

## NOTE TECHNIQUE

### PASSE A POISSONS DE MARCKOLSHEIM – DIMENSIONNEMENT HYDRAULIQUE ET PISCICOLE

**Projet**

**Référence** H-30575713-2022-000004

**Date** 11/01/2022

**Indice** A

106 page(s)

annexe(s)

<b>Résumé</b>	
<b>Unité propriétaire</b>	CIH
<b>Sous-Unité</b>	GU MARCKOLSHEIM-RHINAU
<b>Site</b>	MARCKH \ MARCKOLSHEIM
<b>Entité rédactrice</b>	30575713 - SERVICE ENVIRONNEMENT ET SOCIETE
<b>Auteur(s)</b>	Lionel DUMOND
<b>EOTP</b>	
<b>Accessibilité</b> (Classification et règles de protection des informations d'EDF SA, DSIE-2017-000046.)	Interne EDF <b>Confidentiel</b> (Lister nominativement en page 2 Diffusion : les personnes destinataires) <b>Restreint</b> (Indiquer explicitement en page 2 Diffusion : les destinataires (nom ou fonction) ou de manière implicite le périmètre restreint retenu : Projet, groupe de personnes, ...) <b>Interne</b> (Indiquer le périmètre d'accès retenu : EDF SA, Direction, Division, Entité, Projet, Liste de diffusion) <b>Libre</b> (Accessible à tout public interne ou externe EDF SA)

SIGNATURES						
Date	Rédacteur(s)		Vérificateur(s)		Approbateur(s)	
	Nom	Visa	Nom	Visa	Nom	Visa
11/01/2022	DUMOND L.	LD	GANT M.	MG	MOURRAT A. BROUSSE G.	AM/GB

LIEU DE CONSERVATION	
Original papier	Original numérique
ALX	ALX

DIFFUSION INTERNE AU CIH			
Destinataire	Département / Service	Nb ex.	Format
Guillian BROUSSE	PROJETS	1	num

DIFFUSION EXTERNE AU CIH			
Destinataire	Organisme	Nb ex.	Format

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS		
Ind.	Date	Nature des évolutions
A	11/01/2022	Création du document

## SOMMAIRE

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>7</b>
1.1 CONTEXTE	7
1.2 OBJECTIFS DE LA NOTE	7
1.3 PRINCIPE DE LA SOLUTION	8
<b>2. DONNEES D'ENTREE</b>	<b>9</b>
2.1 HYDROLOGIE	9
2.2 FONCTIONNEMENT DE L'AMENAGEMENT	12
2.3 CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DE L'AMENAGEMENT	14
2.4 ESPECES MIGRATRICES A CONSIDERER	17
2.4.1 Analyse des passages à Gamsheim	17
2.4.2 Espèces cibles retenues	18
2.5 GAMME DE FONCTIONNEMENT	19
2.6 NIVEAUX D'EAU	20
2.6.1 En amont de l'usine	21
2.6.2 En aval de l'usine	25
<b>3. CONCEPTION GENERALE</b>	<b>31</b>
3.1 PRINCIPES DE BASE	31
3.2 ALIMENTATION EN DEBIT	32
3.3 ÉTUDE PRELIMINAIRE DES ECOULEMENTS EN AMONT	34
3.4 ÉTUDE PRELIMINAIRE DES ECOULEMENTS EN AVAL	35
3.4.1 Observations des écoulements	35
3.4.2 Courantologie de surface	35
3.5 CARACTERISATION DES ENTREES PISCICOLES	39
3.5.1 Implantation théorique	39
3.5.2 Etude sur modèles de Rhinau - EPFL	41
3.5.3 Configuration finale proposée	44
3.6 ANATOMIE DE L'OUVRAGE	45
<b>4. DIMENSIONNEMENT</b>	<b>46</b>
4.1 PRINCIPES GENERAUX DE DIMENSIONNEMENT	46
4.2 RAPPELS SUR LES GAMMES DE FONCTIONNEMENT	47
4.3 PREDIMENSIONNEMENT	48

4.3.1	Evaluation des pertes de charge linéaires .....	48
4.3.2	Evaluation des pertes de charge singulières .....	49
4.3.2.1	Coudes .....	49
4.3.2.2	Local vidéo .....	49
4.3.2.3	Injections de débit.....	49
4.3.2.4	Prégrille amont .....	49
4.3.2.5	Sortie piscicole .....	49
4.3.3	Estimation de la répartition des débits entre la rive droite et la rive gauche .....	50
4.4	DIMENSIONNEMENT .....	51
4.4.1	Procédure .....	51
4.4.2	Alimentation en eau .....	51
4.4.3	Détermination des lignes d'eau .....	53
4.4.3.1	Entrées piscicoles.....	53
4.4.3.2	Canaux d'alimentation des entrées piscicoles .....	56
4.4.3.3	Injection du débit d'attrait rive droite .....	57
4.4.3.4	Délivrance et répartition du débit d'attrait rive droite .....	59
4.4.3.5	Passe à bassins rive droite .....	61
4.4.3.6	Injection du débit d'attrait rive gauche.....	64
4.4.3.7	Délivrance et répartition du débit d'attrait rive gauche .....	64
4.4.3.8	Passe à bassins rive gauche .....	64
4.4.3.9	Canal de transfert rive gauche-rive droite .....	65
4.4.3.10	Passe à bassins de transfert.....	66
4.4.3.11	Difffluence rive droite-rive gauche .....	67
4.4.3.12	Délivrance du débit complémentaire.....	68
4.4.3.13	Canal de liaison.....	71
4.4.3.14	Passe à bassins amont.....	72
4.4.3.15	Canal de la sortie piscicole .....	74
4.4.3.15.1	Prise d'eau .....	75
4.4.3.15.2	Vanne de condamnation.....	76
4.4.3.15.3	Grille grossière .....	76
4.4.3.15.4	Canal.....	76
4.4.3.15.5	Local de vidéo-comptage .....	77
4.4.3.15.6	Passage sous la route et coude en amont de la passe amont.....	80
4.4.3.15.7	Pertes de charge linéaires.....	81
4.4.3.15.8	Pertes de charge singulières .....	82

## ILLUSTRATIONS

Figure 1 - Débits moyens mensuels du Rhin à Bâle (station LHG 2220, bassin versant contrôlé de 35 929 km <sup>2</sup> ) .....	9
Figure 2 - Débits classés à Bâle (station LHG 2220) .....	9
Figure 3 - Comparaison débit à Bâle – débit turbiné à Rhinau .....	11
Figure 4 - Vues aériennes de l'aménagement de Marckolsheim .....	12
Figure 5 - Vue aérienne de l'usine de Marckolsheim .....	13
Figure 6 – Comparaison des élargissements des canaux de fuite de Rhinau et Marckolsheim .....	14
Figure 7 – Comparaison des radiers en sortie d'aspirateur à Rhinau et à Marckolsheim .....	15
Figure 8 – Comparaison de profils transversaux des canaux de fuite de Rhinau et Marckolsheim .....	15
Figure 9 – Comparaisons longitudinale et transversale des canaux d'amenée des usines de Rhinau (rouge) et Marckolsheim (bleu ou fond de plan).....	16
Figure 10 – Espèces cibles.....	18
Figure 11 – Localisation des capteurs d'exploitation de l'usine (amont en haut et aval en bas).....	20
Figure 12 – Localisation des sondes de mesure de niveau .....	21
Figure 13 – Enregistrement des niveaux par la sonde amont.....	22
Figure 14 – Répartition statistique des niveaux sonde amont.....	22
Figure 15 – Ecarts entre sonde et capteur amont.....	23
Figure 16 – Enregistrements des cotes aval par les sondes en 2021.....	25
Figure 17 – Répartition statistique des niveaux aux sondes en fonction des débits turbinés .....	26
Figure 18 – Répartition statistique par rive des écarts de niveau entre la localisation turbine et la localisation rive en aval .....	27
Figure 19 – Répartition statistique des écarts entre les deux rives, au niveau des turbines et plus en aval.....	28
Figure 20 – Ecarts entre sonde1 et capteur aval .....	29
Figure 21 – Limites indicatives d'accumulation des corps flottants en amont de l'usine (trait 1 : quand un groupe de rive à l'arrêt ; trait 2 ; en général) .....	34
Figure 22 – Vue aérienne zénithale de l'écoulement en aval de l'usine de Marckolsheim .....	35
Figure 23 – Comparaison des vitesses dans le canal de fuite de Rhinau et(en bas, modèle physique) et de Marckolsheim (en haut, LSPIV) en situation de saturation de l'usine .....	38
Figure 24 – Marckolsheim - courantologie de surface en rive droite (G3 et G4 à saturation) .....	38
Figure 25 – Vue des aspirateurs, des alvéoles et des loges.....	39
Figure 26 – Principe d'une galerie collectrice .....	40
Figure 27 – Mesures de profils de vitesse en sortie des aspirateurs des turbines par mesure à l'ADCP .....	41
Figure 28 – Macrostructures d'écoulement ; exemple de comparaison de résultats observés sur site et simulés à l'EPFL .....	41
Figure 29 - Profils verticaux de vitesse ; exemple de comparaison de résultats observés sur site et simulés à l'EPFL .....	42
Figure 30 – Configuration d'entrée de rive retenue.....	43
Figure 31 – Configuration finale des entrées rive droite .....	44
Figure 32 – Schéma fonctionnel de l'ouvrage de montaison de Marckolsheim .....	45
Figure 33 - Coefficient de débitance des fentes (Ballu, 2017 et Wang, 2010) .....	48
Figure 34 – Macro-rugosités de fond dans les canaux .....	56
Figure 35 – Pertes de charge aux grilles de débit d'attrait (Formule de Raynal et al. 2012).....	58

Figure 36 – Dimensions des bassins des passes à poissons .....	61
Figure 37 – Macrorugosités sur le radier des bassins des passes .....	62
Figure 38 – Chanfreinage des angles dans les bassins de retournement .....	63
Figure 39 – Design de la diffluence .....	67
Figure 40 – Superposition des géométries Rhinau et Marckolsheim en aval du débit complémentaire .....	70
Figure 41 – Dimensions des bassins des passes à poissons .....	72
Figure 42 – Schéma de principe du canal de la sortie piscicole .....	74
Figure 43 – Schéma de principe de la sortie piscicole .....	75
Figure 44 - Calcul des conditions d'équilibre dans le by-pass du local vidéo pour une cote du canal d'aménée médiane .....	78
Figure 45 – macrorugosités de fond au local de comptage de Kembs .....	78
Figure 46 – Canal de liaison amont et local vidéo .....	79
Figure 47 – Macrorugosités du radier du canal de liaison de la sortie piscicole .....	81

## 1. INTRODUCTION

### 1.1 CONTEXTE

Le Rhin étant un fleuve international, les objectifs de "Continuité Ecologique" sont discutés et définis sous l'égide de la CIPR (Commission Internationale pour la Protection du Rhin).

Celle-ci a lancé un programme "Rhin 2020 : programme pour le développement durable du Rhin", qui prévoit le rétablissement de la continuité écologique du cours d'eau principal.

Les aménagements d'Iffezheim, Gamsheim, Strasbourg et Gerstheim ayant été traités, la question se pose aujourd'hui pour les trois aménagements situés immédiatement à l'amont, à l'aval du Vieux Rhin.

En 2017, compte tenu des particularités techniques des aménagements de Rhinau, Marckolsheim et Vogelgrun, la France a proposé une alternative à la réalisation de dispositifs de franchissement plus « classiques » (passe à bassins, rivière de contournement ou encore ascenseur...). Le projet consistait en la réalisation d'une passe à poissons à bassin mobile à Rhinau permettant la capture des poissons puis leur transport en bateau dans le Vieux Rhin ainsi que dans les biefs intermédiaires (secteurs Rhinau-Marckolsheim et Marckolsheim-Vogelgrun). Cette technique permettait de maximiser le taux de transfert des poissons grands migrateurs (en particulier le saumon) vers les zones de reproduction présumées du Vieux-Rhin et vers la Suisse, tout en transférant les poissons holobiotiques alternativement dans les différents biefs (Tétard et Travade, 2015).

Le projet a été jugé trop artificiel et trop axé sur les grands migrateurs par les pays membres de la CIPR. A l'été 2018, face à la pression de ces pays, l'Etat Français a annoncé son retrait du projet de capture-transport sur l'aménagement de Rhinau à la plénière de la Commission de la CIPR. Suite à cette annonce, le projet EDF a également été stoppé.

En 2020, pour faire face et protéger le pays des conséquences économiques et sociales de la crise de la Covid-19, le gouvernement français a mis en place un plan de soutien, réponse immédiate et forte pour amortir le premier choc. En septembre dernier, le gouvernement a souhaité amplifier les efforts mis en œuvre au travers d'un nouveau plan baptisé "France Relance", véritable feuille de route pour la refondation économique, sociale et écologique du pays.

Le projet des passes à poissons de Rhinau et Marckolsheim a été inscrit dans le plan « France relance » et les cahiers des charges des concessions respectives ont été modifiés par les arrêtés en date du 17 septembre 2021.

**Il est donc demandé aujourd'hui à EDF de proposer des ouvrages « classiques » de montaison sur ces deux aménagements.**

### 1.2 OBJECTIFS DE LA NOTE

La présente note a pour objectif la reprise et l'adaptation des éléments de dimensionnement issus des réflexions menées pour le dimensionnement de la passe à poissons de Rhinau.

Elle conserve le principe d'une collecte des poissons sur les deux rives et reprend les éléments de conception des entrées piscicoles précédemment établis.

Elle intègre un groupe de turbinage du débit d'attrait complémentaire en rive droite. Cela implique la mise en place d'une prise d'eau dans le canal d'amenée de l'usine principale.

Elle décrit la jonction vers l'amont de l'usine au moyen d'un chenal de transfert et d'une passe à bassins.

Enfin, elle précise le dimensionnement d'une station de comptage à chenal unique située dans la partie amont de l'ouvrage de migration.

### 1.3 PRINCIPE DE LA SOLUTION

Les poissons migrateurs en montaison, après avoir franchi les aménagements d'Iffezheim, Gamsheim, Strasbourg, Gerstheim et Rhinau, se présenteront en aval de Marckolsheim, préférentiellement au pied de la centrale, dont l'attrait par rapport au tronçon court-circuité est prépondérant la majeure partie de l'année.

Un ouvrage d'attrait des poissons sera implanté en aval de la centrale sur chacune des rives du canal de restitution ; il sera conçu selon les mêmes principes que la partie aval des autres passes à poissons du Rhin : les poissons seront attirés dans le dispositif par un "débit d'attrait", délivré par plusieurs "entrées", qui doivent être judicieusement placées pour que les poissons puissent percevoir leur jet au milieu des écoulements du canal de restitution de l'usine.

Les poissons seront élevés à la hauteur du terrain naturel des berges par des passes à bassins (une en rive droite, une en rive gauche).

Après un transfert vers la rive droite pour les poissons issus de la rive gauche, ils seront réunis et poursuivront leur migration vers l'amont dans un chenal de transfert puis dans une nouvelle passe à bassins afin de regagner le canal d'amenée de l'usine à environ 175 m en amont de cette dernière.

Entre la passe à bassins amont et le chenal d'amenée de l'usine, les poissons seront dénombrés dans une station de comptage vidéo à chenal unique.



## 2. DONNEES D'ENTREE

### 2.1 HYDROLOGIE

L'hydrologie naturelle du Rhin à l'entrée en France est influencée par des aménagements hydrauliques situés sur son bassin à l'amont de Bâle.

Le fleuve conserve toutefois un régime de type glacio-pluvio-nival avec de hautes eaux en juin et de basses eaux en janvier.

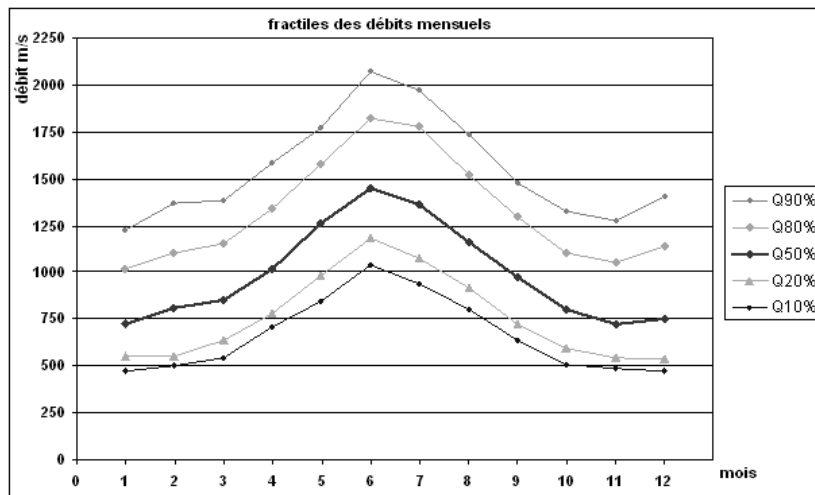


Figure 1 - Débits moyens mensuels du Rhin à Bâle (station LHG 2220, bassin versant contrôlé de 35 929 km<sup>2</sup>)

Dans la partie franco-allemande, les centrales sont exploitées au fil de l'eau, avec possibilité d'éclusées lorsque les débits sont compris entre 300 et 1300 m<sup>3</sup>/s à Bâle.

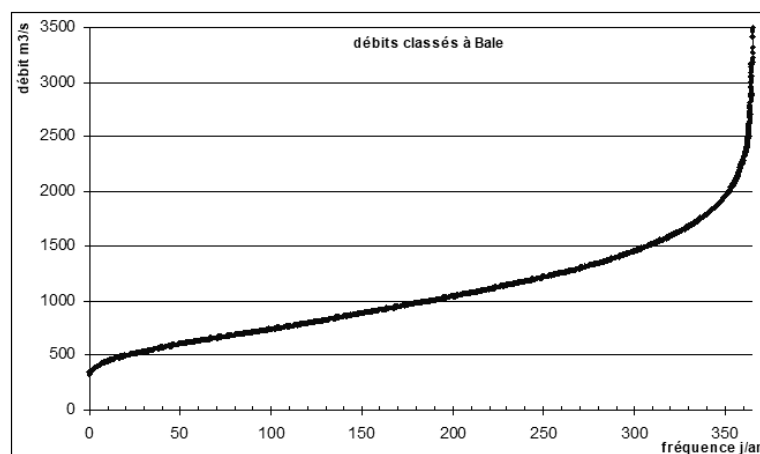


Figure 2 - Débits classés à Bâle (station LHG 2220)

Les éclusées consistent à turbiner moins que les entrants à Bâle pendant la nuit, et plus le matin ou en soirée.

Elles sont réalisées avec la contrainte de maintenir à l’aval de la chaîne française, le même débit qu’à Bâle.



Aménagements en ligne

Aménagements en feston

Aménagements en dérivation

Pour ce faire, les retenues doivent jouer des rôles antagonistes : à l'amont, elles sont dites émettrices car elles génèrent l'éclusee et en aval, elles sont dites réceptrices car elles absorbent l'éclusee.

Entre les deux, les biefs transmetteurs délivrent le débit reçu sans variation de niveau associée à l'éclusee.

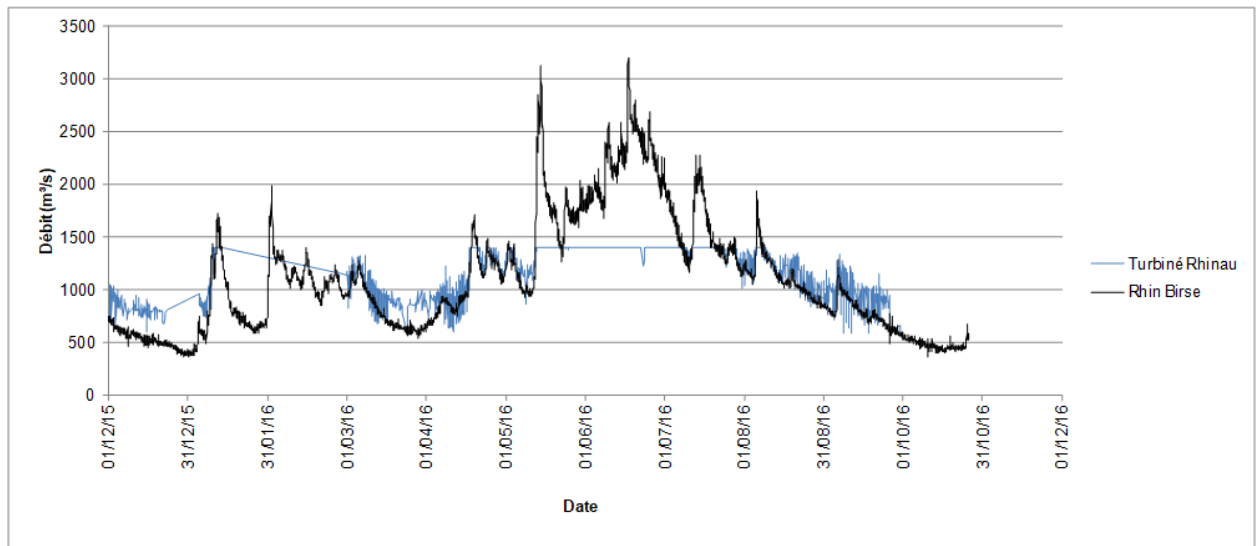


Figure 3 - Comparaison débit à Bâle – débit turbiné à Rhinau

**Le fonctionnement en éclusees de l'usine de Marckolsheim augmente la fréquence des niveaux aval les plus élevés et des niveaux amont les plus bas et doit donc conduire à ne pas considérer ces derniers comme étant exceptionnels.**

## 2.2 FONCTIONNEMENT DE L'AMENAGEMENT

L'aménagement de Marckolsheim, mis en service en 1961, se situe dans le département du Bas Rhin (67).

C'est le 5<sup>ème</sup> aménagement de la chaîne du Rhin, et le second réalisé en feston.

L'usine de Marckolsheim comporte 4 groupes de type Kaplan et fonctionne sous une hauteur de chute maximum de 13,20 m. La cote de retenue normale est à 186,50 m NN. La puissance totale installée est de 150 MW.

Le débit d'équipement de l'usine de Marckolsheim est de 1 400 m<sup>3</sup>/s.

En cas d'arrêt des groupes, le débit est restitué à l'aval par 2 déchargeurs centraux situés entre les groupes 2 et 3.



Figure 4 - Vues aériennes de l'aménagement de Marckolsheim

Le débit réservé au barrage de Marckolsheim est de 15 m<sup>3</sup>/s.

Précisons que l'usine réalise des éclusées plus ou moins fréquentes en fonction de leur nature. Ce mode de fonctionnement peut conduire aux valeurs de niveaux suivantes :

- Niveaux amont
 

Min	185,80 NN
Max	186,60 NN
- Niveaux aval
 

Min	172,90 NN
Max	174,50 NN

Ces extrema représentant des conditions particulières, le fonctionnement de l'usine sera analysé à partir des chroniques d'enregistrement de niveaux afin de définir des intervalles statistiquement pertinents vis-à-vis de la migration piscicole. Une analyse de la sensibilité de l'ouvrage de migration aux conditions extrêmes sera réalisée en complément en ANNEXE 6.



Figure 5 - Vue aérienne de l'usine de Marckolsheim

Le principe de fonctionnement de l'aménagement de Marckolsheim est le suivant :

- Pour un débit du Rhin inférieur à 1 415 m<sup>3</sup>/s, le canal d'amenée entonne le débit du Rhin diminué de 15 m<sup>3</sup>/s. La totalité du débit du canal est turbiné à l'usine.
- En cas d'arrêt des groupes (momentané, ou programmé pour entretien), et si le débit dans le canal d'amenée est inférieur à 1400 m<sup>3</sup>/s, le débit est restitué à l'aval par 2 déchargeurs situés en position centrale.
- Pour un débit du Rhin supérieur à 1 415 m<sup>3</sup>/s (environ 80 jours/an) : le canal d'amenée entonne 1 400 m<sup>3</sup>/s et le reste du débit est déversé dans le tronçon court-circuité par ouverture progressive des vannes du barrage de Marckolsheim.

## 2.3 CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DE L'AMENAGEMENT

Les usines de Marckolsheim et de Rhinau sont souvent dites « jumelles ».

Bien que se ressemblant beaucoup, elles présentent des différences visibles au niveau de la configuration du canal de fuite.

