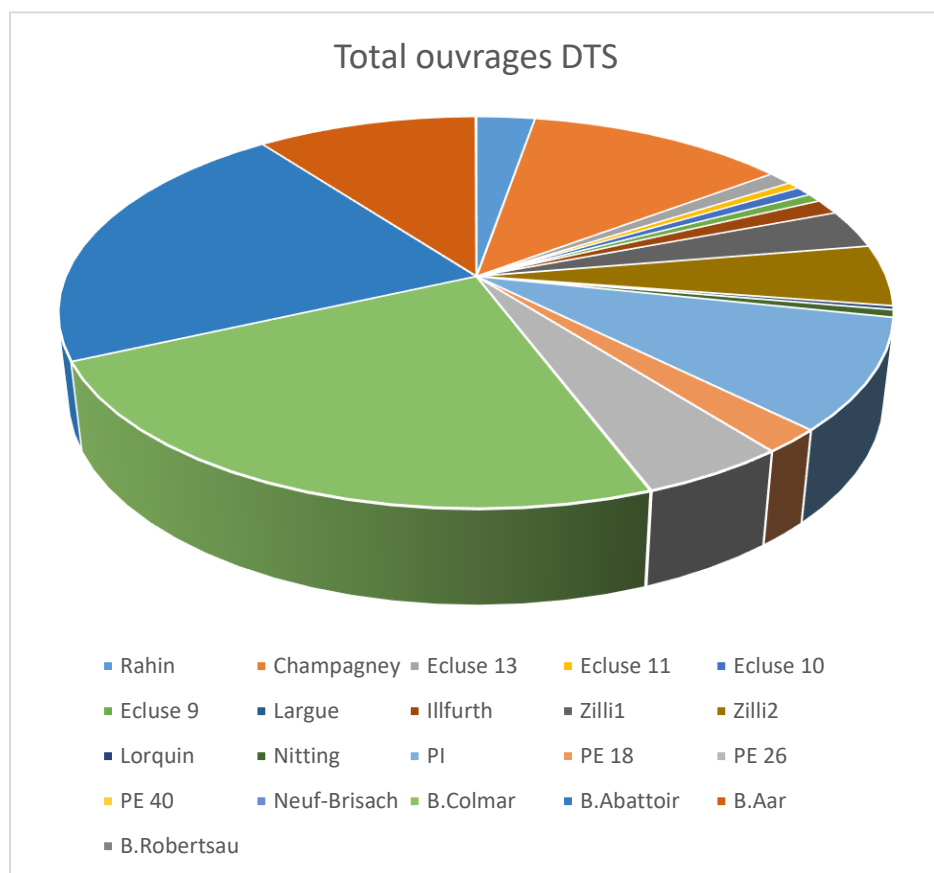
RECAPITULATIF DU POTENTIEL GLOBAL			ENERGIE POTENTIELLE				ENERGIE CINETIQUE			
			été		hiver		été		hiver	
SITES			E (kWh)	Recettes (€)	E (kWh)	Recettes (€)	E (kWh)	Recettes (€)	E (kWh)	Recettes (€)
UT CRRBS	Rahin	Barrage	24451	2250	129756	23616	-	-	-	-
		Vanne de PE	11174	1028	54680	9952	-	-	-	-
		Aval PE					135	12	1837	334
		Rigole "amont"	-	-	-	-	3	0	52	9
	Champagney	Barrage	451935	41578	536014	97555	-	-	-	-
		Rigole "aval"	-	-	-	-	60	6	98	18
	CMHS	Ecluse 13	36009	3313	56661	10312	-	-	-	-
		Ecluse 11	16966	1561	30758	5598	-	-	-	-
		Ecluse 10	19215	1768	44277	8058	-	-	-	-
		Ecluse 9	12102	1113	44893	8171	-	-	-	0
	Largue	Vannes PE Friesen	-	-	-	-	12	1	24	4
		Rigole Friesen	-	-	-	-	12	1	24	4
		Rigole Valdieu	-	-	-	-	34	3	69	12
	Illfurth	Barrage	14918	1372	87517	15928		0	-	-
Zillisheim	Barrage 1	37938	3490	224168	40799	-	-	-	-	
	Barrage 2	63602	5851	350559	63802	-	-	-	-	
UT CMR	Lorquin	Barrage	8407	773	16813	3060	-	-	-	-
		Vanne PE	-	-	-	-	245	23	490	89
		Rigole	-	-	-	-	6	1	1	0
	Nitting	Barrage	15820	1455	31640	5758	-	-	-	-
		Vanne PE	-	-	-	-	835	77	1670	304
		Rigole	-	-	-	-	23	2	46	8
	Plan Incliné	Conduites	406547	37402	342357	62309	-	-	-	-
	PE 18	Barrage	33088	3044	130101	23678	-	-	-	-
		Vanne	-	-	-	-	0	0	9	2
	PE 26	Barrage	77717	7150	316725	57644	-	-	-	-
Vanne		-	-	-	-	2	0	8	1	
PE 40	Rigole	-	-	-	-	7	1	14	3	
UT CA	Neuf-Brisach	Aqueduc	-	-	-	-	700	64	1400	255
	Colmar	Barrage	268514	24703	1691211	307800	-	-	-	-
	Strasbourg	B.Abattoir	396533	36481	1376836	250584	-	-	-	-
		B.Aar	142393	13100	691626	125876	-	-	-	-
B.Robertsau		-	-	-	-	1273	117	2546	463	
TOTAUX			2037329	187434	6156593	1120500	3348	308	8287	1508