La largeur de celui-ci est la même au niveau de l'extrémité des aspirateurs (127 m de large). Mais l'élargissement qui vient ensuite est propre à chaque usine.

Alors que sur Rhinau (en rouge sur le schéma ci-après), les rives présentent une forte dissymétrie, à Marckolsheim elles sont parfaitement symétriques (en bleu sur le schéma ci-après).

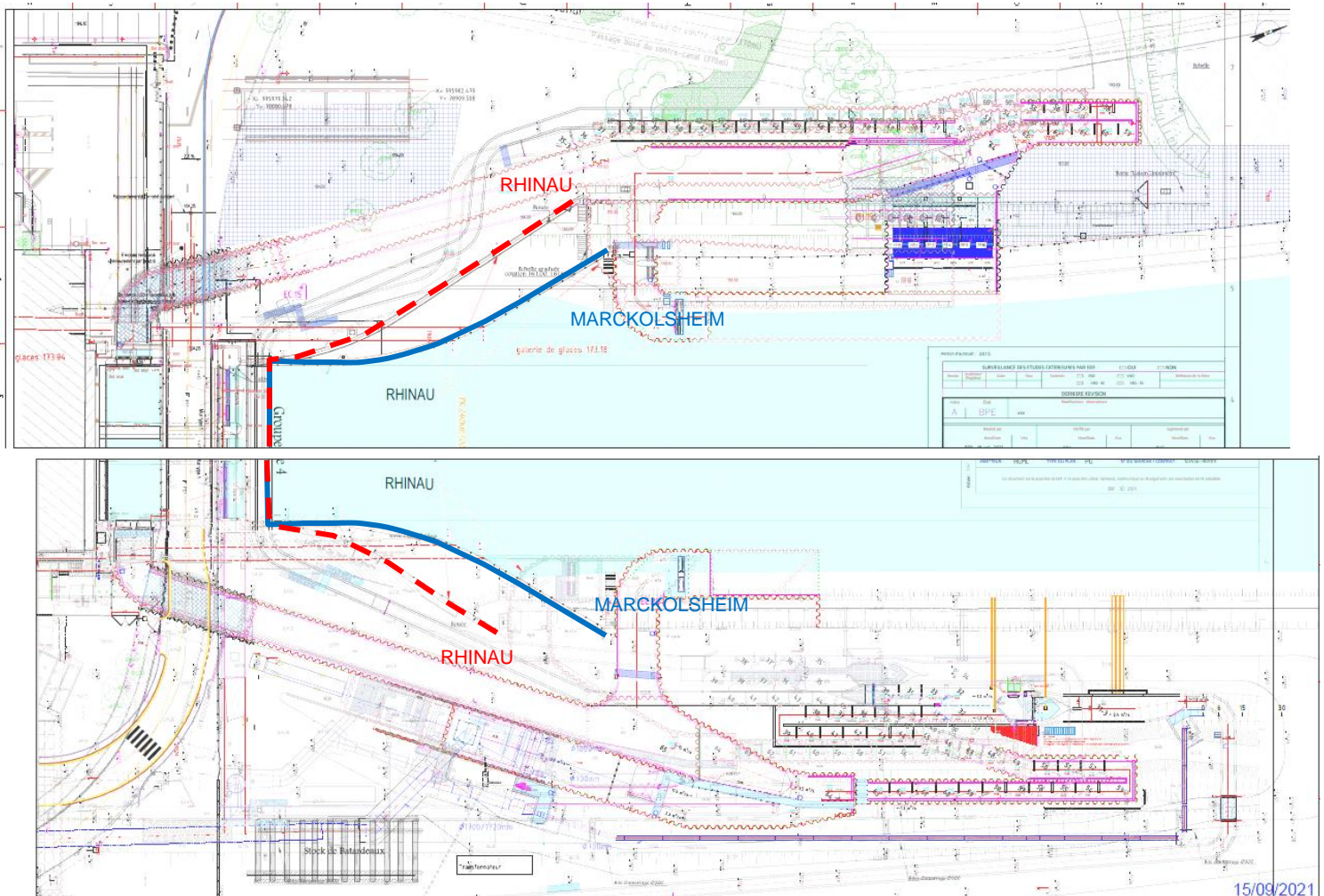


Figure 6 – Comparaison des élargissements des canaux de fuite de Rhinau et Marckolsheim

Le profil en long du radier de la partie élargie est également différent entre les deux usines.

Le graphe ci-après compare les deux profils en long après recalage altimétrique basé sur les niveaux haut et bas dans le canal de fuite. Le radier de Rhinau est un peu plus haut que celui de Marckolsheim en sortie d'aspirateur mais l'élargissement du canal de fuite étant moins long à Rhinau qu'à Marckolsheim, le canal de fuite de Rhinau est ensuite un peu plus profond que celui de Marckolsheim.

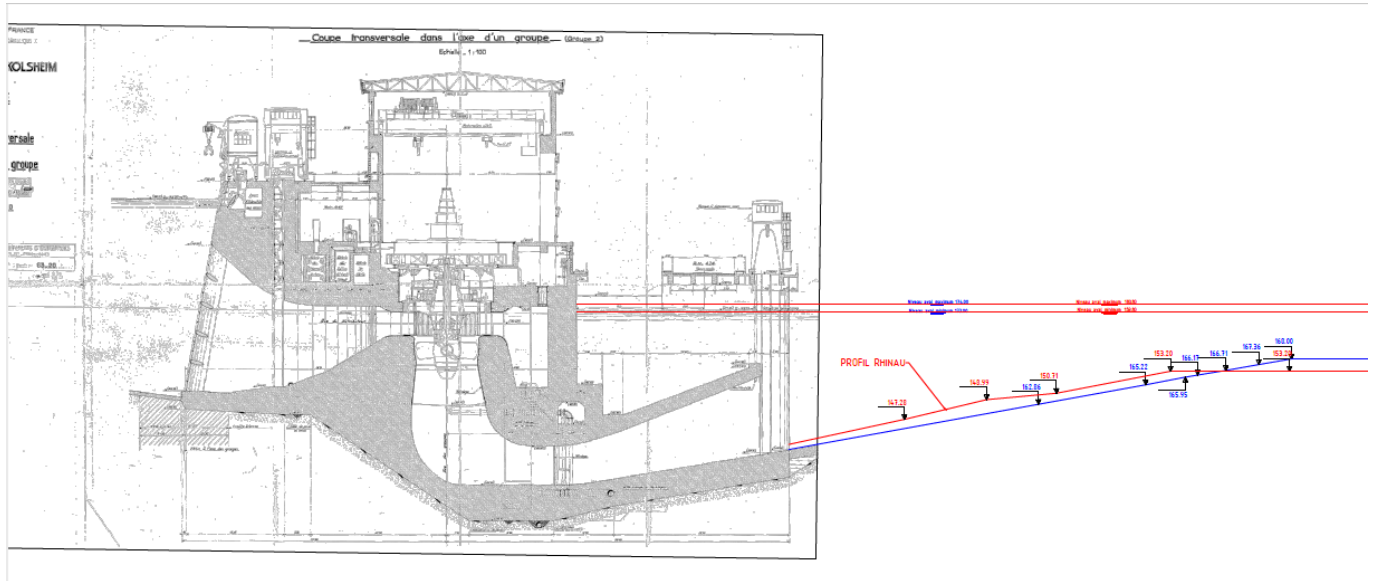


Figure 7 – Comparaison des radiers en sortie d'aspirateur à Rhinau et à Marckolsheim

En aval de l'élargissement, le canal de fuite présente également des différences de largeur entre les deux sites (147 m à Marckolsheim et 153 m à Rhinau), et aussi des différences en ce qui concerne le fruit des berges :

- à Marckolsheim, en rive droite, comme en rive gauche, le fruit est de 3:2 (3H pour 2V).
- à Rhinau, le fruit est de 3:2 en rive droite mais de 5:2 en rive gauche.

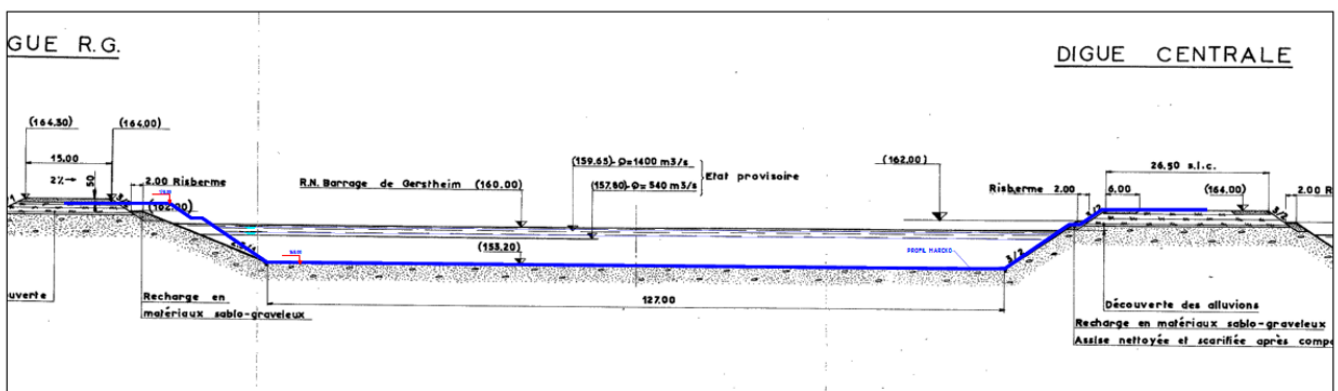


Figure 8 – Comparaison de profils transversaux des canaux de fuite de Rhinau et Marckolsheim

Les canaux d'amenée des usines de Rhinau et Marckolsheim ne présentent que des différences minimales.

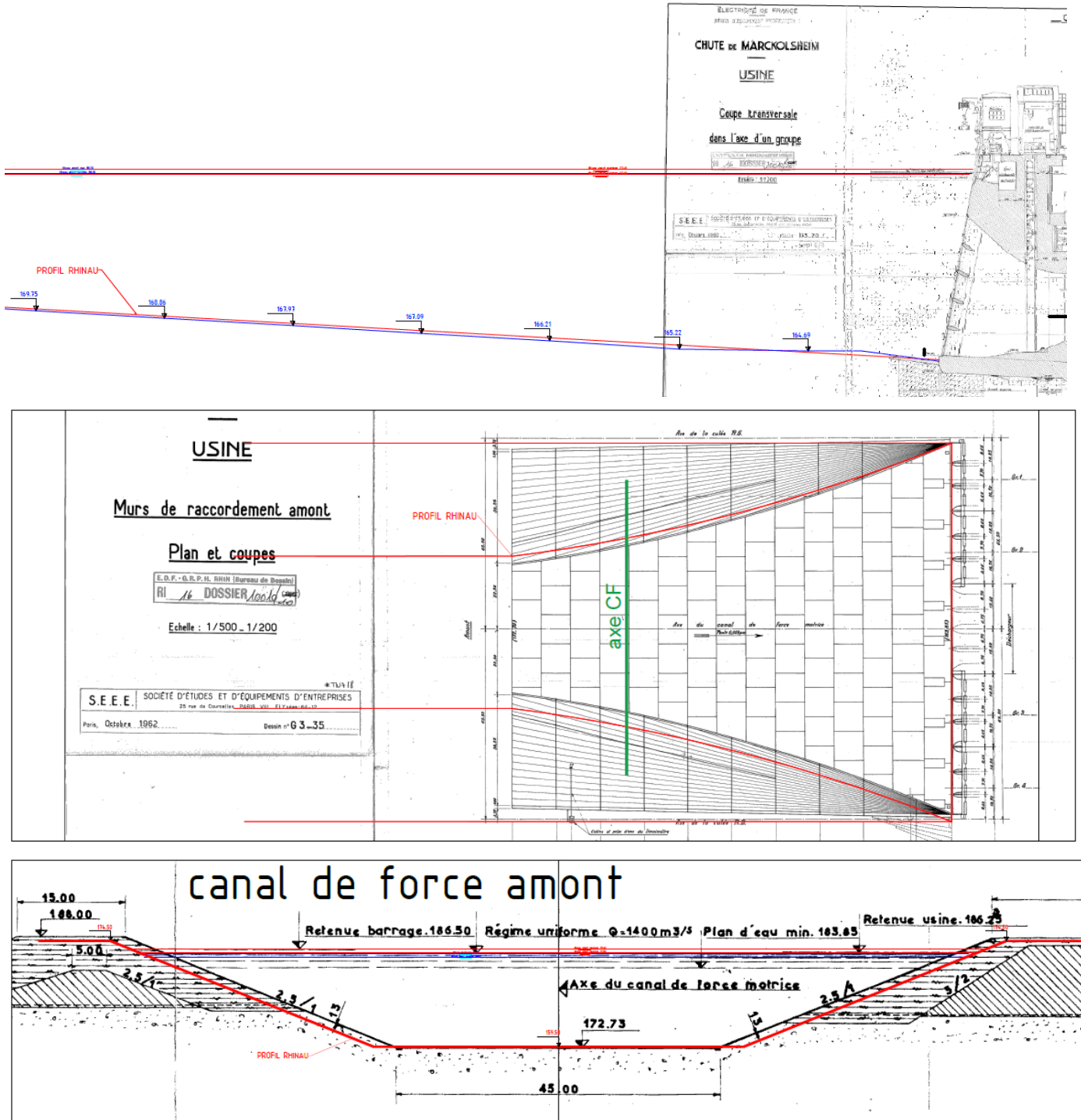


Figure 9 – Comparaisons longitudinale et transversale des canaux d'amenée des usines de Rhinau (rouge) et Marckolsheim (bleu ou fond de plan)



## 2.4 ESPECES MIGRATRICES A CONSIDERER

### 2.4.1 Analyse des passages à Gamsheim

Le saumon est l'espèce cible emblématique du Rhin, mais d'autres "grands migrateurs" (ou espèces amphihalines) pourront également accéder au futur ouvrage de Rhinau.

Année	Iffezheim Saumon	Iffezheim Truite de mer	Gamsheim Saumon	Gamsheim Truite de mer
2006	47	53	18	31
2007	62	115	27	89
2008	86	101	70	78
2009	52	66	46	91
2010	18	40	26	89
2011	50	68	47	71
2012	22	20	53	32
2013	4	19	23	45
2014	87	191	60	145
2015	228	69	152	65
<b>TOTAL</b>	<b>656</b>	<b>742</b>	<b>522</b>	<b>736</b>

Les 5 principales espèces en termes d'effectifs qui franchissent la passe de Gamsheim sont par ordre d'importance (chiffres basés sur les données de passage 2006 à 2013) :

- l'Anguille (141 308 individus depuis la mise en service du comptage – mai 2006)
- la Brème (58 153)
- le Barbeau (37 793)
- le Hotu (18 901)
- l'Aspe (12 409)

Les données des comptages réalisés à Gamsheim et Iffezheim (transmises par l'Association Saumon-Rhin), ainsi que les expérimentations menées en RFID confirment la présence de migrations saisonnières de poissons holobiotiques sur le Rhin.

Il est avéré que ces mouvements interviennent principalement lors de deux périodes : le printemps et l'automne ; l'échelle spatiale de ces mouvements est inconnue.

Les espèces de cyprinidés rhéophiles caractéristiques des eaux tempérées, comme le barbeau, le hotu ou l'aspe, montrent un comportement de migration printanière car ils ont besoin de zones de granulométrie favorable pour se reproduire.

Pour l'anguille, il est difficile de savoir à quel niveau du Rhin les individus vont stopper leur migration de colonisation, et entamer leur phase de croissance sédentaire.

### 2.4.2 Espèces cibles retenues

Compte tenu des données de comptage, les espèces cibles retenues sont les grands migrateurs amphihalins ainsi que les principales espèces holobiotiques du Rhin à savoir :

**le saumon atlantique, la truite de mer, l'aloise, la lamproie marine, l'anguille, la brème, le barbeau fluviatile, le hotu, et l'aspe.**



**Saumon atlantique**



**Truite de mer**



**Grande aloise**



**Lamproie marine**



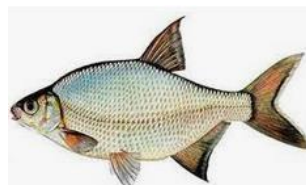
**Anguille européenne**



**Barbeau fluviatile**



**Hotu**



**Brème**



**Aspe**

**Figure 10 – Espèces cibles**

## 2.5 GAMME DE FONCTIONNEMENT

Par analogie avec les autres ouvrages du Rhin, on a retenu une gamme de fonctionnement des dispositifs, entre l'étiage et un débit de l'ordre de 2 fois le module.

**La gamme 500 m<sup>3</sup>/s – 2 000 m<sup>3</sup>/s couvre la plupart des situations dans les principales périodes de migration des espèces concernées.**

L'intensité migratoire est maximale entre mars et juillet mais la grande diversité d'espèces sur le Rhin implique des migrations possibles toute l'année hormis les périodes les plus froides (janvier/février).

Les débits 500 et 2 000 m<sup>3</sup>/s correspondent aux centiles 5 et 95 de la répartition annuelle des débits du Rhin à Bâle (cf. Figure 2).

## 2.6 NIVEAUX D'EAU

L'aménagement est équipé de capteurs d'exploitation indiquant les niveaux d'eau 132 m en amont de l'usine et 515 m en aval (en aval de la confluence entre le canal de restitution de l'usine et le canal éclusier mais en amont de la confluence avec le Rhin).

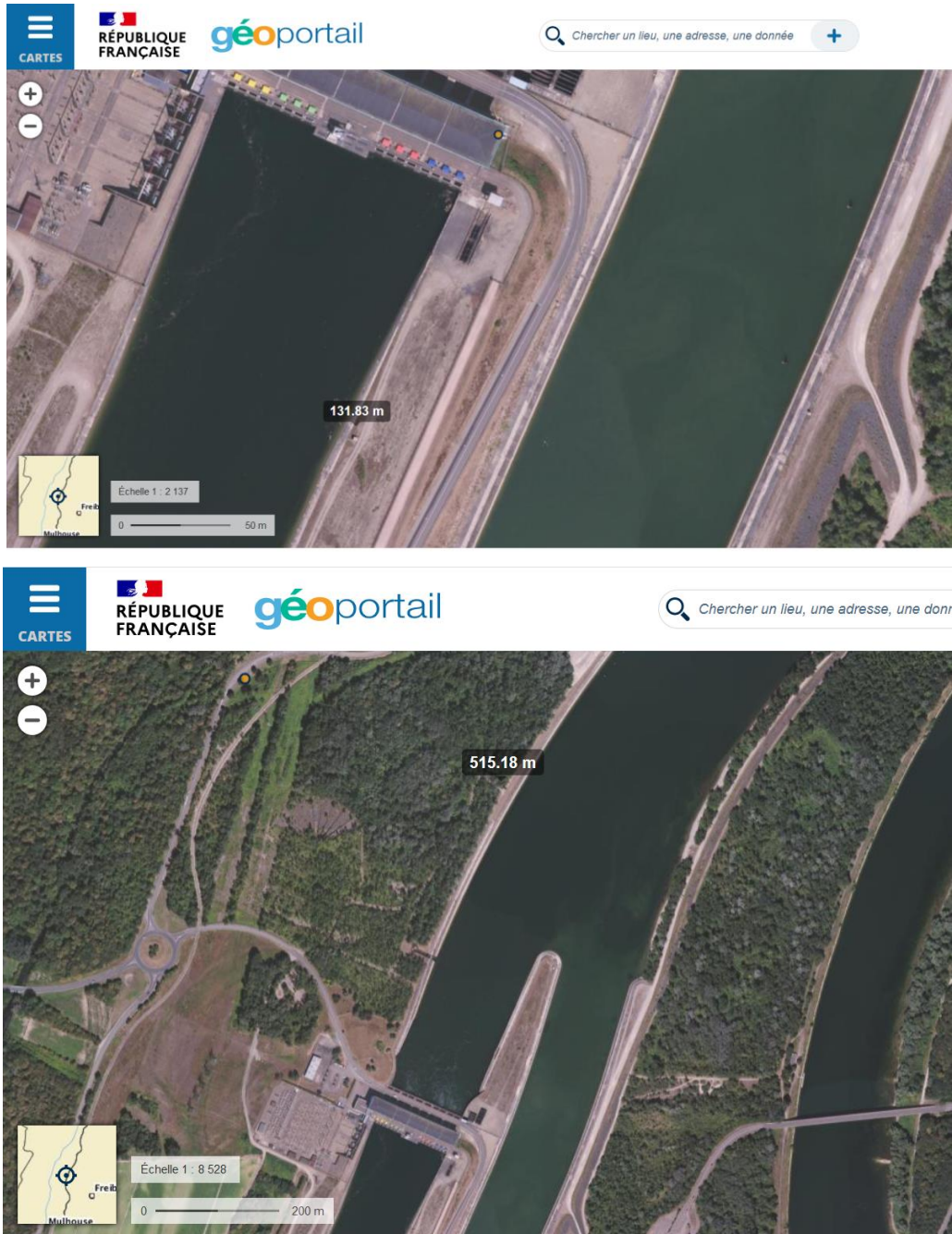


Figure 11 – Localisation des capteurs d'exploitation de l'usine (amont en haut et aval en bas)

Afin de compléter ces données, 5 sondes de niveau ont été installées début 2021 : 4 sondes en aval immédiat de l'usine à proximité des entrées potentielles du nouvel ouvrage de montaison, une 5ème 200 m en amont de l'usine (zone plus proche du futur ouvrage de migration).



Figure 12 – Localisation des sondes de mesure de niveau

### 2.6.1 En amont de l'usine

La sonde 5 en amont de l'usine a enregistré les niveaux dans le canal d'amenée, entre le 27 janvier 2021 et le 1<sup>er</sup> octobre 2021, avec une fréquence de 15 mn.

Durant cette période, les débits du Rhin ont évolué entre 230 et 3680 m<sup>3</sup>/s et les débits rencontrés dans le canal d'amenée de Marckolsheim, ont évolué entre 171 et 1781 m<sup>3</sup>/s (fonctionnement des vannes déchargeurs à l'usine).

Le graphe des enregistrements (cf. Figure 13) semble montrer que la valeur 186,5 NN est rarement dépassée en revanche, pour les niveaux bas, on constate une absence de données en-dessous de la cote 185,95 NN. Il s'agit d'un talon dû à un calage trop élevé de la sonde (cf. Figure 14).

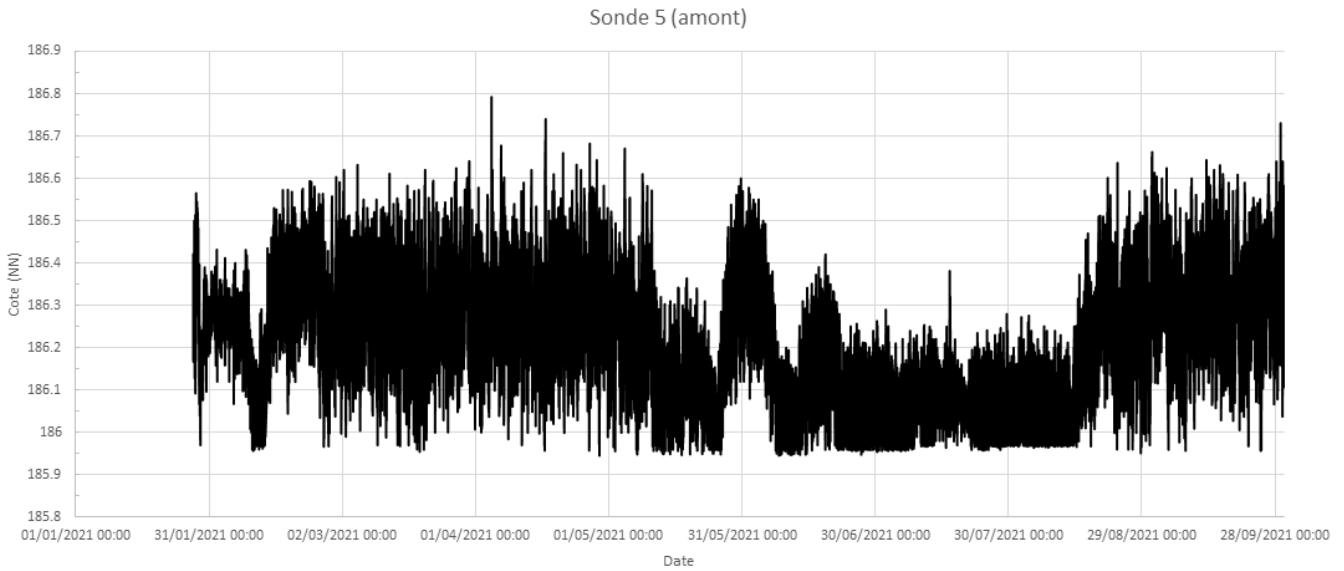


Figure 13 – Enregistrement des niveaux par la sonde amont

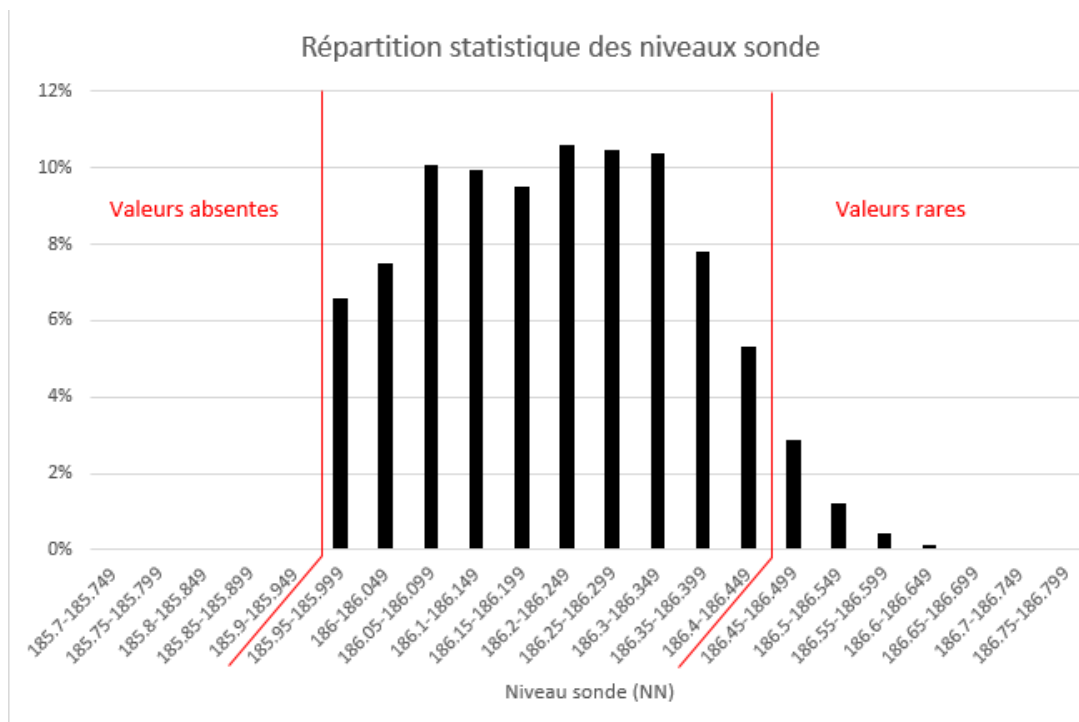


Figure 14 – Répartition statistique des niveaux sonde amont

Afin de mieux cerner les variations de niveaux bas, et pour bénéficier d'une plus longue chronique d'enregistrements, nous avons, en complément, exploité les données du capteur d'exploitation de l'usine.

Dans un premier temps, nous avons considéré la chronique 27 janvier – 1<sup>er</sup> octobre 2021. Le niveau le plus bas enregistré a été de 185,76 NN ce qui confirme bien que le niveau minimal peut être inférieur à la limite d'enregistrement de la sonde amont.

La Figure 15 présente l'écart médian entre le niveau fourni par le capteur d'exploitation et le niveau fourni par la sonde 5 en fonction du débit transitant dans le canal d'amenée (entre 500 et 1400 m<sup>3</sup>/s, par tranches de 50 m<sup>3</sup>/s).

On voit que l'écart est négatif, ce qui est logique puisque le capteur se situe en aval de la sonde, et nous constatons qu'en moyenne, il est de -2,5 cm, ce qui est négligeable.

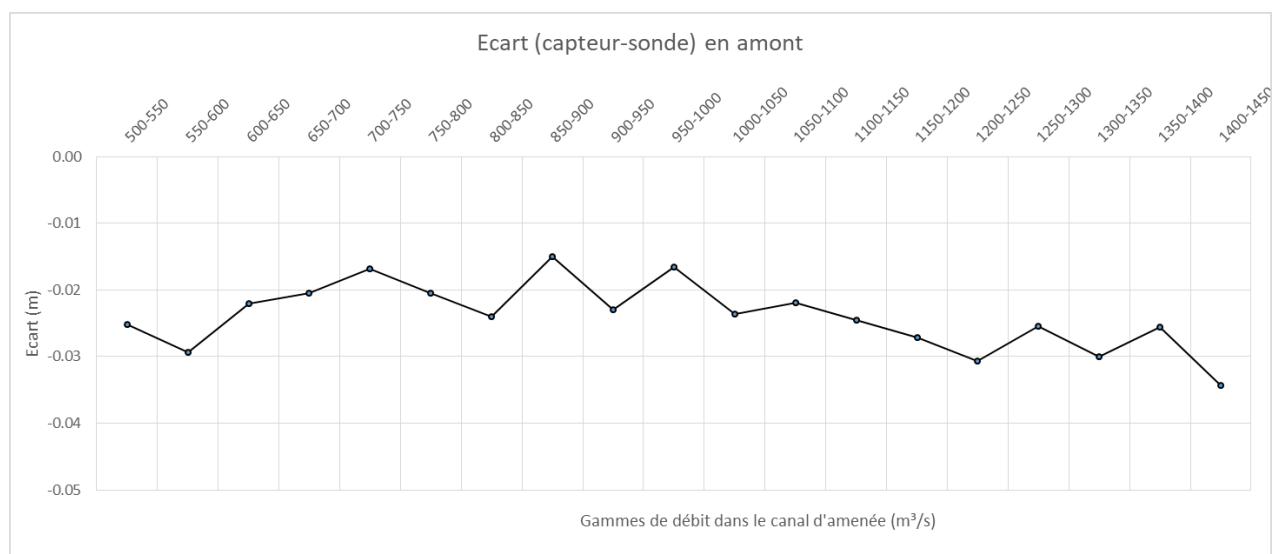


Figure 15 – Ecarts entre sonde et capteur amont

Dans un second temps, nous avons établi la répartition statistique des mesures du capteur d'exploitation sur la période 30 septembre 2015-30 septembre 2021, pour des débits de Rhin compris entre 500 et 2000 m<sup>3</sup>/s et en l'absence de fonctionnement des vannes déchargeurs.

Elle conduit aux centiles suivants :

C0%	185.22
C5%	186.12
C25%	186.22
C50%	186.29
C75%	186.36
C95%	186.45
C100%	186.71

L'intervalle C5%-C95% est de 186,12 – 186,45 NN.

Des évènements exceptionnels d'exploitation pouvant conduire à une augmentation du débit dans le canal d'amenée, il sera prudent de prendre une marge de sécurité sur le niveau bas (augmentation de la perte de charge dans le canal d'amenée).

En ce qui concerne les vitesses d'évolution de la cote dans le canal d'amenée, la répartition statistique du gradient d'évolution du niveau mesuré par la sonde sur 15 mn est la suivante :

Centiles	Gradient sonde en 15 mn (m)
C0	-0.54
C5	-0.19
C25	-0.07
C50	0
C75	0.07
C95	0.19
C100	0.59

Cette vitesse est la plupart du temps (intervalle 5%-95%) inférieure à +/-20 cm/15 mn.

En résumé, nous pouvons retenir, la répartition statistique suivante au niveau de la sonde amont :

Centiles	Niveau sonde (NN)
C0	185,25
C5	186,15
C25	186,25
C50	186,30
C75	186,40
C95	186,50
C100	186,70

**Au final, nous retenons donc 186,00 NN – 186,50 NN comme gamme de variation du niveau amont dans le cadre du fonctionnement de l'ouvrage de migration.**



## 2.6.2 En aval de l'usine

Les enregistrements des sondes réalisés en 2021 ne sont pas tous exploitables.

Certaines données sont manquantes (problème d'enregistrement) et d'autres ne sont pas valides (dérives des sondes, notamment la sonde 3 et la sonde 2).

Les périodes allant du 27/01/2021 au 02/03/2021 et du 23/04/2021 au 02/06/2021 semblent être les plus exploitables car les mesures des trois sondes y sont disponibles et que les débits du Rhin s'y étalent de 340 m<sup>3</sup>/s à 3448 m<sup>3</sup>/s.

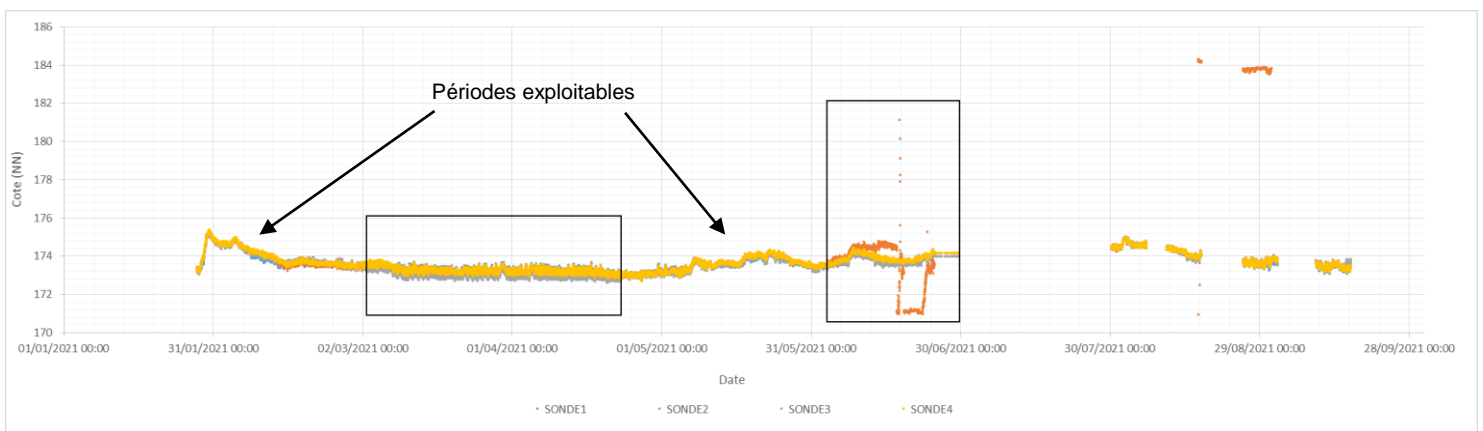


Figure 16 – Enregistrements des cotes aval par les sondes en 2021

L'étude statistique des mesures de niveaux, lorsque le débit du Rhin est compris entre 500 et 2000 m<sup>3</sup>/s et que les déchargeurs ne fonctionnent pas, mène aux résultats ci-après. Pour chaque sonde, la dispersion des cotes est donnée pour des gammes de débits d'amplitude 100 m<sup>3</sup>/s.

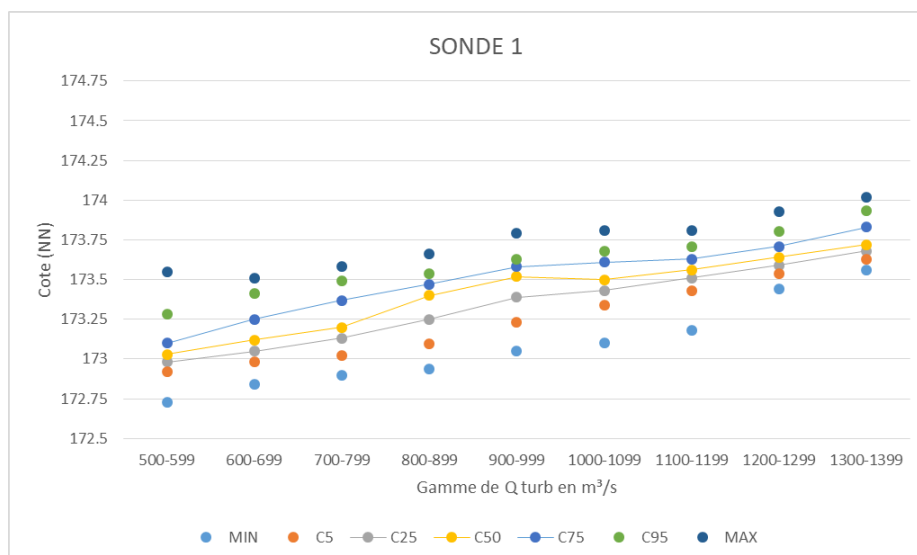




Figure 17 – Répartition statistique des niveaux aux sondes en fonction des débits turbinés

On constate que les cotes augmentent quand le débit augmente et que l'amplitude de la dispersion diminue également lorsque le débit augmente. Il peut s'agir d'un effet statistique lié aux nombres de mesures au sein de chaque gamme de débit.

En rive droite, les écarts de cote entre la sonde 2 (localisation potentielle d'une entrée piscicole au-dessus des turbines) et la sonde 1 (localisation potentielle d'une entrée de rive) sont faibles ( $\pm 10$  cm dans l'intervalle C5-C95). Cf. Figure 18

En rive gauche, ils sont un peu plus importants ( $\pm 20$  cm dans l'intervalle C5-C95, mais  $\pm 10$  cm dans l'intervalle C25-C75)

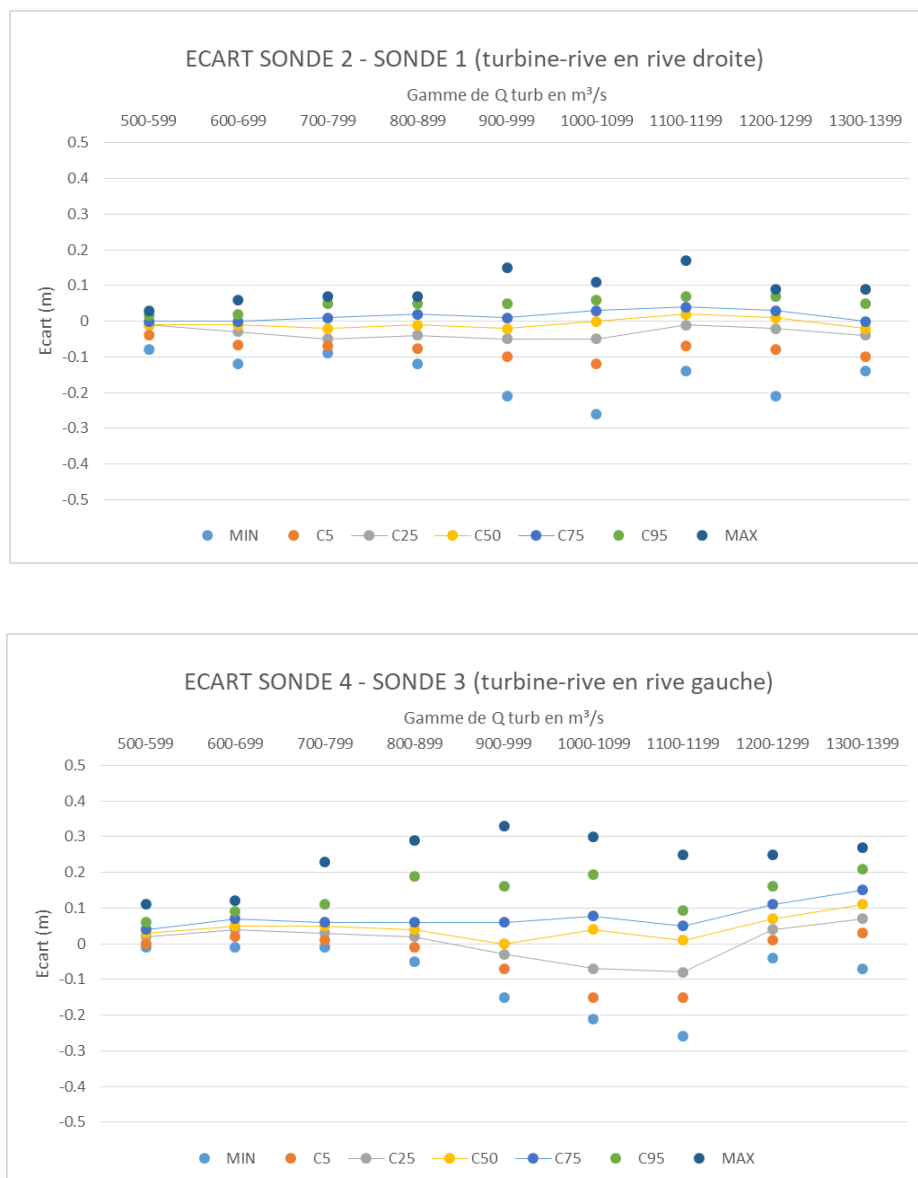


Figure 18 – Répartition statistique par rive des écarts de niveau entre la localisation turbine et la localisation rive en aval

Si l'on s'intéresse maintenant aux différences de niveaux au niveau des turbines entre la rive gauche et la rive droite, on constate qu'elles sont négligeables (la plupart du temps inférieures à 10 cm). Cf. Figure 19.

Au niveau des localisations potentielles des entrées aval, les écarts sont plus importants (ce qui peut poser la question de l'influence des mesures de la sonde 3) mais restent limités à environ +/- 10 cm dans l'intervalle C25-C75.

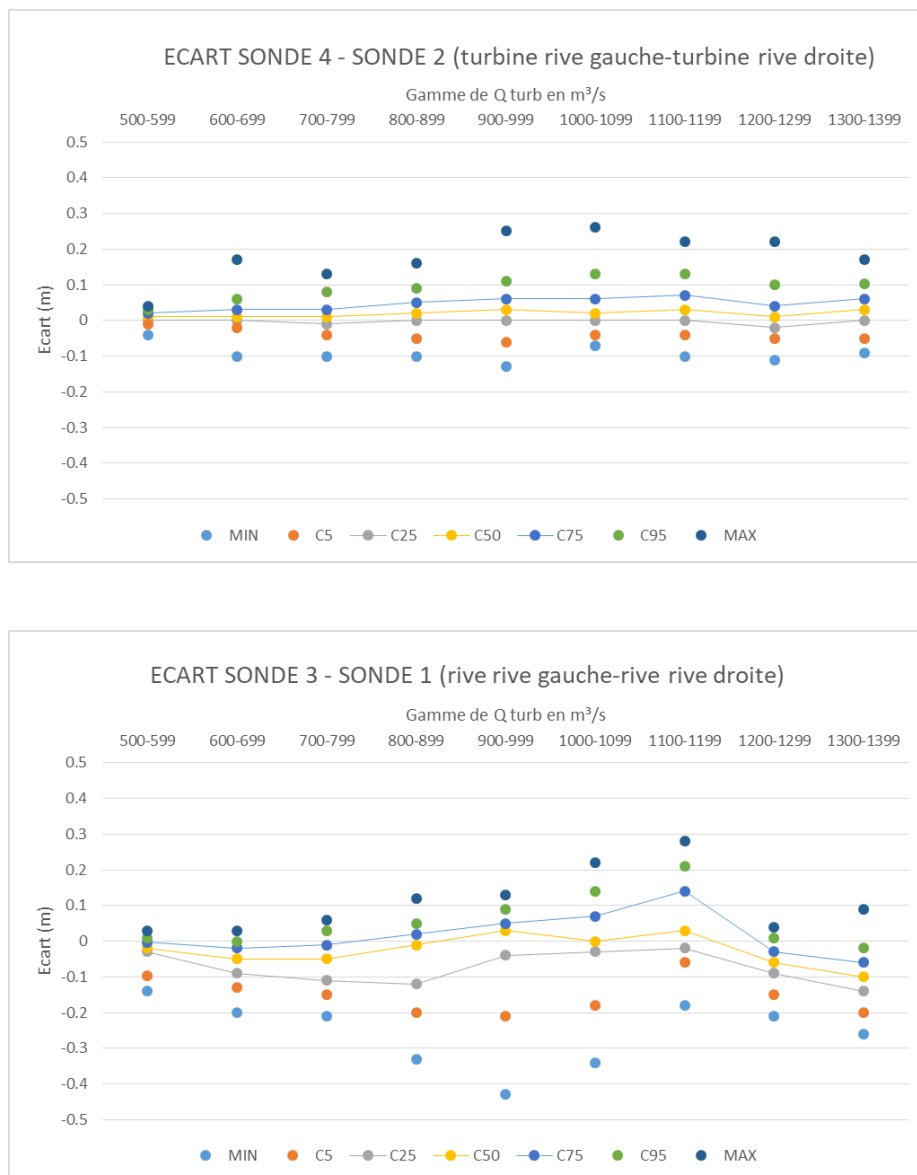


Figure 19 – Répartition statistique des écarts entre les deux rives, au niveau des turbines et plus en aval

Afin de mieux préciser les niveaux en aval de l'usine, nous avons utilisé une chronique plus longue de mesures issues du capteur aval d'exploitation de l'usine (entre le 1<sup>er</sup> janvier 2015 et le 17 juin 2021).

Nous avons d'abord étudié les écarts entre les mesures du capteur et celles de la sonde 1 sur les périodes allant du 27/01/2021 au 02/03/2021 et du 23/04/2021 au 02/06/2021.

La Figure 20 présente la répartition statistique des écarts en fonction du niveau mesuré par la sonde 1 (le manque de mesures pour les valeurs de niveau inférieures à 172,9 NN et supérieures à 174,9 NN rend l'évaluation statistique peu fiable).

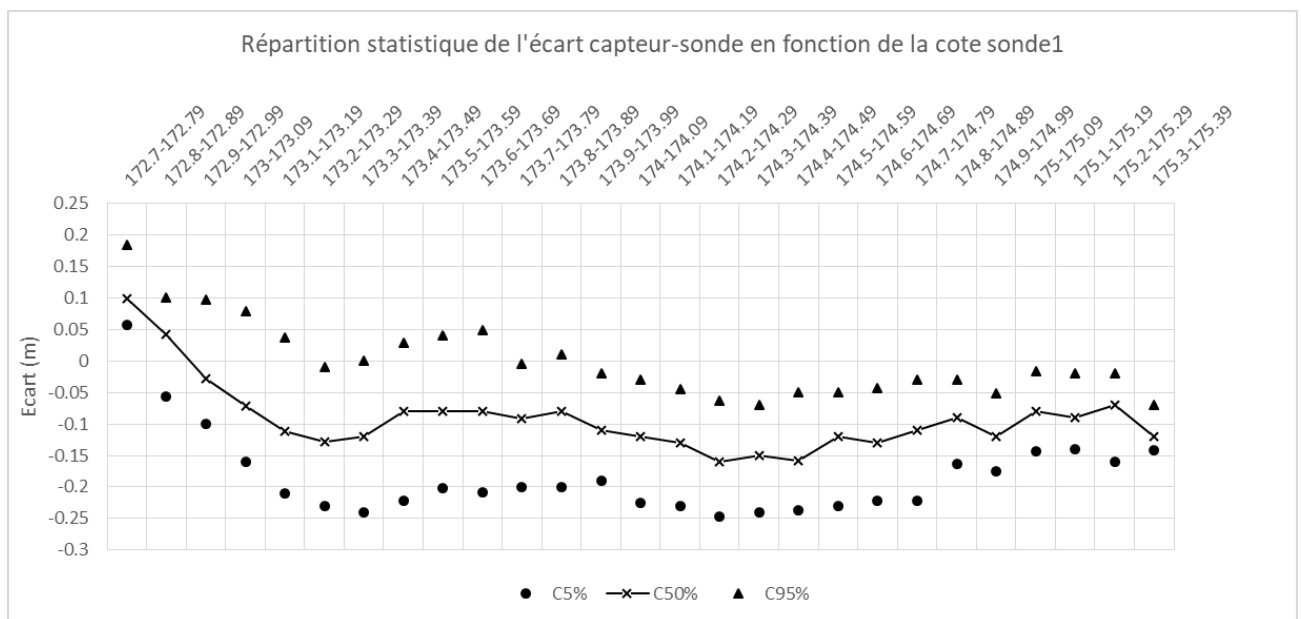


Figure 20 – Ecart entre sonde1 et capteur aval

Nous constatons que l'écart entre le capteur aval et la sonde 1 est relativement constant et d'environ -10 cm (le niveau est plus élevé à proximité de l'usine).