	E (kWh)	Recettes (€)
E potentielle	8193923	1307934
E cinétique	11635	1816
Bilan total	8205557	1309750

Annexe 12 : Bilans du productible par UT et par ouvrage

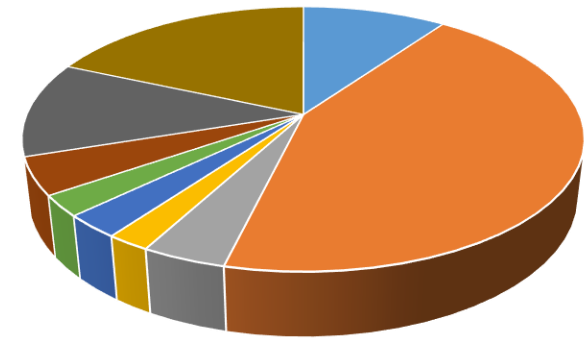


Secteur	E (kWh)	Proportion
UT CA	4573031	56%
UT CRRBS	2249956	27%
UT CMR	1382570	17%
Total	8205557	100%



Sites	E (kWh)	Proportion
B.Colmar	1959725	24%
B.Abattoir	1773369	22%
Champagny	988108	12%
B.Aar	834019	10%
PI	748904	9%
Zilli2	414161	5%
PE 26	394452	5%
Zilli1	262106	3%
Rahin	222088	3%
PE 18	163198	2%
Illfurth	102436	1%
Ecluse 13	92670	1%
Ecluse 10	63492	1%
Ecluse 9	56995	1%
Nitting	50034	1%
Ecluse 11	47724	1%
Lorquin	25961	0%
B.Robertsau	3819	0%
Neuf-Brisach	2100	0%
Lague	175	0%
PE 40	21	0%
Total	8205557	100%

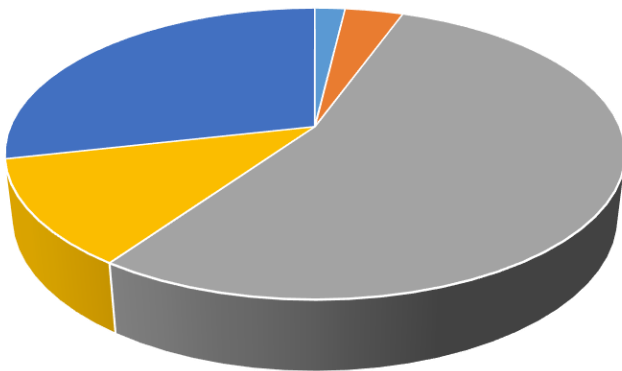
UT CRRBS



- Rahin ■ Champagnéy ■ Ecluse 13 ■ Ecluse 11
- Ecluse 10 ■ Ecluse 9 ■ Largue ■ Illfurth
- Zilli1 ■ Zilli2

Sites	E (kWh)	Proportion
Champagnéy	988108	44%
Zilli2	414161	18%
Zilli1	262106	12%
Rahin	222088	10%
Illfurth	102436	5%
Ecluse 13	92670	4%
Ecluse 10	63492	3%
Ecluse 9	56995	3%
Ecluse 11	47724	2%
Largue	175	0%
Total	2249956	100%