A partir de cet écart et de la chronique du capteur, nous pouvons reconstruire une chronique «sonde virtuelle » de niveaux à l'usine.

La répartition statistique des mesures du capteur d'exploitation sur la période 1<sup>er</sup> janvier 2015 - 17 juin 2021, conduit aux centiles suivants :

Centile	Capteur aval (NN)
0	172.36
0.05	173.00
0.25	173.19
0.5	173.38
0.75	173.55
0.95	173.85
1	174.82

Compte tenu de l'écart étudié ci-avant, l'intervalle C5%-C95% au niveau de l'usine est alors le suivant :  $(172,97+0,1) - (173,85+0,1)$ . Soit environ 173 – 174 NN.

La vitesse d'évolution du niveau dans le canal de restitution de la centrale est la plupart du temps (intervalle 5%-95%) inférieur à +/-10 cm/15 mn, ce qui est faible.

**Nous retiendrons donc pour l'ouvrage de migration :**

- **Bien que les écarts soient relativement faibles, par sécurité, des mesures de niveau aux emplacements des 4 sondes aval ;**
- **Un besoin d'asservissement des seuils des entrées piscicoles au niveau aval ;**
- **Par rive, l'asservissement se fera sur une valeur de niveau aval qui sera la moyenne des deux niveaux fournis par les deux sondes de la rive considérée ;**
- **Une gamme de variation de niveau aval comprise entre 173 NN et 174 NN.**

### 3. CONCEPTION GENERALE

#### 3.1 PRINCIPES DE BASE

La méthodologie utilisée pour attirer les poissons vers un ouvrage de migration se fonde sur le fait que les poissons, dans leur migration de montaison, nagent contre le courant et s'orientent par rapport aux écoulements dominants. De ce point de vue, **la restitution de l'usine est à privilégier.**

Localement, le positionnement des entrées piscicoles de l'ouvrage de montaison doit se faire en recherchant, dans l'environnement très agité de la sortie des turbines, des lieux où l'on peut générer un jet suffisamment stable et étendu pour être attractif donc perceptible par les poissons.

Une autre contrainte sur les rivières de l'envergure du Rhin, est de pouvoir collecter les poissons sur toute la largeur du cours d'eau (canaux de fuite de plus de 100 m de large). Cela impose, sauf cas particulier, **d'équiper les deux rives en entrées piscicoles**, car un jet d'entrée ne sera pas perçu sur l'autre rive.

De plus, sur une même rive, le retour d'expérience à l'échelle internationale et les suivis menés par RFID (téléométrie dite « passive ») sur les dispositifs de franchissement du Rhin montrent qu'il est indispensable de munir les ouvrages de **plusieurs entrées**. La plupart des espèces, et en particulier les grands salmonidés migrateurs, ont tendance à pénétrer dans les dispositifs par les entrées situées au droit des turbines, au plus près du point de blocage amont (Travade et al. 2013 ; Tétard et al. 2014 ; Tétard et al. 2020, ICEO, 2020). Par ailleurs, les différentes configurations de turbinage des centrales montrent une forte hétérogénéité d'écoulement dans le canal de fuite avec de fortes turbulences et vitesses d'écoulement en sortie des groupes (§ 3.3 et 3.5). Ces éléments plaident pour l'utilisation de plusieurs entrées avec un fonctionnement simultané ou alternatif en fonction des configurations rencontrées dans le canal de fuite.

Il est également indispensable de soutenir l'attractivité des entrées au moyen de **débits d'attrait complémentaires**.

Une fois "collectés", des ouvrages de liaison guident les poissons, éventuellement en franchissant une partie du dénivelé, vers un ouvrage commun (généralement là où se fait l'injection du débit d'attrait), à partir duquel se développe une passe à bassins successifs ou un ascenseur à poissons. Le retour d'expérience apporté par la bibliographie et les suivis biologiques menés sur le Rhin indique que la zone d'injection du débit d'attrait, difficile à négocier pour les poissons, nécessite une attention particulière pour son dimensionnement et son entretien (Travade et al. 2013 ; Tétard et al. 2014 ; Tétard et al. 2020, ICEO, 2020).

L'expérience de la construction des passes à poissons d'Iffezheim et Gambenheim, puis les observations et suivis menés sur ces aménagements, ont montré que les grands salmonidés migrateurs tendaient à s'approcher au plus près des usines (jusqu'aux aspirateurs) et que les entrées les plus à l'amont étaient nettement plus utilisées par les poissons.

Les poissons holobiotiques montrent également une préférence pour les entrées situées les plus en amont mais se répartissent davantage entre les entrées situées en berge et les entrées proches des turbines.

Les quatre centrales actuellement équipées d'Iffezheim à Gerstheim, présentent toutes une configuration avec des turbines de type bulbe, dont l'aspirateur s'étend de plusieurs mètres en aval de la centrale. La présence d'une dalle submergée continue au-dessus des aspirateurs ménage un espace plus calme, où un jet peut traverser la totalité du canal de fuite et collecter les poissons à partir d'un seul côté de l'usine. Ce concept a prouvé son efficacité sur les aménagements d'Iffezheim et Gamsheim, et a été étendu pour les projets de Strasbourg et Gerstheim.

Pour ces quatre aménagements, le débit global d'alimentation est de 16 m<sup>3</sup>/s au maximum (Iffezheim uniquement depuis l'ajout d'un cinquième groupe, les autres dispositifs étant alimentés par 15 m<sup>3</sup>/s au maximum), représentant entre 1 et 1,4% du débit maximum turbiné.

Par rapport aux autres centrales situées en aval, l'aménagement de Marckolsheim est de conception différente. Il est équipé de quatre turbines Kaplan, dont les pertuis sont séparés. De plus, **les déchargeurs de l'usine sont disposés en partie centrale** (entre les turbines 2 et 3) au lieu d'être en berge. La dalle sur les aspirateurs est plus enfoncée et surtout l'espace sur **la dalle est segmenté en une série d'alvéoles** empêchant l'établissement d'un jet transversal sur la largeur de l'usine à partir d'une entrée unique sur la berge.

La zone d'écoulement continu entre rive droite et rive gauche est reportée en aval de la restitution des turbines.

Cette configuration a nécessité de repenser la position des entrées de la passe.

### 3.2 ALIMENTATION EN DEBIT

Le débit dans un ouvrage de migration "doit être à l'échelle des débits du cours d'eau en période de migration".

On considère généralement que cela nécessite de le porter entre 1 et 5% des débits rentrant en compétition.

Cette proportion varie suivant la taille du cours d'eau, les contraintes du site, et selon que l'entrée du dispositif est plus ou moins bien placée.

Il faut considérer par ailleurs qu'il y a une taille minimale et une forme de jet qui lui assurent une meilleure persistance au sein de l'écoulement aval et donc une bonne perceptibilité par les poissons (par exemple un jet carré de 1 x 1 m).

Les critères utilisés aux USA sont de 3% du débit maximum et de 10% du débit d'étiage.

A titre d'exemple, on a reporté dans le tableau ci-dessous les débits des ouvrages EDF comportant plusieurs entrées :



Site	Module	Qmax turbiné	Débit total entrées	1 ou 2 rives de la centrale	% (Qmax – module)
Carbonne	110	140	3	2	2.1% - 2.7%
Châtellerault	110	100	3	2	3% - 2.7%
Golfech	400	540	8	1	1.5% - 2%
Mauzac	280	220	5	1	2.3% - 1.8%
Gambsheim	1100	1400	15	1	1.1% – 1.4%
Iffezheim	1100	1500	16	1	1.1% - 1.4%
Strasbourg	1100	1500	15	1	1% - 1.4%
Gerstheim	1100	1500	15	1	1% - 1.4%

NB : le pourcentage faible des centrales aval du Rhin est lié à la configuration particulièrement favorable de la dalle aspirateur, sur laquelle le jet provenant de l'entrée aval turbines peut se développer sur presque toute la largeur.

L'ordre de grandeur du débit total proposé pour Marckolsheim est de 20 à 30 m<sup>3</sup>/s (1,8 à 2,7% du module, 1,4 à 2,1% du débit maximal turbinable).

Nous verrons plus loin que compte tenu de la largeur du site, des écoulements turbulents et de l'absence de dalle aspirateur, du nombre d'entrées piscicoles à mettre en œuvre, et du dimensionnement de ces entrées, **la valeur de 30 m<sup>3</sup>/s est la plus adaptée.**

Pour amener ce débit, deux solutions sont envisageables :

- le turbinage de ce débit, prélevé en amont, au travers d'une microcentrale (comme à Iffezheim, Gambsheim et Strasbourg), sous une hauteur de chute d'environ 13 m ;
- le pompage de ce débit, prélevé dans le bief aval, sur une hauteur de relevage d'environ 1 m (comme à Gerstheim).

La faisabilité de l'implantation de ces solutions a été réalisée.

Pour le turbinage, seule la rive droite est envisageable, le positionnement en rive gauche étant trop contraint, d'une part par les ouvrages d'accès à la centrale et, d'autre part, par la présence du poste de transformation.

La solution de pompage est a priori réalisable sur les deux berges ; soit en aval des entrées de la passe (pour ne pas perturber le comportement des poissons à proximité de ces dernières), soit, pour la rive droite, de l'autre côté du talus qui sépare le canal de fuite de la partie navigation (impact sur la navigation à examiner).

Une solution mixte (pompage en rive gauche, turbinage en rive droite) est également possible et c'est celle-ci qui est retenue.

### 3.3 ÉTUDE PRELIMINAIRE DES ECOULEMENTS EN AMONT

Compte tenu des très faibles différences géométriques entre les canaux d'amenée des usines de Rhinau et Marckolsheim (Cf. §2.3), il a été estimé par EDF-CIH que les modélisations d'écoulement conduiraient à des résultats tout à fait comparables.

On se fondera donc sur les résultats de modélisation obtenus dans le cadre de l'étude de Rhinau.

Une enquête a également été réalisée auprès des exploitants afin de mieux caractériser le régime d'apport de corps flottants dans le canal d'amenée de l'usine.

Il apparaît que ces derniers sont particulièrement nombreux pour des débits de Rhin supérieurs à 1400 m<sup>3</sup>/s ce qui correspond à la saturation du Grand Canal d'Alsace et à des déversements dans le Vieux-Rhin.

L'usine de Marckolsheim étant la première usine en aval de la confluence Grand Canal d'Alsace-Vieux-Rhin, elle est soumise à un flux de corps flottants plus important.

L'exploitant a indiqué sur la photo de la Figure 21 les limites d'accumulation des corps flottants observées :



Figure 21 – Limites indicatives d'accumulation des corps flottants en amont de l'usine (trait 1 : quand un groupe de rive à l'arrêt ; trait 2 ; en général)

Nous tiendrons compte de ces données pour l'implantation des prises d'eau de l'ouvrage de migration.

### 3.4 ÉTUDE PRELIMINAIRE DES ECOULEMENTS EN AVAL

#### 3.4.1 Observations des écoulements

L'observation de l'écoulement en sortie d'usine réalisé le 2 août 2021, alors que les groupes étaient à saturation, montre que les macrostructures tourbillonnaires se développent nettement en aval des alvéoles sans toutefois dépasser la zone d'élargissement du canal de fuite.



Figure 22 – Vue aérienne zénithale de l'écoulement en aval de l'usine de Marckolsheim

#### 3.4.2 Courantologie de surface

Afin d'évaluer l'impact des différences géométriques sur la courantologie de surface en sortie d'usine, nous avons réalisé plusieurs campagnes de mesures LSPIV<sup>1</sup> à partir de vidéos d'écoulement prises par drones.

L'objectif de ces mesures est de comparer les conditions d'écoulement obtenues à Rhinau et à Marckolsheim, notamment pour les valeurs de débit turbiné les plus élevées, afin de valider la possibilité de transposition de la configuration de l'ouvrage de migration de Rhinau sur Marckolsheim.

Le premier survol drone a été effectué le 2 août 2021.

L'usine était à saturation et la vanne déchargeur 4 était également en fonctionnement.

<sup>1</sup> LSPIV = Large Scale Particle Image Velocimetry

Les conditions dans le canal de fuite de l'usine étaient donc plus sévères que les conditions normalement rencontrées par les poissons en montaison.

En l'absence d'ensemencement du canal de fuite, les résultats de la LSPIV n'ont pas permis d'obtenir des résultats utilisables à l'aval immédiat des groupes (cf. Figure 23).

En revanche, plus en aval, la LSPIV a montré que les vitesses maximales dans le canal de fuite de Marckolsheim étaient légèrement supérieures (2,7 m/s) à celles évaluées sur modèle physique à Rhinau (2,5 m/s pour 1400 m<sup>3</sup>/s turbinés).

Malgré cela l'écoulement se recentre rapidement vers l'aval avec des valeurs maximales à proximité de l'axe du canal et des vitesses plus faibles en berge.

Afin de voir si les poissons étaient en mesure de trouver des voies de progression le long des rives, une autre campagne de mesure a été réalisée le 5 octobre 2021. Compte tenu du débit du Rhin (600 m<sup>3</sup>/s), le groupe G4 a pu turbiner à saturation, le reste du débit ayant été réparti sur le G3 et le G2.

Un survol de détail de la bordure rivulaire droite a permis de réaliser une LSPIV plus ciblée.

Cette dernière montre qu'une bande d'environ 5 m depuis la rive est exploitable par les poissons (vitesses inférieures à 1,5 m/s environ). Elle va en s'affinant à mesure que l'on se rapproche de l'usine. (Cf. Figure 24)

Ces constatations nous confortent sur plusieurs points :

- A l'échelle de la largeur du canal de fuite, les turbulences et les vitesses sont importantes, comme à Rhinau, ce qui nécessite de prévoir des entrées piscicoles sur les deux rives car le jet issu d'une entrée de rive n'aurait aucune chance d'être attractif pour la rive opposée ;
- Des entrées au-dessus des groupes et plus en aval en rive sont également nécessaires compte tenu des vitesses d'écoulement maximales rencontrées dans la zone d'élargissement du canal de fuite pour les débits turbinés les plus forts ;
- Dans le canal de fuite, une bande rivulaire de vitesses moindres est exploitable par les poissons pour se rapprocher de l'usine. Cette bande va en s'affinant en se rapprochant des turbines ce qui milite pour concevoir des entrées qui permettent de « récupérer » les poissons le plus en aval possible.

**Pour toutes ces raisons, un ouvrage de montaison du type de celui envisagé à Rhinau semble adapté à Marckolsheim.**

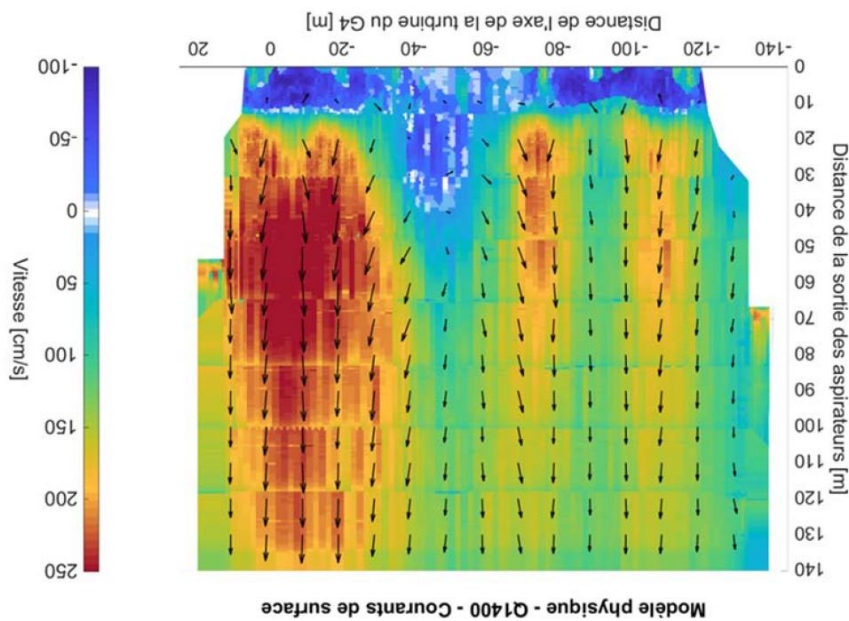
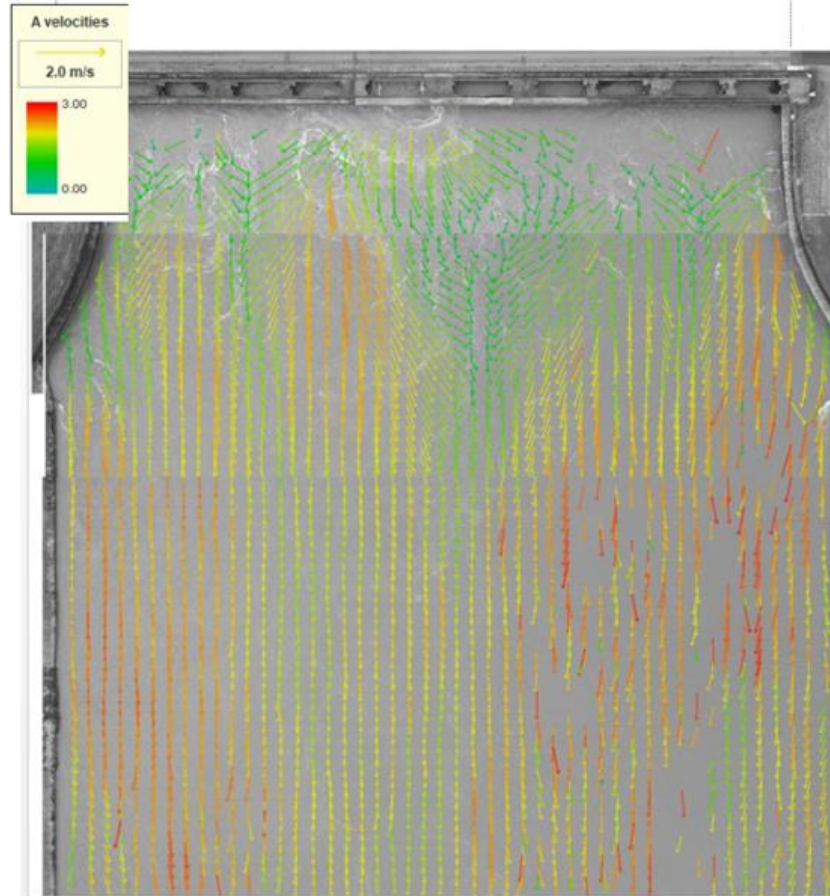


Figure 23 – Comparaison des vitesses dans le canal de fuite de Rhinau et(en bas, modèle physique) et de Marckolsheim (en haut, LSPIV) en situation de saturation de l'usine

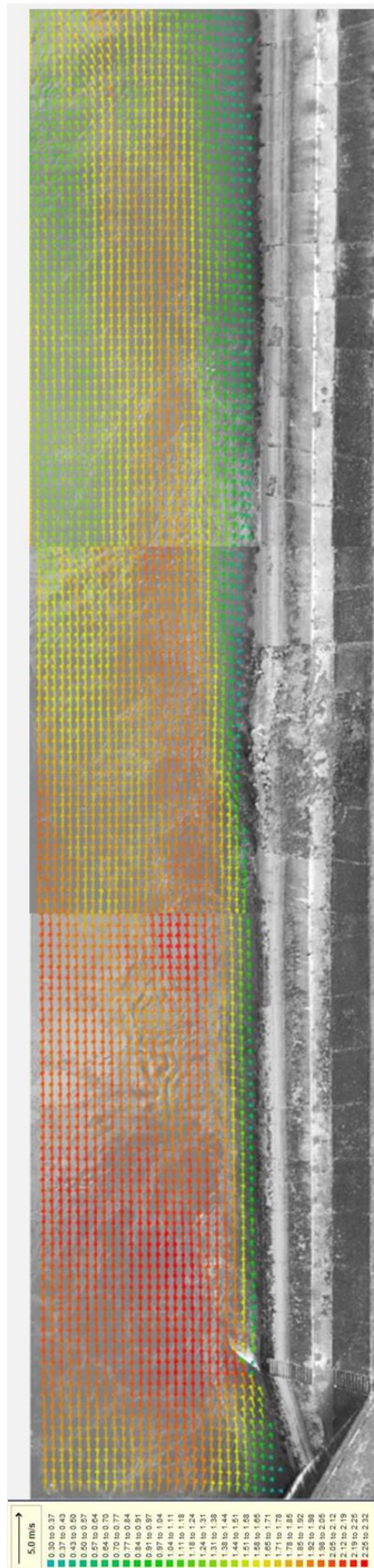


Figure 24 – Marckolsheim - courantologie de surface en rive droite (G3 et G4 à saturation)

ment est la propriété d'EDF.  
même partielle, est interdite sauf autorisation

### 3.5 CARACTERISATION DES ENTREES PISCICOLES

#### 3.5.1 Implantation théorique

A Marckolsheim, comme à Rhinau, les observations des écoulements mettent en évidence trois points essentiels :

- Une entrée située sur une rive ne peut pas attirer un poisson situé sur la rive opposée ;
- En amont de l'extrémité de la dalle-aspirateur, l'espace est segmenté par les déchargeurs de l'usine et les murs des alvéoles des groupes, elles-mêmes divisées en loges (2 loges par alvéole) ;
- La turbulence en sortie d'aspirateurs et les résultats des suivis biologiques imposent de positionner des entrées piscicoles en aval pour les poissons moins bons nageurs.

Les alvéoles sont par ailleurs le lieu d'écoulements perturbés car provoqués par les cellules turbulentes de surface (épanouissement pélagique du jet de sortie des aspirateurs).

Dans de telles conditions, il a paru intéressant, par analogie avec d'autres ouvrages existants (Carbonne sur la Garonne, Châtelleraut sur la Vienne, USA), d'envisager la création d'une galerie collectrice permettant de répartir plusieurs entrées piscicoles, au-dessus des groupes, sur toute la largeur du canal de restitution.



Vue des aspirateurs durant la construction de l'usine



Vue de face de l'aspirateur du G2, des cloisons intermédiaires et des déchargeurs



Vue des alvéoles et des cloisons intermédiaires entre la route et l'usine – vue du bajoyer des déchargeurs



Vue depuis l'aval des cloisons intermédiaires

**Figure 25 – Vue des aspirateurs, des alvéoles et des loges**

Pour ce faire, une fermeture des alvéoles par un mur aval et un percement des cloisons des alvéoles et des loges sera nécessaire. Les entrées piscicoles seront percées dans le mur de

fermeture. Une entrée sera soit en fonctionnement, soit fermée. En fonctionnement, elle délivrera 5 m<sup>3</sup>/s (valeur issue du compromis entre des critères de dimensionnement issus du programme life Aloses (la largeur des entrées 2,2 m, leur ennoisement aval 1,5 m, chute d'entrée maximale 30 cm) et le débit de montaison global par rive de 15 m<sup>3</sup>/s (environ 1% du débit turbiné maximum concurrent)).

En raison de l'impossibilité de franchir les déchargeurs centraux, une galerie collectrice mènera à la rive droite (au-dessus des groupes 3 et 4) et une autre à la rive gauche (au-dessus des groupes 2 et 1).

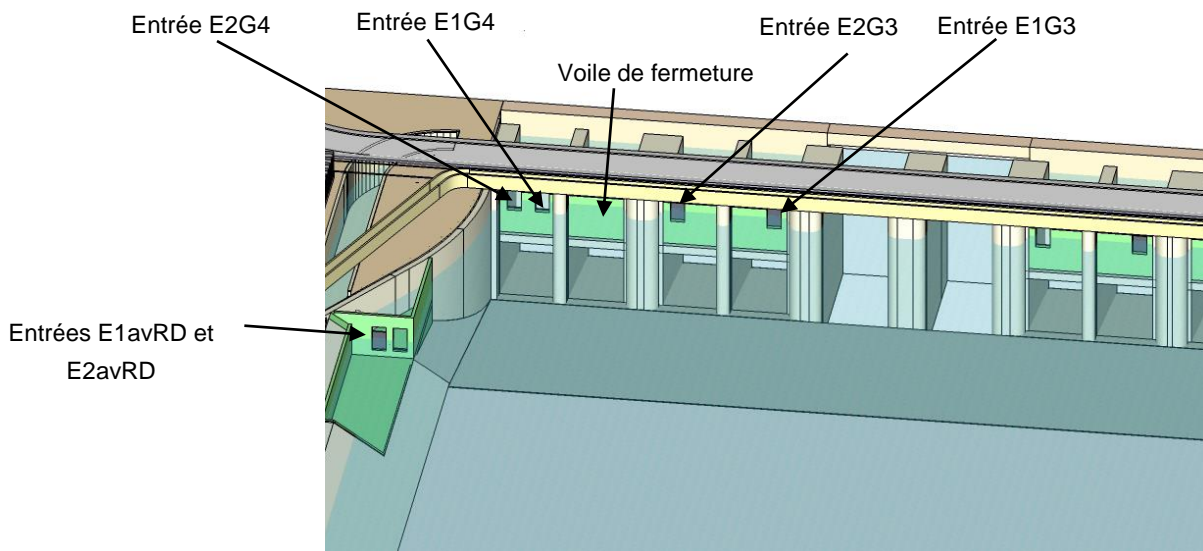
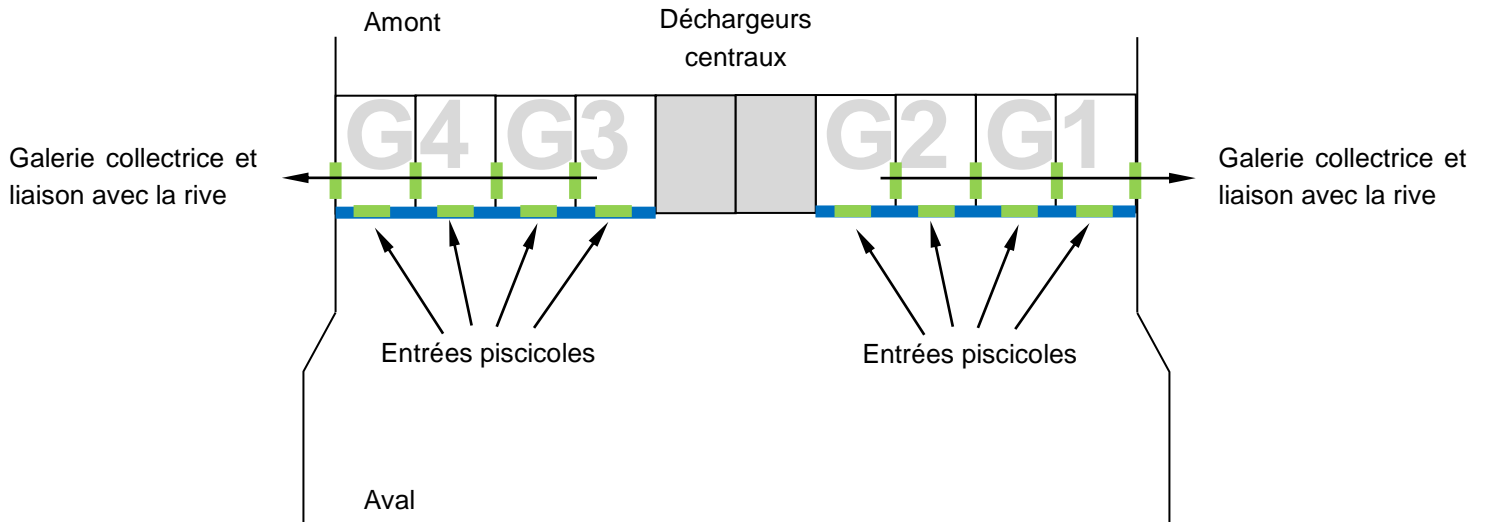


Figure 26 – Principe d'une galerie collectrice



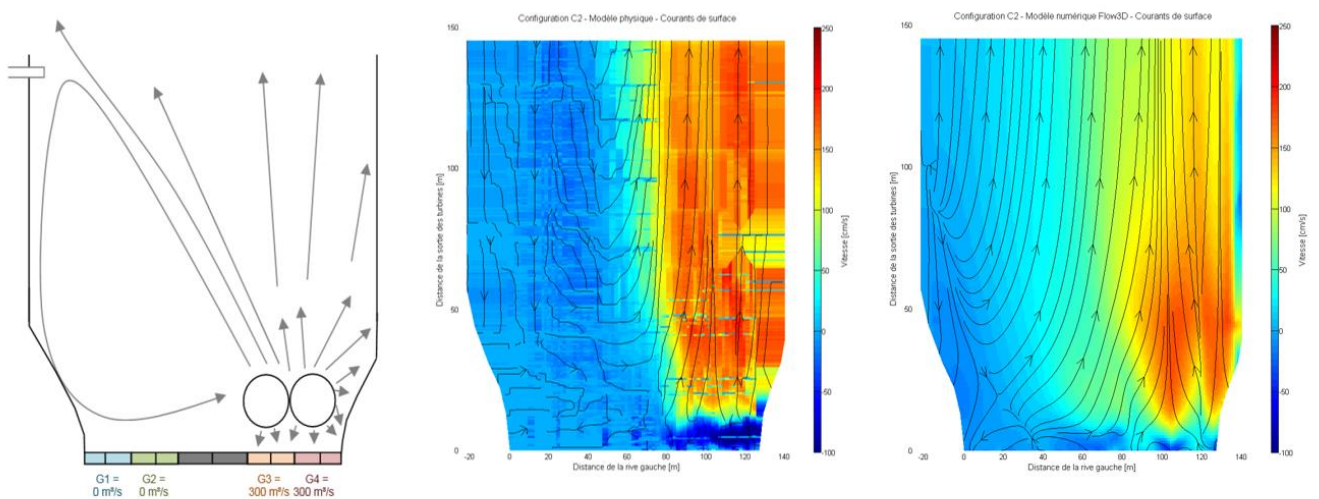
### 3.5.2 Etude sur modèles de Rhinau - EPFL

Afin d'affiner la configuration retenue pour les entrées piscicoles, des études complémentaires ont été menées, à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), à la fois sur modèle physique et sur modèle numérique (Code FLOW-3D).

Les modèles ont été calés par la recherche des macrostructures d'écoulement observées et par la comparaison des vitesses modélisées et mesurées sur site à partir de profils verticaux de vitesse mesurés à l'ADCP<sup>2</sup>.



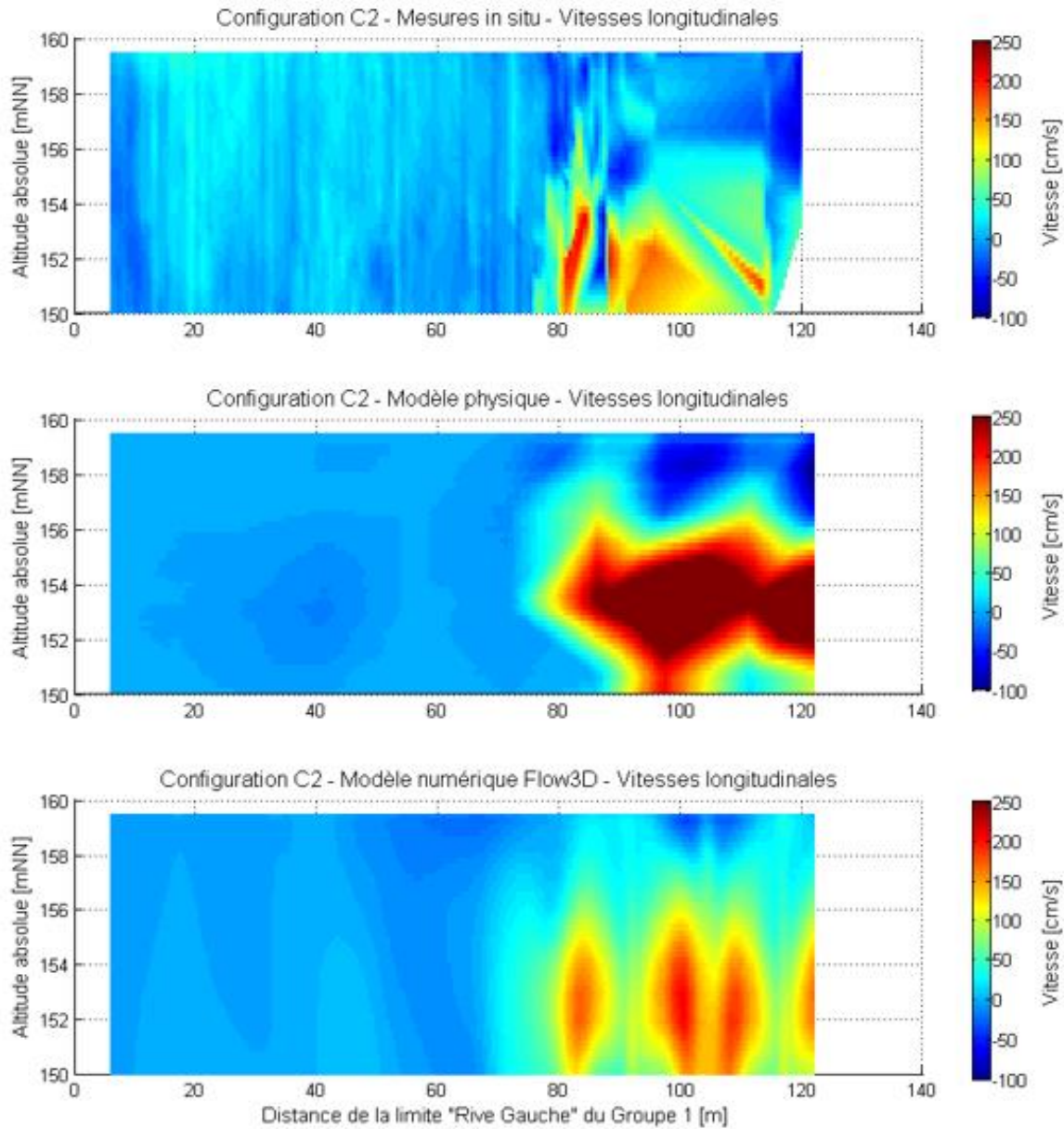
Figure 27 – Mesures de profils de vitesse en sortie des aspirateurs des turbines par mesure à l'ADCP



Configuration 2 – comparaison des courantologies de surface observée (gauche), mesurée sur modèle physique (centre) et simulée avec le modèle Flow3D (droite). Vitesses longitudinales ( $V_x$ ) de -100 (bleu) à 250cm/s (rouge).

Figure 28 – Macrostructures d'écoulement ; exemple de comparaison de résultats observés sur site et simulés à l'EPFL

<sup>2</sup> ADCP = Acoustic Doppler Current Profiler



*Profils à 3m de la sortie des aspirateurs. Haut : mesures in situ. Milieu : mesures modèle physique. Bas : simulation numérique, modèle Flow3D*

Figure 29 - Profils verticaux de vitesse ; exemple de comparaison de résultats observés sur site et simulés à l'EPFL

Plusieurs points ressortent de ces études sur modèles :

- Les résultats obtenus sur modèle physique et modèle numérique sont proches ;
- Il est bien nécessaire de positionner des entrées au-dessus des groupes et des entrées plus en aval sur les rives compte tenu du développement de structures turbulentes de surface environ 10 m en aval de l'extrémité des aspirateurs. Les jets issus des entrées de rives demeurent bien structurés, sur une longueur importante et ce, quel que soit le débit turbiné ;
- La meilleure configuration d'entrée de rive est la première initialement envisagée (parallèle au sein de l'écoulement) car elle constitue un abri hydraulique de grande dimension : elle permet aux poissons de « sortir » de la restitution de l'usine et de se retrouver dans une zone plus calme au sein de laquelle les jets de la passe sont nettement perceptibles ;
- Lorsque seule une des deux vannes de rive (accollées) est alimentée, il est préférable que ce soit celle qui est la plus proche du canal de fuite car son jet est mieux structuré ;
- Sur 9 configurations de turbinage différentes, les entrées au-dessus des groupes 1 et 4 ont une meilleure visibilité que les entrées au-dessus des groupes 2 et 3 en raison des zones plus calmes qui s'installent dans les élargissements du canal de restitution en aval des aspirateurs ;
- Le débit turbiné par un groupe conditionne fortement la portée du jet de l'entrée piscicole située au-dessus de lui. Pour un débit turbiné inférieur à 200 m<sup>3</sup>/s, le jet sortant d'une entrée reste structuré. Il l'est de moins en moins pour des débits supérieurs, 250 m<sup>3</sup>/s représentant un cas limite ;
- Les essais démontrent que le jet issu des entrées est nettement mieux formé avec une chute de 30 cm.



Figure 51: Entrées aval rive droite – Variante 2 : entrée inclinée à 90°. Etat final avec le mur amont pour empêcher le décollement du flux (1), le mur guideau allongé et affiné pour optimiser la répartition du débit sur les deux vannes (2), la 2<sup>ème</sup> modification de l'intérieur de la courbe en un pan (3) et la simplification de la transition « en sifflet » avec la rive à l'aval.

Figure 30 – Configuration d'entrée de rive retenue

### 3.5.3 Configuration finale proposée

Compte tenu des enseignements des modèles, la nécessité absolue d'entrée au-dessus des groupes G2 et G3 n'est pas démontrée. Par ailleurs, compte tenu des sujétions génie civil au-dessus de ces groupes, ces derniers ne seront pas munis d'entrées.

En complément, les modèles ont montré que les groupes G2 et G3 n'avaient qu'une faible influence sur les conditions hydrauliques au-dessus des groupes G1 et G4 ce qui permettra de gérer les entrées en fonction uniquement des débits des groupes G1 et G4 et du niveau dans le canal de restitution. En revanche, la gestion des entrées de chacune des rives sera indépendante de celle de l'autre rive.

Nous retiendrons de plus :

- Une entrée au-dessus du groupe de rive. Elle se compose de deux vannes de 2,2 m de large situées dans le mur de fermeture de la loge de rive ;
- Une entrée de rive située environ 60 m en aval de l'usine. Elle aussi se compose de deux vannes de 2,2 m de large. La configuration générale de cette entrée est parallèle à la berge ;
- Chaque vanne des entrées est, soit en fonctionnement, soit fermée. En fonctionnement, elle délivre 5 m<sup>3</sup>/s sous une chute de 30 cm et un ennoiment aval de 1,5 m. Cela permet une répartition modulable du débit de montaison total de 15 m<sup>3</sup>/s sur 3 vannes en fonction des configurations de turbinage de l'usine. Il y a donc systématiquement l'une des 4 vannes fermée dans cette configuration ;
- Un fonctionnement particulier restera possible : lorsque l'usine turbinera son débit maximum, la totalité des 15 m<sup>3</sup>/s pourra être délivrée par les deux vannes de l'entrée de rive. Chaque vanne délivrera alors 7,5 m<sup>3</sup>/s. Les deux vannes groupe seront alors fermées ;
- Les loges non utilisées pour l'implantation de l'entrée ne seront pas fermées.

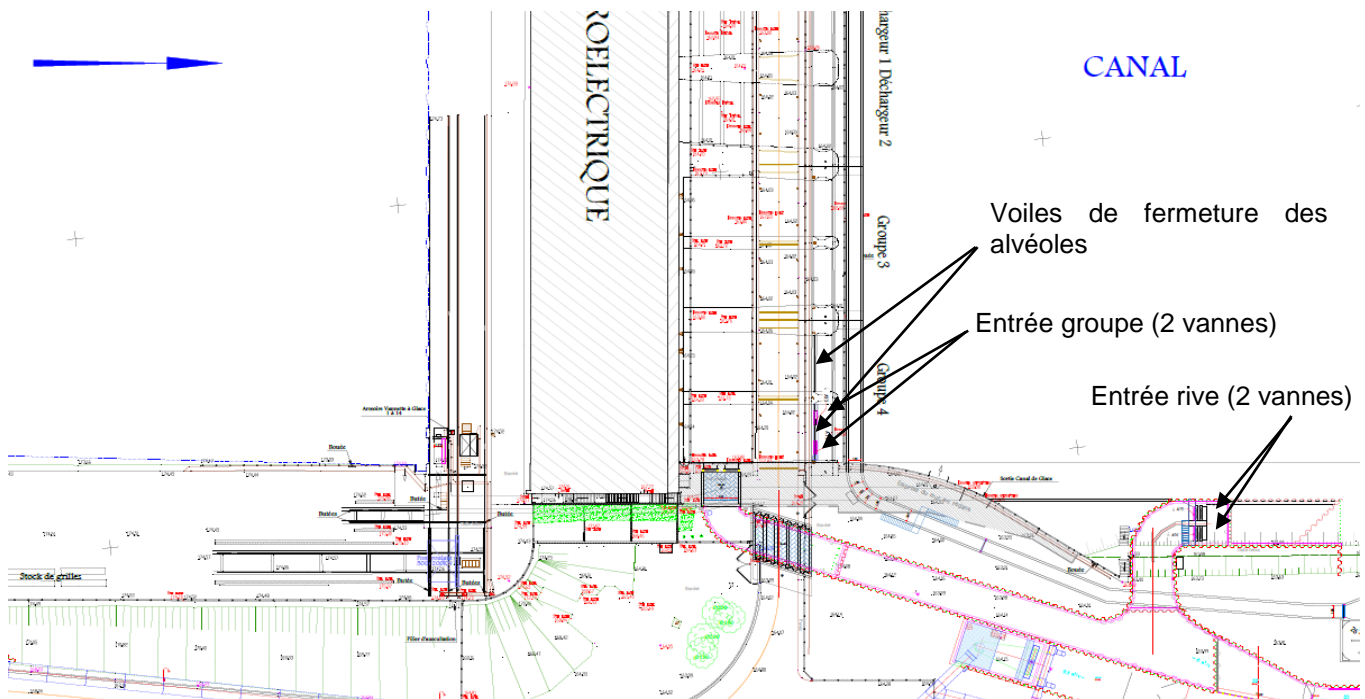


Figure 31 – Configuration finale des entrées rive droite

### 3.6 ANATOMIE DE L'OUVRAGE

L'ouvrage de montaison assurera quatre fonctions :

- Une fonction de **collecte** ; les poissons du canal de restitution de l'usine seront attirés par les jets issus des entrées piscicoles en rive et au-dessus des groupes, et ceci en rive droite et en rive gauche ;
- Une fonction de **transfert** ; compte tenu de l'emprise importante de l'ouvrage, dix canaux de transfert sont nécessaires pour regrouper les poissons depuis les entrées piscicoles, les amener à un même point de comptage (sur la rive droite), et, en optimisant, l'insertion topographique de l'ouvrage, contourner l'usine et regagner le canal d'amenée en amont ;
- Une fonction d'**élévation** ; le franchissement de l'aménagement hydroélectrique (~13 m) sera fractionné (6 m puis 7 m) et assuré par quatre passes à bassins (une en rive gauche, une en rive droite, une passe de transfert en rive droite et une en amont) ;
- Une fonction de **surveillance** ; un local de comptage vidéo permettra le dénombrement des poissons et la vérification de la fonctionnalité biologique de l'ouvrage ; à Rhinau, le local de comptage est inséré au milieu de l'ouvrage afin de différencier les poissons rive gauche et les poissons rive droite. Il n'a donc pas paru nécessaire de reconduire cette configuration à Marckolsheim afin d'éviter des hésitations inutiles pour le poisson. Le local de vidéo-comptage sera positionné à l'amont de la passe amont.

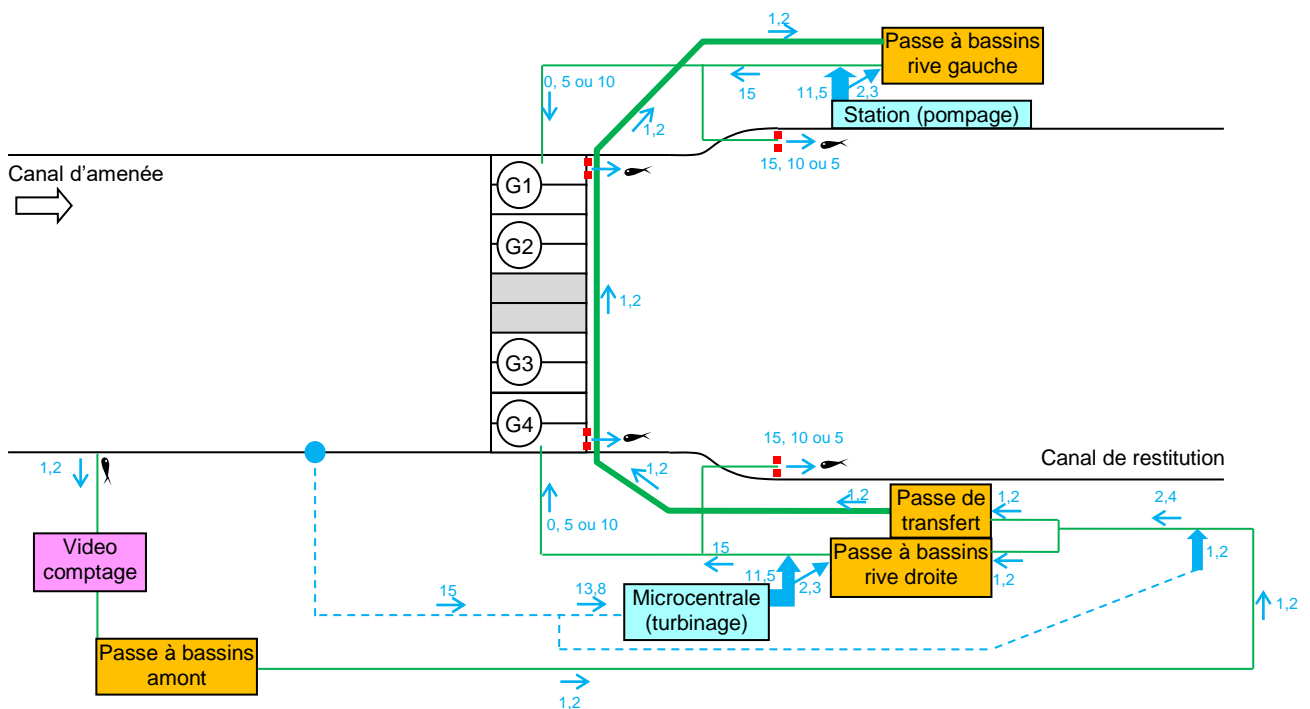


Figure 32 – Schéma fonctionnel de l'ouvrage de montaison de Marckolsheim

## 4. DIMENSIONNEMENT

### 4.1 PRINCIPES GENERAUX DE DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement de l'ouvrage de Marckolsheim est fait en exploitant au maximum le retour d'expérience acquis sur les passes à poissons d'Iffezheim, Gombsheim, Strasbourg, Gerstheim, Brisach et Kembs.

Cela conduit à préconiser :

- Une gamme de fonctionnement pour des débits du Rhin compris entre 500 et 2000 m<sup>3</sup>/s ;
- Un débit total par rive de 15 m<sup>3</sup>/s ;
- Des entrées piscicoles localisées à proximité des turbines et également en berge plus en aval et sur chaque rive ;
- Des fonctionnements et des dimensions d'entrées piscicoles adaptés aux espèces les plus exigeantes (notamment l'alose) ;
- Une souplesse dans l'utilisation des entrées en fonction des configurations de turbinage de l'usine ;
- Des galeries de liaison au sein de l'ouvrage adaptées à la progression des poissons (vitesses d'écoulement attractives mais non sollicitantes ; rugosités de fond pour aider à la progression) ;
- Une injection du débit d'attrait aux travers de grilles fines (pivotantes et se retournant à intervalles de temps réguliers pour assurer le décolmatage) et fractionnée pour mieux guider le poisson dans la suite de sa progression vers l'amont ;
- Des passes à bassins de débit nominal de l'ordre de 1,2 m<sup>3</sup>/s, à fentes profondes de 40 cm de large ; les radiers des bassins son munis de rugosités de fond de type « plots en semis » ;
- Un nombre limité de bassins de retournement dans les passes et un design adapté pour éviter les ascendances dans les coins des bassins et la création d'un « tube » de courant entre les fentes amont et aval ;
- Un local vidéo avec vitre de comptage munie d'un système mécanique de nettoyage, un rétroéclairage, une largeur de passage devant la vitre permettant d'avoir des vitesses d'écoulement de l'ordre de 1,2 à 1,3 m/s, une plaque de fond formant un petit seuil et de couleur claire pour faciliter le comptage des anguilles ;
- Une injection de débit complémentaire de 1,2 m<sup>3</sup>/s, au travers de grilles fines rotatives, pour alimenter la partie de l'ouvrage située en rive opposée ;
- Des changements de direction des canaux de liaison limitant les décollements et les zones de recirculation propices à la stagnation de certaines espèces ;
- Tout en amont, une entrée hydraulique (sortie piscicole) permettant une alimentation correcte en débit, sans formation de zones de recirculation, avec une bonne continuité des vitesses dans une gamme compatible avec la montaison des poissons ciblés et limitant l'entrée des corps flottants. En ce qui concerne ce dernier point, les masques de surface associés à des vitesses tangentielles relativement importantes (ordre de grandeur : supérieures à 50 cm/s) semblent la solution la plus appropriée ;
- Une vanne de condamnation amont munie d'une vannette permettant de maintenir un faible débit dans la passe pour éviter l'échouage des poissons lors de la vidange de l'ouvrage.