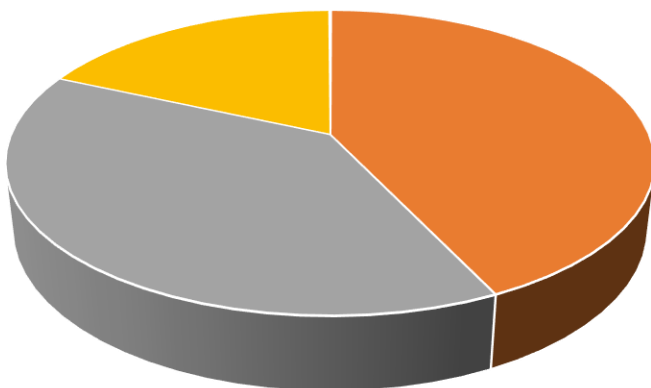
UT CMR



- Lorquin ■ Nitting ■ PI ■ PE 18 ■ PE 26 ■ PE 40

Sites	E (kWh)	Proportion
PI	748904	54%
PE 26	394452	29%
PE 18	163198	12%
Nitting	50034	4%
Lorquin	25961	2%
PE 40	21	0%
Total	1382570	100%

UT CA



- Neuf-Brisach ■ B.Colmar ■ B.Abattoir ■ B.Aar ■ B.Robertsau

Sites	E (kWh)	Proportion
B.Colmar	1959725	43%
B.Abattoir	1773369	39%
B.Aar	834019	18%
B.Robertsau	3819	0%
Neuf-Brisach	2100	0%
Total	4573031	100%

**Annexe 13 : Note de calcul des puissances
nettes au barrage du Rahin**

**NOTE DE CALCUL DES PUISSANCES NETTES AU BARRAGE DU
RAHIN**

Cette note a pour but de présenter en détails la méthodologie et les calculs de puissances nettes prenant en compte les aménagements proposés à la **partie III** grâce à l'exemple de la prise d'eau du Rahin. Une démarche analogue a été menée pour chaque site de l'étude.

I. Rappel des caractéristiques et puissances brutes

Le site présente quatre zones d'intérêt :

- La chute d'eau au droit du barrage de restitution ($h = 4,31 \text{ m}$; $0,251 < Q < 0,666 \text{ m}^3/\text{s}$),
- La chute d'eau au droit de la vanne de prélèvement ($1,28 < h < 1,6 \text{ m}$; $0,309 < Q < 0,945 \text{ m}^3/\text{s}$),
- L'aval immédiat de la vanne de prélèvement, dans la rigole, présentant des vitesses plus importantes (0,4 à 0,6 m/s) et une section moins large (2,5 m) que le reste de la rigole,
- Le « corps » de la rigole, présentant des vitesses moindres (0,2 à 0,3 m/s) et une largeur plus importante (5 m).

En été, les puissances brutes sont respectivement de 10 613, 4 850, 25, et 6 watts.

En hiver, les puissances brutes sont respectivement de 28 159, 11 866, 170, et 43 watts.

II. Aménagements et Puissances brutes d'équipement

Barrage de restitution :

Nouvelle consigne d'exploitation : Maintien du clapet en position haute, afin de maintenir la chute à 4,31 m même lorsqu'il n'y a pas de prélèvement : le débit restitué est pris en charge par la turbine.

Choix de la turbine : une vis d'Archimède verticale fonctionne pour les gammes de hauteur et de débits du site ; de plus elle est plus rustique/facile d'installation et de maintenance.

La puissance brute d'équipement correspond ici à la puissance brute totale du site.

Vanne de prélèvement :

Pas de consigne particulière.

Choix de la turbine : une vis d'Archimède verticale fonctionne pour les gammes de hauteur et de débits du site ; de plus elle est plus rustique/facile d'installation et de maintenance.

La puissance brute d'équipement correspond ici à la puissance brute totale du site.

Aval prélèvement :

Rétrécissement de la largeur de 2,5 à 1 m afin d'augmenter les vitesses d'écoulement. Dans cette configuration, les nouvelles vitesses sont calculées par la formule de Manning-Strickler : 1,002 m/s en été ; et 1,5 m/s en hiver.

Calcul du nouveau niveau d'eau à l'amont du rétrécissement (cf [24]) :

Pour un canal rectangulaire à surface libre, on a :

- l_c , la largeur du canal au niveau de la section critique dans le canal venturi (dans notre cas 1 m),
- k , le niveau d'eau maximum au niveau de la section critique dans le canal venturi,
- H , la charge de l'écoulement qui se conserve en amont et au sein du venturi,
- U_{am} la vitesse de l'écoulement à l'amont du venturi (ici 0,4 et 0,6 m/s selon la saison),
- h_{am} la hauteur d'eau à l'amont du venturi (ce que l'on cherche à déterminer).