La présence du silure étant avérée sur le Rhin (comptages de Gamsheim et dénombrements subaquatiques dans le Vieux-Rhin) et compte tenu de la longueur importante des chenaux de liaison de l'ouvrage projeté, on ne peut pas exclure que l'ouvrage de montaison soit utilisé par le silure pour prédateur des poissons dans la passe.

Bien que des tentatives aient été menées pour limiter la venue du silure dans les ouvrages de migration (goulet anti-retour du chenal de transfert de Golfech sur la Garonne) aucune solution ne semble adaptée dans le cas de Marckolsheim.

## 4.2 RAPPELS SUR LES GAMMES DE FONCTIONNEMENT

L'ouvrage sera fonctionnel pour des débits de Rhin compris entre 500 et 2000 m<sup>3</sup>/s.

Pour cette gamme de débits, les niveaux statistiquement représentatifs :

- dans le canal d'amenée de l'usine, sont compris dans la gamme 186 – 186,5 NN ;
- dans le canal de restitution de l'usine, sont compris dans la gamme 173 – 174 NN.

En termes de fréquence, l'analyse des niveaux amont montre que la médiane correspond à la cote 186,3 NN ce qui signifie que le niveau du canal d'amenée est aussi souvent supérieur qu'inférieur à cette valeur.

Cette cote sera utilisée pour définir le fonctionnement nominal de l'ouvrage de montaison.

Une étude de sensibilité de l'ouvrage aux valeurs de niveaux hors gammes sera menée en complément.

En dehors de la gamme de débits de Rhin 500 - 2000 m<sup>3</sup>/s, l'ouvrage de migration ne sera pas en fonctionnement.

### 4.3 PREDIMENSIONNEMENT

Sur les ouvrages du Rhin, le débit nominal retenu est de 1,2 m<sup>3</sup>/s.

A ce débit, la profondeur moyenne dans les bassins des passes est de 1,8 m.

Afin de limiter les variations de hauteur d'eau dans l'ouvrage, cette même valeur a été retenue pour les écoulements dans les canaux de liaison de l'ouvrage.

L'ordre de grandeur de la vitesse d'écoulement retenue au sein des canaux est de 40 cm/s ce qui conduit à proposer des canaux de 1,8 m de large.

Les passes à bassins seront dimensionnées par analogie avec les autres passes du Rhin.

Pour une pente classique de passe à poissons sur le Rhin (5,7%) et en raison de la présence de rugosités de fond (densité proche de 10%), on peut retenir un coefficient de débitance des fentes de 0,8.

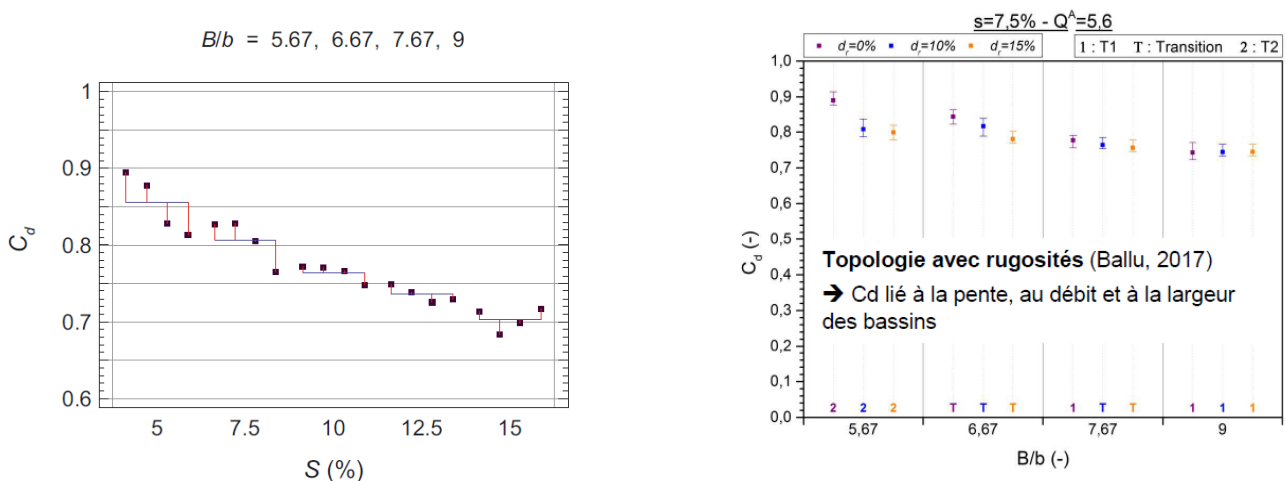


Figure 33 - Coefficient de débitance des fentes (Ballu, 2017 et Wang, 2010)

Compte tenu des espèces cibles, on souhaite obtenir des chutes de 20 cm au niveau des fentes. La largeur retenue pour les fentes est fixée à 40 cm (valeur qui convient également à l'alse).

#### 4.3.1 Evaluation des pertes de charge linéaires

Le terme d'énergie cinétique de l'écoulement sera alors faible :  $V^2/2g \sim 1$  cm.

Pour les canaux de liaison dont les parois sont en béton lisse, et le radier muni de macrorugosités profilées et largement espacées, nous estimons la perte de charge linéaire au moyen de la formule de Manning-Strickler avec un coefficient de 80 m<sup>1/3</sup>.s<sup>-1</sup>.

Elle est de 0,5 cm / 100 m, donc négligeable.



Pour les canaux de liaison dont les parois latérales verticales sont en palplanches (ondulations de 0,45 m d'amplitude sur une longueur de 0,6 m) et le fond en béton lisse, les études d'EDF R&D LNHE menées sur Gerstheim ont montré que l'on pouvait considérer un coefficient de frottement de Colebrook de 0,15. Dans le cas de Rhinau, ces canaux seront également munis sur le radier de macrorugosités profilées et largement espacées (écarts de 2 m) dont le frottement sera considéré comme négligeable.

Ces canaux seront présents en partie basse de l'ouvrage, zones où l'ouvrage est en déblai par rapport au terrain naturel. Compte tenu des hauteurs attendues dans ce secteur, et pour respecter le critère de vitesse d'écoulement proche de 40 cm/s, la largeur de ces canaux sera de l'ordre de 6 m.

Dans ces conditions, la perte de charge linéaire peut être estimée par la formule de Colebrook (périmètre mouillé = 2 x hauteur en eau).

Elle est de 3 cm / 100 m, donc négligeable compte tenu de la longueur maximale des linéaires de canaux considérés dans l'ouvrage (~ 80 m).

### 4.3.2 Evaluation des pertes de charge singulières

#### 4.3.2.1 Coudes

L'ensemble des coudes de l'ouvrage seront profilés pour éviter les décollements au niveau des parois.

On peut donc retenir un coefficient de perte de charge majorant de 0,3 pour les coudes.

Pour une vitesse d'écoulement de 40 cm/s, la perte de charge singulière par coude est de 0,2 cm.

#### 4.3.2.2 Local vidéo

La perte de charge observée sur la plupart des locaux vidéo est de l'ordre de 5 cm.

Nous retiendrons cette valeur pour le prédimensionnement et affinerons ultérieurement son calcul.

#### 4.3.2.3 Injections de débit

Compte tenu de la faiblesse des vitesses d'injection des débits d'attrait et complémentaire (35 cm/s), des vitesses d'écoulement dans les canaux (40 cm/s) et de l'optimisation hydraulique des injections, nous négligerons les pertes de charge singulières.

#### 4.3.2.4 Prégrille amont

Le canal de liaison amont sera muni d'une prégrille grossière (espacement interbarreaux de 30 cm) permettant de stopper les débris les plus importants qui auraient réussi à franchir la sortie piscicole.

La perte de charge de cette grille lorsqu'elle est propre est totalement négligeable ; elle peut toutefois aller jusqu'à 5 cm pour un colmatage de 50% (estimation par l'outil de calcul OFB).

#### 4.3.2.5 Sortie piscicole

La sortie piscicole est la jonction entre l'ouvrage de montaison et le canal d'amenée.

Elle sera munie d'un masque de surface posé sur le talus du canal d'amenée de façon à permettre le « glissement » des débris vers l'aval.

L'adduction d'eau nécessitera donc un passage sous le masque et ce avec changement de direction.

Par ailleurs, afin de limiter la longueur de passage souterrain sous la route longeant le canal d'amenée, un coude sera positionné pour orienter l'écoulement perpendiculairement à la route.

Par la suite, un nouveau changement de direction sera nécessaire pour que l'écoulement puisse longer le canal éclusier.

Tous les coudes seront profilés.

En première approche, on estime à 5 cm la perte de charge singulière due à ce dispositif

#### 4.3.3 Estimation de la répartition des débits entre la rive droite et la rive gauche

L'évaluation des pertes de charge nous permet de constater que les différences seront faibles entre les deux branches en aval du local vidéo ce qui devrait garantir une équirépartition des débits entre les deux branches.

## 4.4 DIMENSIONNEMENT

### 4.4.1 Procédure

Le dimensionnement d'un ouvrage de migration est un processus itératif. On détermine une première géométrie. On se donne un débit d'alimentation. On détermine les niveaux d'eau correspondant à ce débit dans la partie aval de l'ouvrage. Puis de proche en proche, en remontant vers l'amont et à la manière d'un calcul de ligne d'eau, on détermine les niveaux d'eau en différents points du système. Si la cote amont correspond à la condition limite amont que l'on se donne, le débit est conservé sinon il est modifié et le calcul est reconduit jusqu'à retrouver la bonne condition limite amont.

Une fois la ligne d'eau calculée, on s'assure de la compatibilité des conditions d'écoulement avec les capacités physiques des poissons.

Dans le cas contraire, la géométrie est revue.

Pour Rhinau, la géométrie est prédéterminée en s'inspirant des ouvrages déjà construits sur le Rhin.

A l'aide de ces prédimensionnements, il est possible de définir les débits d'alimentation.

Les lignes d'eau peuvent alors être calculées.

### 4.4.2 Alimentation en eau

L'alimentation en eau de l'ouvrage de migration est assurée :

- Par le débit de la passe amont depuis le canal d'amenée de l'usine sans régulation. Ce débit varie donc avec le niveau du canal d'amenée ;
- Par le débit complémentaire, dont la valeur varie en fonction de la cote en amont de la diffluence des deux bras de l'ouvrage. L'objectif est que chaque bras soit toujours alimenté par un débit de 1,2 m<sup>3</sup>/s ;
- Par les débits d'attrait de 13,8 m<sup>3</sup>/s pour chacune des rives. Ces débits sont constants.

Les variations de niveau dans le canal d'amenée de l'usine sont réparties de la sorte :

- Minimum : 185,25 NN
- Fractile 5% : 186,15 NN mais nous retenons 186 NN par sécurité
- Fractile 50% : 186,3 NN
- Fractile 95% : 186,5 NN
- Maximum : 186,7 NN

Une perte de charge de 15 cm peut être appliquée entre le canal d'amenée et l'amont de la passe amont afin d'évaluer le niveau d'eau en amont immédiat de la passe.

Dans un premier temps, on considère une passe à bassins de type « Gerstheim ». Les cloisons sont munies de fentes de 40 cm de large et les cloisons sont limitées à 2,3 m au-dessus du niveau du point bas de la fente. Pour les niveaux d'eau les plus élevés, la cloison peut éventuellement se comporter comme un seuil déversant.

Compte tenu de la hauteur de franchissement, la fente la plus amont de la passe amont ne subit pas d'influence aval. La chute y est donc toujours de 20 cm et la condition limite en aval de la passe n'a donc aucune influence sur le calcul des débits transitant dans l'ouvrage. Nous prendrons le niveau aval égal à 179,85 NN (justification ultérieure).

Pour une fente calée à la cote 184,25 NN, la modélisation Cassiopée conduit alors aux résultats suivants (cf. ANNEXE 1) :

Cote canal d'amenée (NN)	Cote amont passe (NN)	Débit passe (m <sup>3</sup> /s)	Hauteur d'eau max cloison amont (m)
185.25	185.1	0.539	0.85
186	185.85	1.014	1.5
186.3	186.15	1.204	1.9
186.5	186.35	1.332	2.1
186.7	186.55	1.458	2.3

Les résultats appellent deux réflexions :

- Seules les fentes débitent dans la gamme de fonctionnement de l'ouvrage ;
- Pour les niveaux les plus élevés, atteints de façon transitoire, le débit dans la passe amont sera de l'ordre de 1,5 m/s. La vitesse d'écoulement dans le canal de liaison sera alors de  $1,5 / 1,8 / (179,85 - 178,15) = 49$  cm/s. Ce qui est acceptable pour les poissons.

**En fonctionnement normal, le débit amont d'alimentation sera donc de 1,2 m<sup>3</sup>/s ± 0,2 m<sup>3</sup>/s environ.**

**Rarement, notamment lors de phénomènes instationnaires, il pourra descendre à 0,54 m<sup>3</sup>/s et monter à 1,46 m<sup>3</sup>/s.**

**En aval, le débit complémentaire s'ajustera pour obtenir un débit total de 2,4 m<sup>3</sup>/s qui se répartira en 1,2 m<sup>3</sup>/s par branche du local vidéo et donc par rive.**

**Le débit d'attrait étant constant et égal à 13,8 m<sup>3</sup>/s, l'alimentation des entrées piscicoles se fera avec un débit constant de 15 m<sup>3</sup>/s.**

#### 4.4.3 Détermination des lignes d'eau

La détermination se fait de l'aval vers l'amont.

##### 4.4.3.1 Entrées piscicoles

Par rive, les entrées piscicoles sont au nombre de quatre : deux au-dessus des groupes en berge, et deux en rive plus en aval.

Chaque sortie est soit en fonctionnement, soit fermée. Elle permet le transit d'un débit de 5 m<sup>3</sup>/s.

En fonctionnement nominal, trois sorties sur quatre seront en fonctionnement pour assurer l'évacuation du débit de 15 m<sup>3</sup>/s.

Elles sont munies d'une vanne asservie au niveau aval pour maintenir une chute d'entrée de 30 cm (valeur préconisée par le modèle physique EPFL). Toutefois, nous prévoyons que la valeur de la chute soit ajustable entre les valeurs 20 et 30 cm pour permettre une adaptation ultérieure en fonction des conditions d'écoulement réellement rencontrées.

La largeur de la vanne est de 2,2 m.

Bien que le niveau en aval puisse évoluer entre les cotes 173 et 174 NN, l'étude des enregistrements de cote montre que pour des débits turbinés inférieurs à 1400 m<sup>3</sup>/s, la cote aval est la plupart du temps inférieure à 173,7 NN.

On convient donc de dimensionner la course de la vanne asservie pour que cette dernière puisse maintenir des chutes de 20, 25 ou 30 cm pour des niveaux aval entre 173 et 173,7 NN.

Cela définit une course de vanne entre les cotes 171,3 et 172,3 NN. (Cf. tableaux ci-après)

Q=5 m<sup>3</sup>/s

Niveaux canal de restitution	Chute 20 cm	Chute 25 cm	Chute 30 cm
173	171.28	171.47	171.62
173.05	171.33	171.52	171.67
173.1	171.38	171.57	171.72
173.15	171.43	171.62	171.77
173.2	171.48	171.67	171.82
173.25	171.53	171.72	171.87
173.3	171.58	171.77	171.92
173.35	171.63	171.82	171.97
173.4	171.68	171.87	172.02
173.45	171.73	171.92	172.07
173.5	171.78	171.97	172.12
173.55	171.83	172.02	172.17
173.6	171.88	172.07	172.22
173.65	171.93	172.12	172.27
173.7	171.98	172.17	172.32
173.75	172.03	172.22	172.37
173.8	172.08	172.27	172.42
173.85	172.13	172.32	172.47
173.9	172.18	172.37	172.52
173.95	172.23	172.42	172.57
174	172.28	172.47	172.62

Pour les niveaux de forts turbinages à l'usine, un fonctionnement exceptionnel est possible.

Quand, dans le canal de restitution, les niveaux d'eau sont élevés (supérieurs à 173,7 NN) et que le débit du groupe de rive (G1 ou G4) dépasse une valeur seuil (autour de 300 m<sup>3</sup>/s), seules les deux entrées de rive sont ouvertes. Chacune de leurs vannes laisse alors transiter 7,5 m<sup>3</sup>/s.

Dans ce mode de fonctionnement, les hauteurs des chutes d'entrée seront de 25 ou 30 cm.

Q=7.5 m<sup>3</sup>/s

Niveaux canal de restitution	Chute 20 cm	Chute 25 cm	Chute 30 cm
173	170.45	170.7	170.9
173.05	170.5	170.75	170.95
173.1	170.55	170.8	171
173.15	170.6	170.85	171.05
173.2	170.65	170.9	171.1
173.25	170.7	170.95	171.15
173.3	170.75	171	171.2
173.35	170.8	171.05	171.25
173.4	170.85	171.1	171.3
173.45	170.9	171.15	171.35
173.5	170.95	171.2	171.4
173.55	171	171.25	171.45
173.6	171.05	171.3	171.5
173.65	171.1	171.35	171.55
173.7	171.15	171.4	171.6
173.75	171.2	171.45	171.65
173.8	171.25	171.5	171.7
173.85	171.3	171.55	171.75
173.9	171.35	171.6	171.8
173.95	171.4	171.65	171.85
174	171.45	171.7	171.9

Le fonctionnement proposé pour ces entrées est fondé sur les observations réalisées sur les modèles physiques et numériques de Rhinau par l'EPFL :

- Les deux rives fonctionnent de façon indépendante ;
- Quand sur une rive le débit du groupe de rive est strictement inférieur à une valeur Q<sub>seuil1</sub> (potentiellement entre 175 et 225 m<sup>3</sup>/s et que l'on prendra égale à 200 m<sup>3</sup>/s en première intention), les deux vannes au-dessus du groupe de rive sont ouvertes et une vanne aval est ouverte (de préférence celle qui est située côté canal de restitution mais suite aux observations in situ, ce pourrait être l'autre) ;
- Quand sur une rive le débit du groupe de rive est égal à la valeur Q<sub>seuil1</sub>. Une vanne au-dessus du groupe de rive est fermée (en première intention, la plus proche de la rive, mais suite aux observations in situ, ce pourrait être l'autre) et la seconde vanne aval est ouverte ;
- Quand sur une rive le débit du groupe de rive est compris entre la valeur Q<sub>seuil1</sub> et une seconde valeur seuil Q<sub>seuil2</sub> (potentiellement entre 275 et 325 m<sup>3</sup>/s et que l'on prendra égale à 300 m<sup>3</sup>/s en première intention), une vanne au-dessus du groupe de rive est fermée (en première intention, la plus proche de la rive, mais suite aux observations in situ, ce pourrait être l'autre) et la seconde vanne aval est ouverte ;
- Quand sur une rive le débit du groupe de rive est supérieur à la valeur seuil Q<sub>seuil2</sub>, on regarde la cote dans le canal de restitution :

- Si cette cote est inférieure à 173,7 NN, une vanne au-dessus du groupe de rive est fermée (en première intention, la plus proche de la rive, mais suite aux observations in situ, ce pourrait être l'autre) et la seconde vanne aval est ouverte ;
- Si cette cote est supérieure à 173,7 NN, les vannes au-dessus du groupe de rive sont fermées et les vannes aval sont ouvertes. La totalité des 15 m<sup>3</sup>/s transite par les vannes aval.

En dehors de la plage de fonctionnement de l'ouvrage de migration, les entrées seront fermées par une vanne de condamnation située en aval de la vanne de réglage. Une exception sera faite sur les entrées aval de la rive droite en cas de fonctionnement de la microcentrale de turbinage du débit d'attrait.

#### 4.4.3.2 Canaux d'alimentation des entrées piscicoles

Le canal d'alimentation des entrées situées au-dessus des groupes a un radier coté à 170,2 NN. Il mesure 5,5 m de largeur.

Le canal d'alimentation des entrées de rive a un radier coté à 169,6 NN et une largeur de 6 m.

Les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement dans les canaux sont indiquées dans les tableaux ci-après.

	Débit 5 m <sup>3</sup> /s							
	Canal entrées groupe				Canal entrées rive			
Niveau mini (173 + 0,2 = 173,2 NN)	Hauteur	3.0 m	Vitesse	30 cm/s	Hauteur	3.6 m	Vitesse	23 cm/s
Niveau maxi (174 + 0,3 = 174,3 NN)	Hauteur	4.1 m	Vitesse	22 cm/s	Hauteur	4.7 m	Vitesse	18 cm/s

	Débit 10 m <sup>3</sup> /s							
	Canal entrées groupe				Canal entrées rive			
Niveau mini (173 + 0,2 = 173,2 NN)	Hauteur	3.0 m	Vitesse	60 cm/s	Hauteur	3.6 m	Vitesse	46 cm/s
Niveau maxi (174 + 0,3 = 174,3 NN)	Hauteur	4.1 m	Vitesse	44 cm/s	Hauteur	4.7 m	Vitesse	35 cm/s

	Débit 15 m <sup>3</sup> /s							
	Canal entrées rive							
Niveau mini (173,7 + 0,2 = 173,9 NN)					Hauteur	4.3 m	Vitesse	58 cm/s
Niveau maxi (174 + 0,3 = 174,3 NN)					Hauteur	4.7 m	Vitesse	53 cm/s

Les canaux seront munis de macrorugosités de fond (cylindres de diamètre 40 cm et de hauteur 20 cm) dont le motif est indiqué ci-après. Le nombre des macrorugosités sera à adapter en fonction de la largeur des canaux.

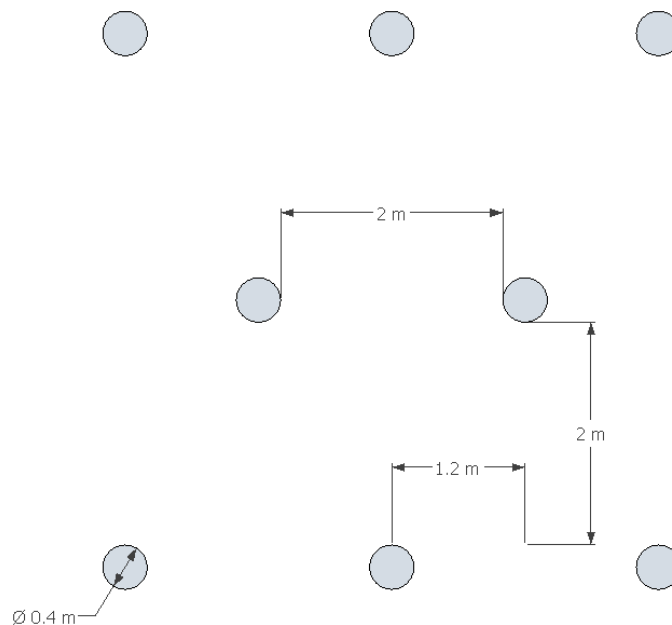


Figure 34 – Macro-rugosités de fond dans les canaux



#### 4.4.3.3 Injection du débit d'attrait rive droite

La valeur du débit d'attrait sera constante et égale à 13,8 m<sup>3</sup>/s.

Afin d'améliorer le guidage des poissons, l'injection sera fractionnée et se fera au travers de deux grilles fines d'espacement entre barreaux 20 mm.

La première grille se situera dans le bassin de répartition du débit d'attrait.

Les niveaux d'eau dans ce bassin évolueront entre 173,2 et 174,3 NN.

Le pied de grille sera calé à 170,2 NN.

La grille comportera une partie fixe de 20 cm de haut. Au-dessus une partie mobile (retournable, par panneaux, pour assurer le nettoyage) s'étendra de la cote 170,4 à la cote 174,4 NN minimum.

Afin de garantir une vitesse d'injection inférieure à 35 cm/s, même si la partie fixe est totalement colmatée, la grille mesurera de l'ordre de 11,6 m de large.

		Grande grille d'injection						
Niveau mini (173 + 0,2 = 173,2 NN)	Hauteur en eau	2.80 m	Largeur	11.60 m	Surface mouillée	32.48 m <sup>2</sup>	Vitesse	35 cm/s
Niveau maxi (174 + 0,3 = 174,3 NN)	Hauteur en eau	3.90 m	Largeur	11.60 m	Surface mouillée	45.24 m <sup>2</sup>	Vitesse	25 cm/s

La seconde grille se situera dans le bassin aval de la passe à bassins aval (bassin n°64).

Le calcul des lignes d'eau dans la passe rive droite (cf. ANNEXE 2) montre que les niveaux d'eau dans ce bassin évolueront entre 173,41 et 174,41 NN.

Le pied de grille sera calé à 171,7 NN.

La grille comportera une partie fixe de 20 cm de haut. Au-dessus une partie mobile (retournable, par panneaux, pour assurer le nettoyage) s'étendra de la cote 171,9 à la cote 174,5 NN minimum.

Afin de garantir une vitesse d'injection inférieure à 35 cm/s, même si la partie fixe est totalement colmatée, la grille mesurera de l'ordre de 5 m de large.

		Petite grille d'injection						
Niveau mini (173 + 0,2 + 0,21) = 173,41 NN)	Hauteur en eau	1.51 m	Largeur	5.00 m	Surface mouillée	7.55 m <sup>2</sup>	Vitesse	30 cm/s
Niveau maxi (174 + 0,3 + 0,11) = 174,41 NN)	Hauteur en eau	2.51 m	Largeur	5.00 m	Surface mouillée	12.55 m <sup>2</sup>	Vitesse	18 cm/s

La perte de charge à la traversée des grilles en fonction du taux d'encrassement et des niveaux d'eau est donnée par le graphique ci-après.

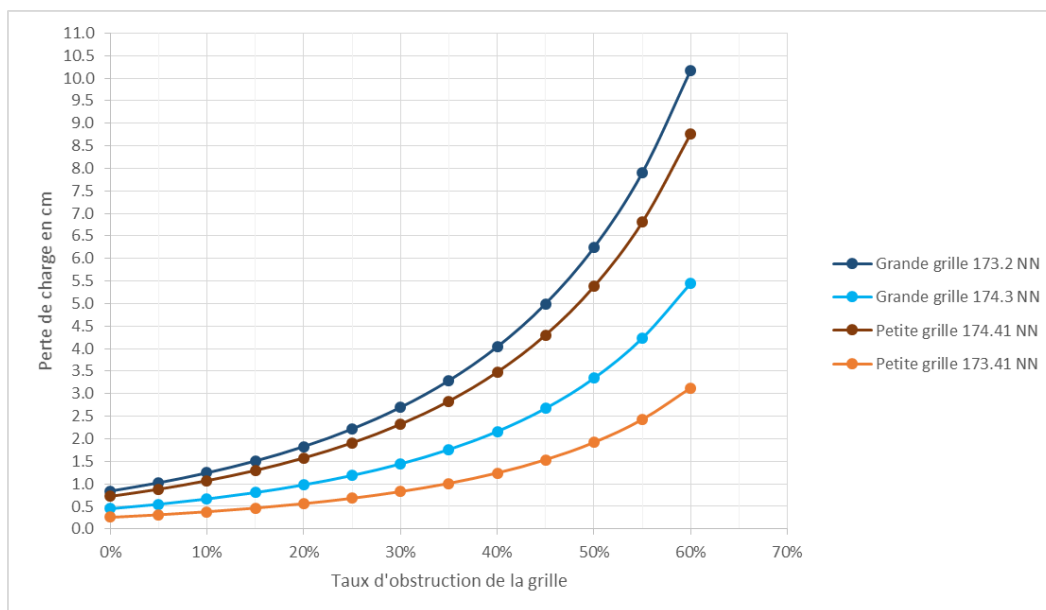


Figure 35 – Pertes de charge aux grilles de débit d'attrait (Formule de Raynal et al. 2012)

Les grilles rotatives seront retournées tous les jours afin d'assurer un encrassement minimum. La partie fixe de la grille sera nettoyée une fois par an.

On constate que la perte de charge à la traversée des grilles est très faible et négligeable pour des taux d'encrassement inférieurs à 30%.

Le bassin de répartition a un radier horizontal coté à 170,2 NN. Sa forme est celle d'un divergent progressif pour assurer, autant que faire se peut, la progressivité des vitesses d'écoulement.

Dans le canal d'alimentation des entrées de rives, le radier s'approfondit progressivement en même temps que le canal se rétrécit de façon à assurer la progressivité de l'évolution des vitesses.

#### 4.4.3.4 Délivrance et répartition du débit d'attrait rive droite

En rive droite, le débit d'attrait est délivré par une microcentrale de turbinage.

Cette dernière turbinera un débit constant de 13,8 m<sup>3</sup>/s.

En cas d'indisponibilité de la centrale un by-pass permettra la délivrance du débit et la dissipation de son énergie.

Le canal de restitution de la microcentrale sera constitué d'un canal rectangulaire, de 7,2 m de large, dont le radier sera coté à 170,2 NN.

Afin d'assurer sa tranquillisation, l'écoulement franchira diverses rangées d'UPN100 implantés comme sur le schéma ci-dessous.



En aval, le débit sera réparti entre deux canaux :

- Un canal d'alimentation du bassin de répartition (largeur 5,15 m) muni en tête de portes busquées qui formeront une fente toute hauteur à largeur réglable pour assurer la bonne répartition des débits ;
- Un canal d'alimentation du bassin 64 (largeur 1,75 m) qui entonnera l'autre partie du débit.

Plus en aval, les deux canaux seront munis de rangées d'UPN100 en proche amont des grilles d'injection décrites précédemment.

Pour calculer la perte de charge à la traversée des rangées d'UPN on calcule d'abord la vitesse de l'eau au passage d'un pertuis de 5 cm de large entre deux UPN. On applique ensuite une perte de charge à la Borda (ici le coefficient estimée est de 0,45). On majore ensuite cette perte de charge pour tenir compte du changement de direction entre vitesse incidente et vitesse au travers d'un pertuis (coefficient total = 0,45 + 0,3 = 0,75).

Le tableau ci-après indique les pertes de charges minimale et maximale au droit de chacune des rangées d'UPN :

	Largeur 7,2 m	Largeur 5 m	Largeur 11,5 m
Débit	13.8 m <sup>3</sup> /s	2.3 m <sup>3</sup> /s	11.5 m <sup>3</sup> /s
Niveau mini	173.41 NN	173.41 NN	173.20 NN
Niveau maxi	174.41 NN	174.41 NN	174.30 NN
Hauteur mini	3.21 m	3.21 m	3.00 m
Hauteur maxi	4.21 m	4.21 m	4.10 m
Nb pertuis	71	49	114
Vpertuis maxi	1.21 m/s	0.29 m/s	0.67 m/s
Vpertuis mini	0.92 m/s	0.22 m/s	0.49 m/s
Perte maxi	5.6 cm	0.3 cm	1.7 cm
Perte mini	3.3 cm	0.2 cm	0.9 cm

Les pertes de charge à la traversée des rangées d'UPN sont les plus importantes lorsque les niveaux dans le canal de restitution de l'usine sont les plus bas.

Les rangées d'UPN situées en amont des grilles d'injection génèrent des pertes de charge faibles (< 2 cm).

La rangée d'UPN situé en aval de la microcentrale génère une perte de charge un peu plus importante (de l'ordre de 5 cm).

Au final, le niveau d'eau en aval immédiat du groupe de turbinage devrait varier entre environ 173,7 NN et 174,6 NN.

Niveau bassin de répartition	Niveau canal alimentation bassin de répartition	Niveau canal alimentation bassins 64	Niveau aval microcentrale	Chute portes busquées	Ouverture portes pour 11,5 m <sup>3</sup> /s
Mini (173.2 + 0.2 = 173.4 NN)	173.4 + 0.017 + 0.01 = 173.43 NN	173.4 + 0.21 + 0.002 + 0.01 = 173.62 NN	173.67 NN	19 cm	2.30 m
Maxi (174 + 0.3 = 174.3 NN)	174.3 + 0.009 + 0.005 = 174.31 NN	174.3 + 0.21 + 0.003 + 0.005 = 174.52 NN	174.57 NN	11 cm	2.32 m

Afin de garantir le passage d'un débit de 11,5 m<sup>3</sup>/s, les portes busquées devront être ouvertes de 2,3 m à niveau bas et de 2,32 m à niveau haut. Elles seront prévues réglables mais en pratique, leur écartement sera fixe compte tenu des faibles différences d'ouverture entre niveaux mini et maxi.

#### 4.4.3.5 Passe à bassins rive droite

Afin d'exploiter au mieux les possibilités du terrain naturel, la passe sera composée de 32 bassins et 33 chutes. Le radier sera continu.

La géométrie du premier bassin sera la suivante :

- Radier :
  - cote amont 177,9 NN,
  - cote médiane  $177,9 - 0,2/2 = 177,8$  NN,
  - cote aval =  $177,9 - 0,2 = 177,7$  NN ;
- Longueur du bassin : 3,5 m ;
- Largeur du bassin : 3 m ;
- Pente du radier = 5,7% (0,2 m / 3,5 m);
- Profondeur moyenne : 1,8 m pour 1,2 m<sup>3</sup>/s ;
- Taux de dissipation volumique : autour de 125 W/m<sup>3</sup>.

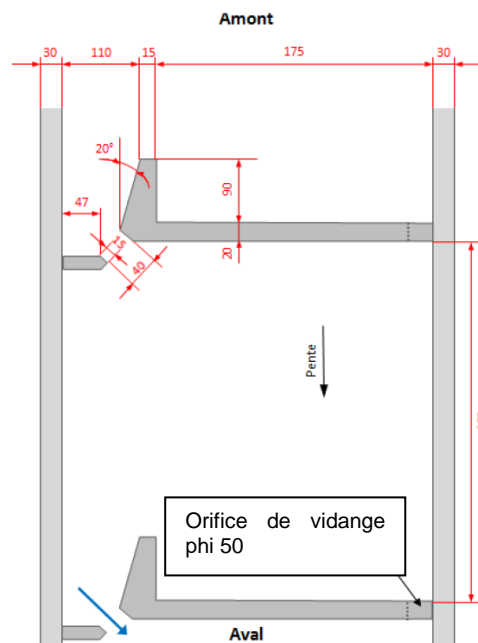


Figure 36 – Dimensions des bassins des passes à poissons

Les cloisons seront munies de fentes de 0,4 m de large et de 2,3 m de haut ; le reste de la cloison formera un seuil déversant de  $1,75 + 0,47 = 2,22$  m de large situé à 2,3 m au-dessus du radier.

Un orifice circulaire phi 50 sera ménagé près du radier dans la cloison afin de permettre la vidange total du bassin lors des opérations de maintenance (notamment la partie située derrière le déflecteur de la fente).

Le bassin le plus aval (bassin 64) mesurera 9,9 m de long et 4 m de large. Son radier ira de la cote 171,7 NN à la cote 170,7 NN.

La cloison la plus aval sera munie d'une fente de 0,8 m de large dont le seuil sera coté à 170,7 NN. En aval un plan incliné permettra au radier de rejoindre la cote 170,2 NN. De même, en aval de la fente, les bajoyers de cette dernière rejoindront progressivement les bajoyers du bassin aval.

Les radiers de tous les bassins de la passe seront munis de rugosités proches de celles de la passe de Gerstheim afin d'aider à la progression des anguilles, des petites espèces et des espèces benthiques. Il s'agit de cylindres de 20 cm de diamètre et de 20 cm de haut, perpendiculaire au radier, dont la répartition sur le radier est décrite ci-après :

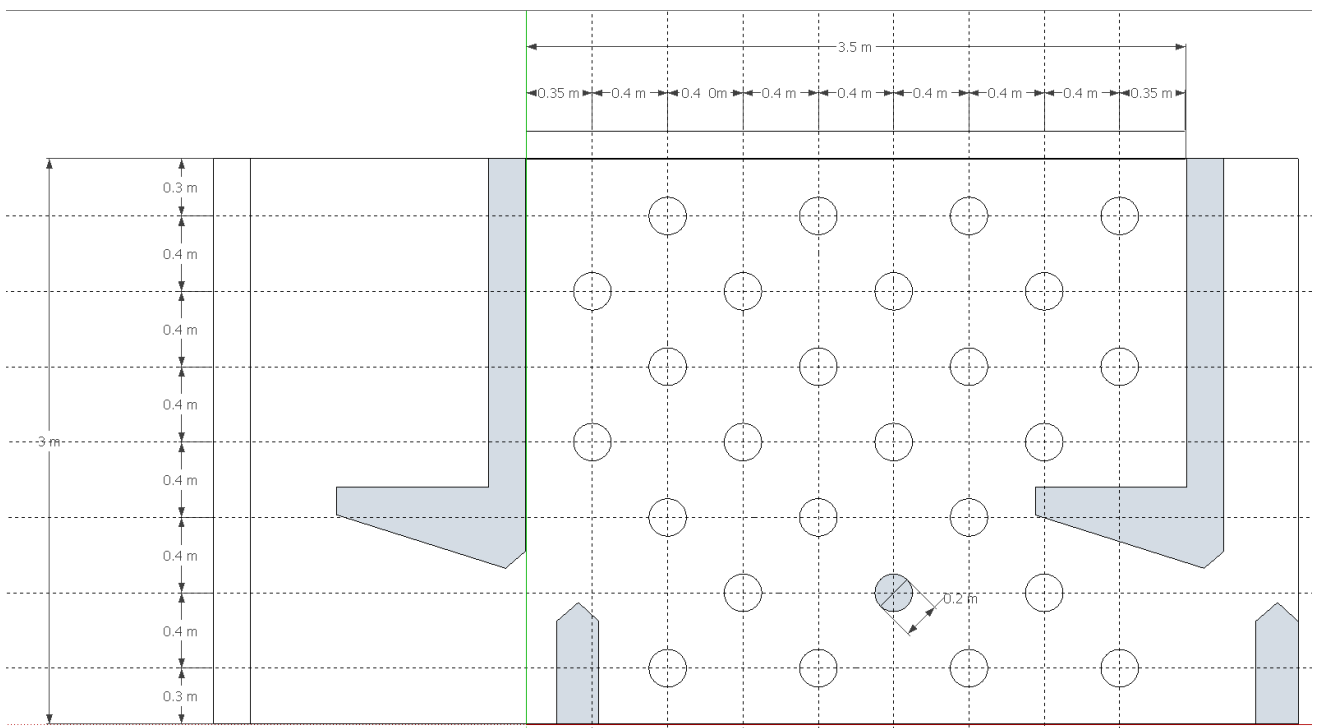


Figure 37 – Macrorugosités sur le radier des bassins des passes

L'ANNEXE 2 détaille le calcul des lignes d'eau de la passe pour différentes conditions limites amont et aval.

Les chutes entre bassins évolueront entre 11 cm et 21 cm (valeur nominale 20 cm).

Les taux de dissipation volumique dans les bassins seront inférieurs ou égaux à 125 W/m<sup>3</sup>.

Au sein de chaque bassin, les bajoyers devront au minimum présenter une hauteur de 2,6 m par rapport au radier au niveau de la fente aval.

La passe étant repliée sur elle-même, elle comprendra deux bassins de retournement. Ces derniers seront conçus de manière à avoir une longueur de bassin (soit 3,5 m) en aval de la fente amont avant d’entamer le virage à 180°. Le bajoyer central sera prolongé d’une longueur de 3 m par rapport au déflecteur de la fente amont.

Les angles du bassin seront chanfreinés comme indiqué sur le schéma ci-après.

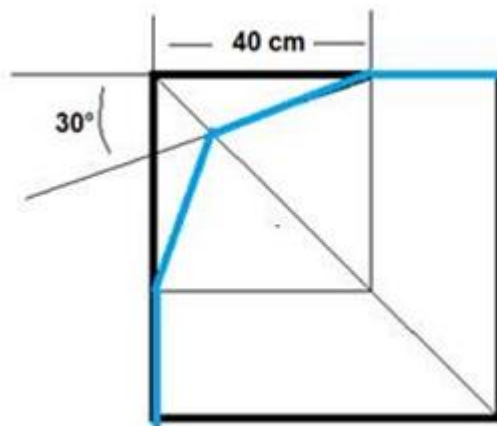


Figure 38 – Chanfreinage des angles dans les bassins de retournement

#### 4.4.3.6 Injection du débit d'attrait rive gauche

En rive gauche, le débit d'attrait est délivré par une station de pompage composée de 6 pompes indépendantes de 2,3 m<sup>3</sup>/s chacune.

La station pompera un débit constant de 13,8 m<sup>3</sup>/s.

#### 4.4.3.7 Délivrance et répartition du débit d'attrait rive gauche

Comme sur la rive droite, le débit d'attrait est fractionné.

Un débit de 2,3 m<sup>3</sup>/s sera injecté dans le dernier bassin aval de la passe au travers d'une petite grille fine (espacement interbarreaux de 20 mm).

Le reste du débit (11,5 m<sup>3</sup>/s) sera injecté dans le bassin de répartition, en aval de la passe, au travers d'une grande grille fine (espacement interbarreaux de 20 mm).

Les caractéristiques des grilles de la rive droite pourront être reprises.

Les vitesses d'injection du débit d'attrait seront donc les mêmes que sur la rive droite.

Les débits d'attrait seront uniformisés par des rangées d'UPN (caractéristiques identiques à celles de la rive droite) avant injection au travers des grilles.

#### 4.4.3.8 Passe à bassins rive gauche

Les poissons en provenance de la rive gauche doivent être conduits à l'amont immédiat de la passe rive droite.

Cela nécessite de fractionner l'élévation pour y insérer un transfert rive gauche-rive droite.

Ainsi l'équivalent de la passe rive droite se composera :

- D'une passe rive gauche de 29 bassins et 30 chutes ;
- D'un canal de transfert passant devant l'usine ;
- D'une passe de transfert, située en rive droite, de 2 bassins et 3 chutes.

La passe rive gauche sera identique à la passe rive droite par ses caractéristiques globales.

Toutefois, le dernier bassin (n°64') mesurera 7 m de long.

La géométrie de la passe et le calcul de la ligne d'eau est présenté en ANNEXE 3.

Le niveau d'eau en amont de la passe rive gauche sera de 179,2 NN.

Par sécurité, une vanne carrée (50 cm x 50 cm) sera installée dans la cloison amont de la passe rive gauche. Son ouverture sera réglable de façon à pouvoir, le cas échéant, compenser une perte de charge trop importante dans le canal de transfert rive gauche-rive droite.



#### 4.4.3.9 Canal de transfert rive gauche-rive droite

Ce canal permet aux poissons en provenance de la rive gauche de regagner le local vidéo en rive droite.

En raison des sujétions génie civil et de la présence des déchargeurs centraux de l'usine, la géométrie retenue pour le canal est la suivante :

- Longueur : ~300 m ;
- Largeur : 1,9 m ;
- Radier : 177,8 NN puis 177,4 NN à chaque extrémité (évolution progressive).

Il est muni des mêmes macrorugosités que le canal de la sortie piscicole. (Cf. 4.4.3.15.4).

La vitesse d'écoulement dans le chenal est la suivante :

	Débit	Cote eau	Hauteur d'eau	Largeur	Vitesse
Devant l'usine	1.2 m <sup>3</sup> /s	179.20 NN	1.40 m	1.90 m	45 cm/s
Sur les rives	1.2 m <sup>3</sup> /s	179.20 NN	1.80 m	1.90 m	35 cm/s

Le canal étant très lisse (Strickler = 80 m<sup>1/3</sup>.s<sup>-1</sup> ; macrorugosités de fond négligées), la pente de la ligne d'énergie est estimée à 5.10<sup>-5</sup>.

Pour un canal de 300 m de long, la perte de charge linéaire est négligeable (1,5 cm).

Le canal de liaison présentera 4 coudes profilés proches de 120°.

On estime à 0,11 le coefficient de perte de charge d'un tel coude (R/D=3).

La perte de charge singulière est alors de l'ordre de 0,5 cm.

La perte de charge totale est donc 2 cm. Elle pourra être négligée.

#### 4.4.3.10 Passe à bassins de transfert

En rive droite, une passe de transfert complètera l'élévation de la passe rive gauche pour aboutir à une élévation totale équivalente à celle de la passe rive droite.

La passe de transfert se composera de 2 bassins et 3 chutes.

Elle sera identique à la passe rive droite par ses caractéristiques globales.

Les seuils des 3 fentes seront respectivement cotées à 177,90, 177,70, 177,50 NN.

La géométrie de la passe et le calcul de la ligne d'eau est présenté en ANNEXE 4.

Pour le débit nominal de 1,2 m<sup>3</sup>/s, le niveau d'eau en amont de la passe de transfert sera de 179,8 NN.

#### 4.4.3.11 Difffluence rive droite-rive gauche

On appelle difffluence la zone de séparation de l'ouvrage en deux branches, l'une rive droite, l'autre rive gauche. On passe ainsi d'un débit de 2,4 m<sup>3</sup>/s à deux débits de 1,2 m<sup>3</sup>/s.

Cette zone se situe à l'amont immédiat de la passe rive droite et de la passe de transfert.

L'objectif du design de cette zone est d'assurer une évolution progressive des vitesses sans provoquer de chute brutale ou créer des zones de recirculation qui pourraient constituer autant de facteurs d'hésitation et/ou d'accumulation des poissons.

De surcroît, le respect de ces contraintes conduit à une limitation de la perte de charge au passage de la transition.

Dans la partie amont de la zone, le débit par mètre de largeur de canal est de  $2,4 / 4 = 0,6$  m<sup>3</sup>/s.

Dans la partie aval, il sera de  $1,2 / 3 = 0,4$  m<sup>3</sup>/s.

On placera un musoir central commençant à mi-évolution, soit au droit de la section où le débit par mètre de largeur vaut 0,5 m<sup>3</sup>/s, soit encore dans la section de 4,8 m de large (cf. dessin ci-après).

L'élargissement progressif des bajoyers du canal respectera un angle propre à éviter les décollements (ouverture par angles successifs <12°). Les bajoyers seront cotés à 180,5 NN.

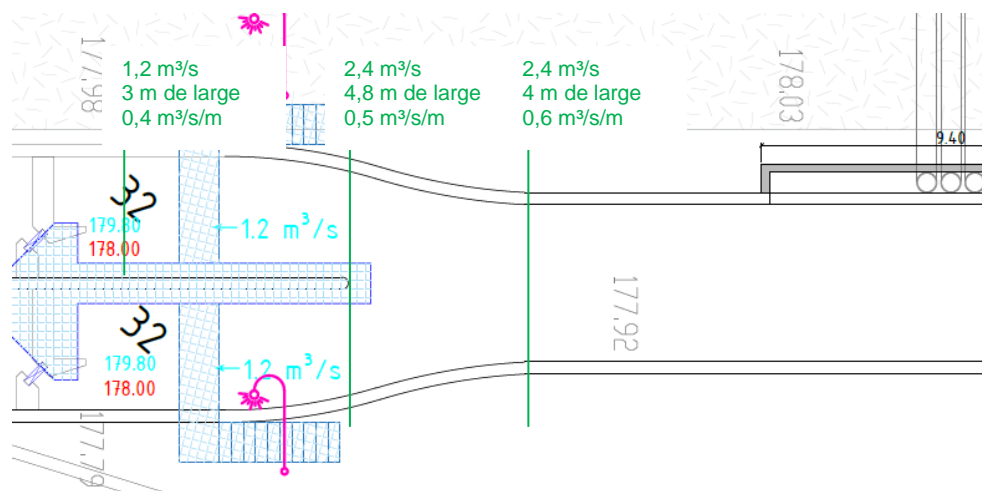


Figure 39 – Design de la difffluence

#### 4.4.3.12 Délivrance du débit complémentaire

Afin de pouvoir alimenter les passes des deux rives, il est nécessaire d'ajouter un débit complémentaire au débit en provenance de la passe amont.

Ce débit sera délivré gravitairement par un piquage sur la conduite forcée de la microcentrale de turbinage du débit d'attrait.

Son énergie sera dissipée par une vanne asservie au niveau d'eau à l'amont de la diffuence entre les branches des deux rives.