Dans notre cas, et par exemple pour l'été, on a :

$$k = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g * l_c^2}}$$

$$k = \sqrt[3]{\frac{0,309^2}{9,81 * 1^2}}$$

$$k = 0,21 \text{ m}$$

De plus,

$$H = \frac{3 * k}{2} \text{ et } H = h_{am} + \frac{u_{am}^2}{2 * g}$$

D'où

$$h_{am} = \frac{3 * k}{2} - \frac{u_{am}^2}{2 * g}$$

Ainsi,

$$h_{am} = \frac{3 * 0,21}{2} - \frac{1,002^2}{2 * 9,81}$$

$$\mathbf{h_{am} = 0,31 \text{ m}}$$

Il y a donc un rehaussement de la ligne d'eau de l'ordre de 2 mm par rapport à celle calculée par la formule de Manning-Strickler à la **partie II**. Il n'y a aucun risque de débordement de la rigole, ni aucune remise en cause des équipements proposés. La même démarche est menée pour l'hiver : la hauteur d'eau amont est de 0,66 m soit 3 cm de plus que sans aménagements.

Le rétrécissement est donc possible et compatible avec l'installation d'une VAH à l'aval de la prise d'eau.

été	Q (m3/s)	lc (m)	k (m)	H (m)	Uam (m/s)	ham (m)
	0,309	1	0,21	0,32	0,40	0,31

hiver	Q (m3/s)	lc (m)	k (m)	H (m)	Uam (m/s)	ham (m)
	0,945	1	0,45	0,67	0,60	0,66

Les puissances brutes pour ce site sont obtenues grâce aux nouvelles vitesses d'écoulement (1,002 et 1,5 m/s).

	Q (m3/s)	h (m)	L (m)	S (m2)	V (m/s)	P (kW)
été	0,309	0,308	1	0,308	1,002	0,155
hiver	0,945	0,630	1	0,630	1,500	1,064

Pour rappel :
$$P_{cin} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$$

« Corps » de la rigole :

Aucun aménagement particulier n'est nécessaire pour accueillir un cylindre oscillant : la puissance brute d'équipement correspond à la puissance brute totale.

III. Calculs des puissances nettes

Comme énoncé à la partie I, la puissance nette d'une installation est le produit de la puissance brute d'équipement et du rendement de l'installation.

Comme indiqué à la partie I, et rappelé à la partie III, les VAV ont un rendement de 80%, les VAH de 30% et les CO de 20%.

On a ainsi :

- Barrage de restitution : $P_{nette} = 0,8 \times 10\,613 = 8\,490$ W en été (22 527 en hiver),
- Prise d'eau : $P_{nette} = 0,8 \times 4\,850 = 3\,880$ W en été (9 493 en hiver),
- Aval prise d'eau : $P_{nette} = 0,3 \times 155 = 47$ W en été (319 en hiver),
- Rigole : $P_{nette} = 0,2 \times 6 = 1$ W en été (9 en hiver)

Ces résultats sont présentés à la **partie III** ainsi qu'à l'**annexe 10**.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Diplôme(s) Ingénieur de l'ENGEES

Spécialité Hydrosystèmes

Auteur

Thibault PILOIX

Année

2019

Titre

Perspectives sur la pico-hydroélectricité pour la Direction territoriale de Strasbourg de Voies navigables de France

Nombre de pages texte : 55 annexes : 34

Nombre de références bibliographiques 24

Structure d'accueil : Direction territoriale de Strasbourg, VNF

Maître de stage : Olivier CHRISTOPHE

Résumé

Voies navigables de France souhaite promouvoir les énergies renouvelables et valoriser ses ouvrages grâce à un état des lieux et de premières réflexions sur la petite hydroélectricité portant sur la totalité du réseau de la DT de Strasbourg.

Cette étude est la première à être lancée à l'échelle de toute une direction territoriale, avec la prise en compte des aspects potentiels et cinétiques des écoulements, traitant d'une grande diversité d'ouvrages, et intégrant dans sa réflexion des prototypes hydroliens adaptés au réseau. Les sites sont décrits, étudiés, puis classés en fonction de leur potentiel, permettant à l'établissement de prioriser ses prochaines actions d'aménagement. Ce travail est également le lieu de la première collaboration entre VNF et le laboratoire ICube, ouvrant ainsi la porte à de futurs partenariats pour la recherche et le développement de micro-turbines.

Mots-clés

Hydroélectricité, potentiel hydroélectrique, hydrolienne, barrage, voie navigable, canal, vis d'Archimède, énergies renouvelables, micro-centrales