L'injection du débit complémentaire se fera en amont de la diffuence des deux bras de l'ouvrage.

La conduite d'alimentation sortira verticalement du radier et son extrémité sera chapeautée.

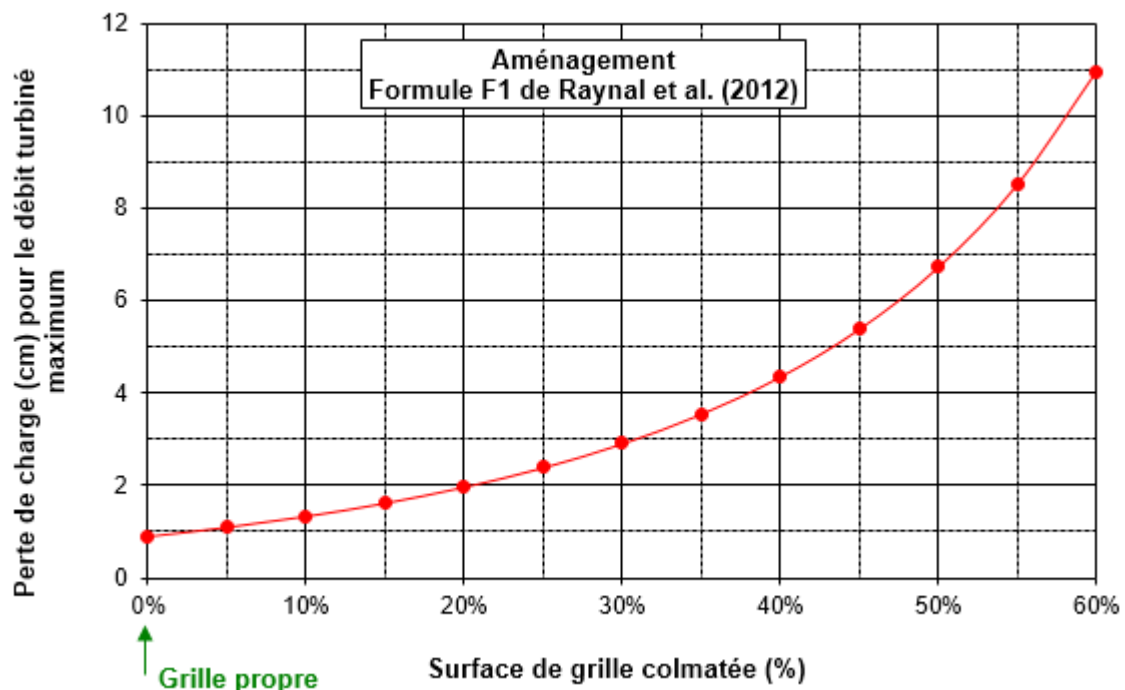
L'écoulement sera ensuite tranquilisé par une rangée d'UPN identiques à ceux utilisés pour les débits d'attrait, puis injecté au travers d'un plan de grilles fines (espacement interbarreaux 20 mm ; largeur 2,3 m).

Le pied de grille sera calé à 178 NN.

La grille comportera une partie fixe de 20 cm de haut. Au-dessus une partie mobile (retournable, par panneaux, pour assurer le nettoyage) s'étendra de la cote 178.2 à la cote 180 NN minimum.

Afin de garantir une vitesse d'injection inférieure à 35 cm/s, même si la partie fixe est totalement colmatée, la grille mesurera de l'ordre de 2 m de large.

En fonction du taux de colmatage de la grille, la perte de charge à sa traversée est donnée par le graphique ci-après.



La perte de charge à la traversée des UPN est la suivante :

	Largeur 3 m
Débit	1.2 m <sup>3</sup> /s
Niveau	179.80 NN
Hauteur	1.70 m
Nb pertuis	29
Vpertuis	0.49 m/s
Perte	0.9 cm

Le niveau de l'eau au débouché de la conduite sera donc de  $179,8 + 0,02 + 0,009 \sim 179,83$  NN.

La position et l'orientation de la grille d'injection du débit complémentaire ont été testées et validées par simulation numérique lors de l'étude de la passe à poissons de Rhinau. Les résultats de la simulation de Rhinau sont rappelés en ANNEXE 5.

Compte tenu de la similitude géométrique (représentée sur la Figure 40) et du fait que dans le cas de Marckolsheim une distance plus longue permet à l'écoulement de se stabiliser avant d'attaquer la diffluence, l'orientation de la grille sera la même qu'à Rhinau.

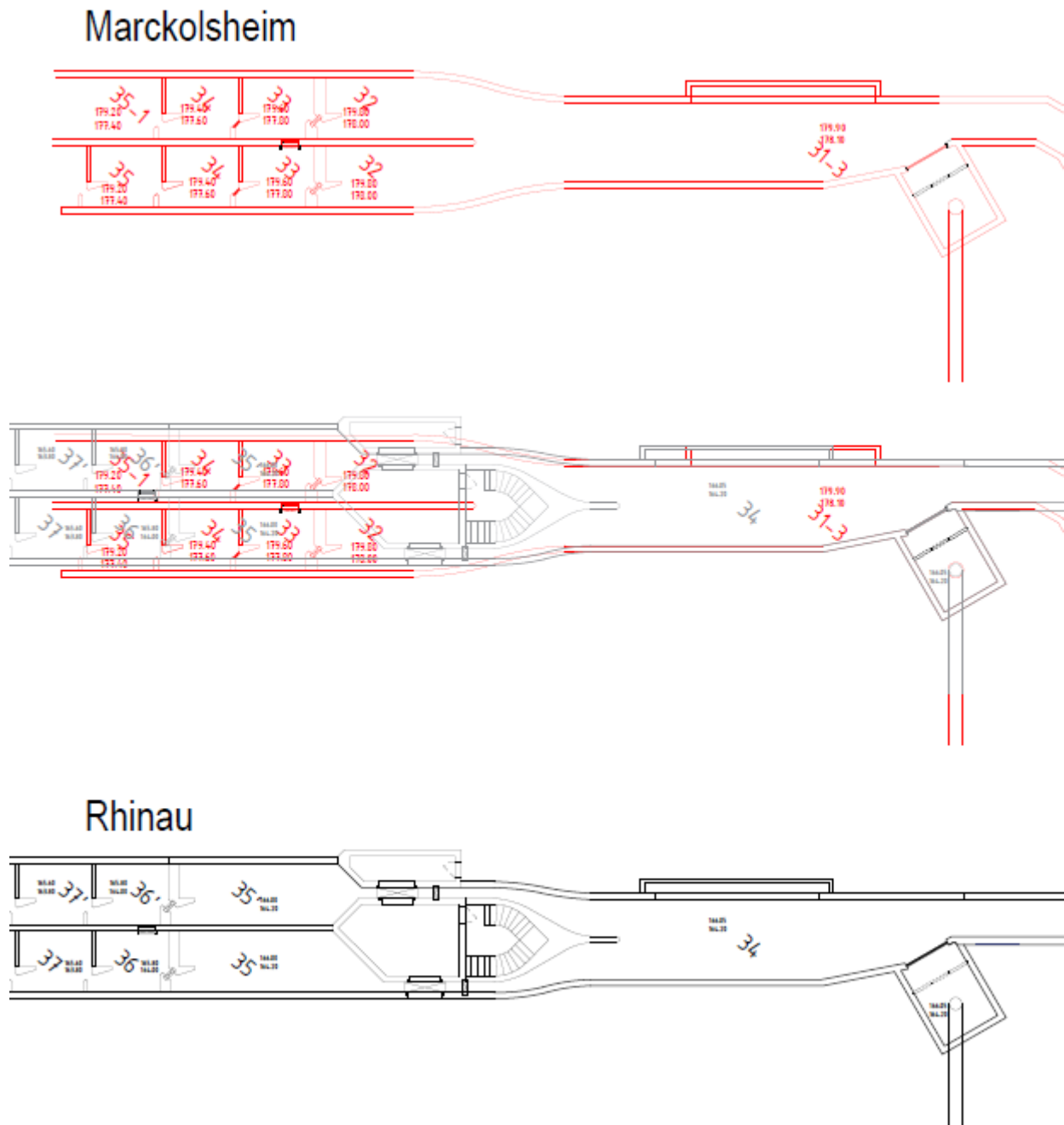


Figure 40 – Superposition des géométries Rhinau et Marckolsheim en aval du débit complémentaire

#### 4.4.3.13 Canal de liaison

Le canal de liaison mesure 340 m de long et 1,8 m de large.

Sa section est rectangulaire et son radier évolue entre les cotes 178 NN et 178,15 NN (soit une pente de l'ordre de 0,4 ‰).

Il comportera deux coudes segmentés à 90°.

Ses parois seront en béton lisse.

Des macrorugosités de fond permettront la progression des espèces de fond (cf. Figure 47).

La cote de l'eau en aval de la passe amont est déterminée par le niveau d'eau en amont de la passe rive droite augmenté de l'ensemble des pertes de charge dues :

- Aux coudes du canal de liaison amont (~0,5 cm) ;
- Aux pertes de charge linéaires du canal de liaison amont (~1,5 cm).

La perte de charge totale est donc d'environ 2 cm que nous arrondirons à 5 cm pour tenir compte de pertes négligées comme celles dues à l'injection du débit complémentaire ou des macrorugosités de fond.

Le débit étant fixe et égale à 2,4 m<sup>3</sup>/s au niveau de la diffluence, la cote sera également fixe et égale à 179,8 NN.

Le niveau d'eau à l'aval immédiat de la passe amont sera donc de 179,8 + 0,05 = 179,85 NN.

Les vitesses d'écoulement en fonction des débits sont les suivantes :

Débit amont	Largeur canal	Amont canal			Aval canal		
		Cote de l'eau	Cote radier	Vitesse	Cote de l'eau	Cote radier	Vitesse
1,0 m <sup>3</sup> /s	1,80 m	179,85 NN	178,15 NN	33 cm/s	179,80 NN	178,00 NN	31 cm/s
1,2 m <sup>3</sup> /s	1,80 m	179,85 NN	178,15 NN	39 cm/s	179,80 NN	178,00 NN	37 cm/s
1,4 m <sup>3</sup> /s	1,80 m	179,85 NN	178,15 NN	46 cm/s	179,80 NN	178,00 NN	43 cm/s

On constate qu'elles sont comprises entre 30 et 46 cm/s.

Tout le long du canal, les bajoyers seront cotés à 180,5 NN.

Un déversoir de sécurité sera inséré en rive droite du canal en partie terminale. Son seuil sera coté à 180 NN et pour une largeur de 8 m, il pourra débiter 1,46 m<sup>3</sup>/s sous 25 cm de charge (Formule de déversoir latéral de Dominguez, 1945).

#### 4.4.3.14 Passe à bassins amont

Comme vu dans le paragraphe sur l'alimentation en eau de l'ouvrage, la cote du radier au niveau de la première fente sera fixée à 184,25 NN.

En amont, le radier rejoindra progressivement la cote du radier du canal d'amenée à 184,3 NN.

En aval, les cotes des points bas des fentes suivantes se déduiront par translation de -20 cm.

Afin d'exploiter au mieux les possibilités du terrain naturel, la passe sera composée de 30 bassins et 31 chutes. Le radier sera continu.

La géométrie du premier bassin est la suivante :

- Radier :
  - cote amont 184,25 NN,
  - cote médiane  $184,25 - 0,2/2 = 184,15$  NN,
  - cote aval =  $184,25 - 0,2 = 184,05$  NN ;
- Longueur du bassin : 3,5 m ;
- Largeur du bassin : 3 m ;
- Pente = 5,7% (0,2 m / 3,5 m);
- Profondeurs moyennes : 1,5 m pour 1 m<sup>3</sup>/s, 1,8 m pour 1,2 m<sup>3</sup>/s, 2,1 m pour 1,4 m<sup>3</sup>/s ;
- Taux de dissipation volumique : autour de 125 W/m<sup>3</sup>.

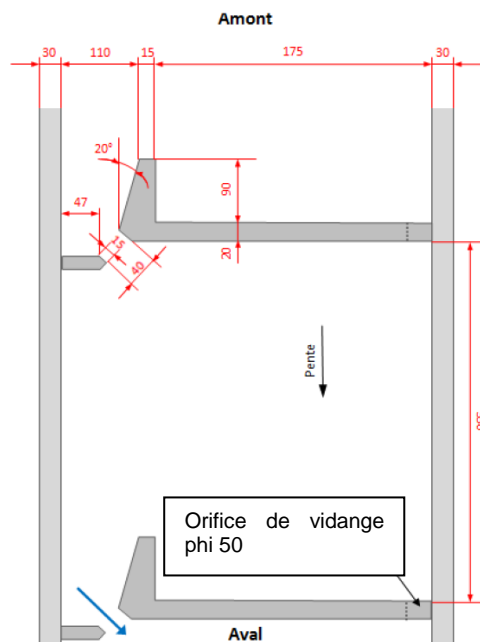


Figure 41 – Dimensions des bassins des passes à poissons



Les cloisons seront munies de fentes de 0,4 m de large et de 2,3 m de haut ; le reste de la cloison formera un seuil déversant de  $1,75 + 0,47 = 2,22$  m de large situé à 2,3 m au-dessus du radier.

Un orifice circulaire phi 50 sera ménagé près du radier dans la cloison afin de permettre la vidange totale du bassin lors des opérations de maintenance (notamment la partie située derrière le déflecteur de la fente).

Dans chaque bassin, les bajoyers seront cotés à 2,6 m au-dessus du radier de la fente aval (soit 0,3 m au-dessus du niveau de la cloison aval).

En amont du bassin 1, le bajoyer du canal de liaison amont ne doit pas être inférieur au niveau maximal du canal d'amenée de l'usine.

En aval du bassin 30, le bajoyer sera celui du canal de liaison (soit 180,5 NN). Dans sa partie amont il sera coté à 180,50 NN.

Les radiers seront munis de rugosités semblables à celles de la passe rive droite (cf. 4.4.3.5).

L'ANNEXE 1 présente les lignes d'eau au sein de la passe à bassins amont.

#### 4.4.3.15 Canal de la sortie piscicole

Le canal de la sortie piscicole constitue la liaison entre la passe à bassins amont et le canal d'amenée de l'usine. Il constitue l'entrée hydraulique de l'ouvrage.

Il se compose :

- d'une prise d'eau ;
- d'une grille grossière ;
- d'une vanne de condamnation ;
- d'un canal de liaison, d'un local vidéo de comptage, d'un passage souterrain ;
- d'un virage à 90°.

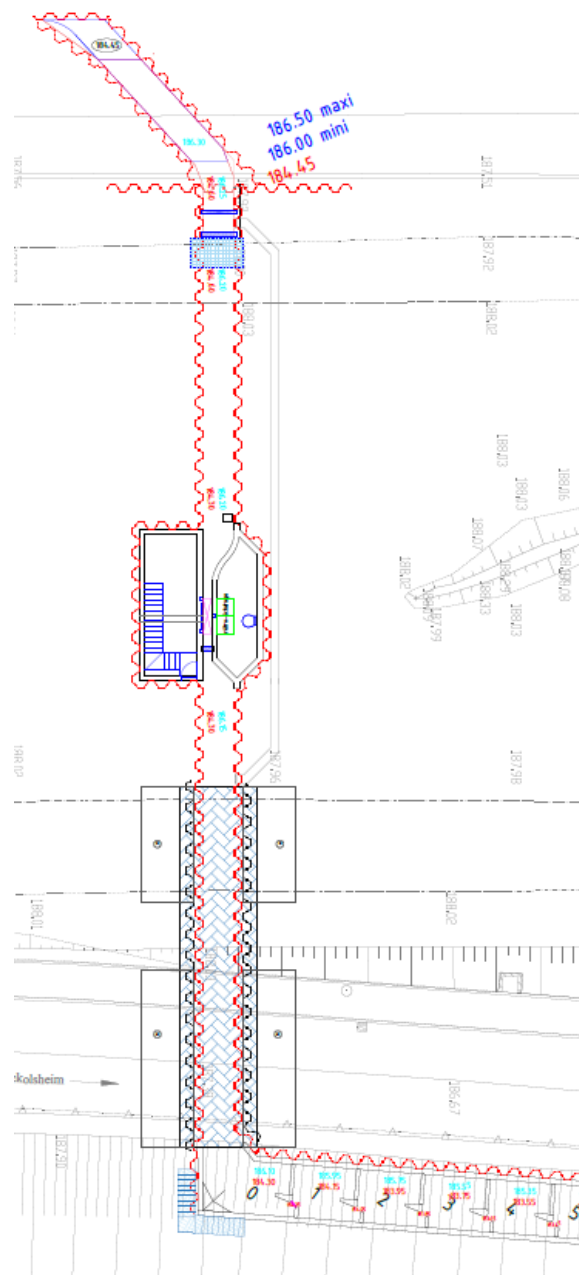


Figure 42 – Schéma de principe du canal de la sortie piscicole

#### 4.4.3.15.1 Prise d'eau

La sortie piscicole (i.e. l'entrée hydraulique) de l'ouvrage de Marckolsheim a été conçue par analogie avec celle de Rhinau.

La géométrie du canal d'amenée de l'usine de Marckolsheim étant identique à celle du canal d'amenée de Rhinau, les résultats du modèle numérique de Rhinau ont été exploités. Les dimensions de l'entrée piscicole ont été conservées et les cotes adaptées.

Nous rappelons ci-après les principes de dimensionnement.

La sortie piscicole doit satisfaire à plusieurs critères à la fois hydrauliques et biologiques :

- Elle doit permettre l'entonnement du débit d'alimentation de la passe amont tout en respectant les critères de vitesse permettant aux poissons de regagner le canal d'amenée de l'usine ;
- Elle doit être fonctionnelle sur toute la gamme de niveaux amont ;
- Elle doit limiter l'entonnement de corps flottants.

La sortie piscicole ne constitue pas une section de contrôle du débit.

Elle doit toutefois être conçue de façon à limiter la perte de charge entre le canal d'amenée de l'usine et la fente amont de la passe amont.

Les vitesses d'écoulement le long des berges du canal d'amenée étant assez élevées quand l'usine turbine au maximum, nous profiterons de l'effet de guidage des corps flottants en proposant une prise protégée par un masque de surface inclus dans le plan du talus du canal.

La sortie piscicole sera implantée environ 210 m en amont de l'usine de façon à se situer nettement en dehors de la zone de recirculation des corps flottants.

Le canal de liaison de l'ouvrage de migration viendra inciser le talus de la rive droite du canal d'amenée en formant un angle de 45° avec ce dernier.

Ce canal rectangulaire, de largeur 1,8 m, aura un radier horizontal coté à 184,6 NN.

Un masque « fin » sera positionné au niveau de l'échancrure créée, dans le plan du talus, entre les cotes 185,5 et 188 NN.

En amont du masque, le bajoyer du canal sera adouci en une forme « gauche » de raccordement avec les talus (partie rouge sur le schéma ci-après).

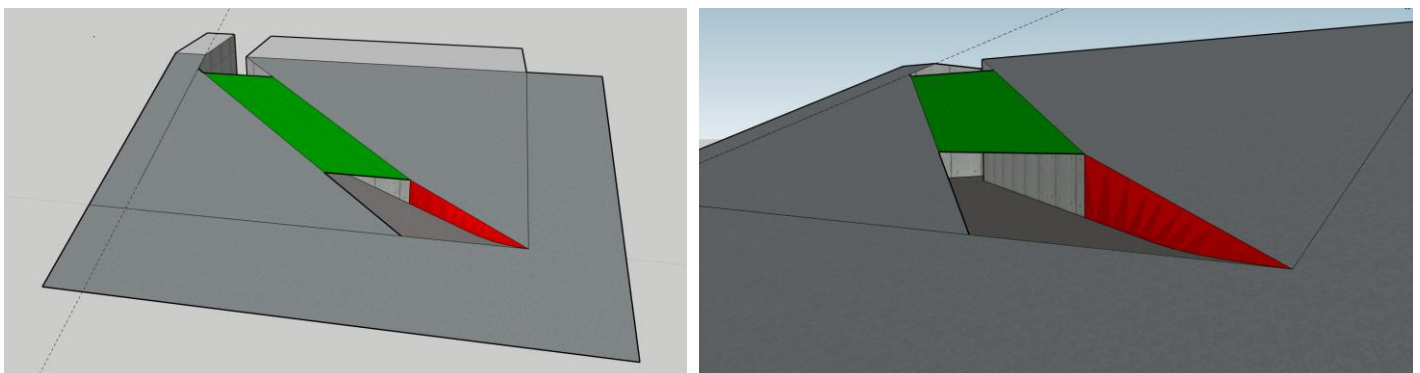


Figure 43 – Schéma de principe de la sortie piscicole

Afin de redevenir perpendiculaire à l'axe du canal d'aménée, le canal de liaison présentera un coude profilé à 45 °.

Les vitesses d'écoulement sous le masque et dans le canal, en aval immédiat du masque, évolueront de la sorte :

Cote canal d'aménée (NN)	Débit passe amont (m <sup>3</sup> /s)	Section sous masque (m <sup>2</sup> )	Vitesse sous masque (m/s)	Vitesse canal aval immédiat du masque (m/s)
185.25	0.539	1.62	0.33	0.60
186	1.014	1.62	0.63	0.45
186.3	1.204	1.62	0.74	0.43
186.5	1.395	1.62	0.86	0.44
186.7	1.458	1.62	0.90	0.42

#### 4.4.3.15.2 Vanne de condamnation

Une vanne de condamnation permettra d'isoler la passe lorsque le débit du Rhin sera supérieur à 2000 m<sup>3</sup>/s.

Cette vanne sera munie d'une vannette permettant de maintenir un débit de l'ordre de 100 à 200 l/s dans l'ouvrage de migration correspondant à une hauteur de 20-25 cm (comme à Gamsheim).

#### 4.4.3.15.3 Grille grossière

Bien que le masque de surface dévie l'essentiel des corps flottants, une grille grossière verticale (espacement interbarreaux de 30 cm, du radier jusqu'à, au moins, la cote 188 NN) sera implantée en amont de la vanne grossière pour retenir les débris ayant pu franchir le masque.

Elle sera construite de façon à pouvoir être facilement nettoyée à la main.

Si le besoin se faisait sentir, elle pourrait évoluer vers une structure différente qui permettrait d'intégrer un goulet anti-retour pour que les Silures du canal d'aménée ne puissent pas pénétrer dans la passe (tel que mis en place en sortie du canal de transfert de Golfech sur la Garonne).

#### 4.4.3.15.4 Canal

Un canal d'environ 16 m de long et 1,8 m de large fera la liaison entre la grille grossière et le local de comptage vidéo.

Le radier de ce canal ira de la cote 184,6 NN en aval de la grille grossière à 184,3 NN en amont du local de comptage.

Il sera muni de macrorugosités de fond différentes de celles des radiers des passes à bassins.

Ces macrorugosités ont pour but d'offrir des abris hydrauliques aux espèces benthiques et aux anguilles.

Elles seront constituées de cylindres de 20 cm de rayon disposés en alternance rive droite-rive gauche tous les 2 m dans le sens amont-aval.

Elles seront légèrement décollées du bajoyer (10 cm ; cf. Figure 47).

#### 4.4.3.15.5 Local de vidéo-comptage

La station de comptage est positionnée sur le trajet des poissons en amont de la passe à bassins amont.

Elle comptera donc les individus provenant à la fois de la rive droite et de la rive gauche de la centrale.

Pour un local de comptage vidéo, se situer à proximité de la sortie piscicole est plus classique car une position au sein de l'ouvrage peut entraîner des hésitations de la part des poissons. Cette dernière position a été retenue sur l'ouvrage de Rhinau car il était essentiel de pouvoir différencier les effectifs en provenance de chacune des rives. A Marckolsheim, nous bénéficierons du retour d'expérience de Rhinau et nous préférons donc positionner le local de comptage en partie amont de l'ouvrage.

Le local de comptage consistera en une section rétrécie du canal amont dont le radier horizontal sera coté à 184,3 NN.

Une fenêtre de comptage munie d'une vitre de 1,20 m de large sur 2 m de haut permettra d'observer les poissons en migration. Une vitre de rétroéclairage sera positionnée de façon opposée à la vitre de visualisation. Elle aura pour dimensions 1,40 m de large et 2 m de haut. Elle donnera sur un petit local dans lequel seront installés les éclairages (panneaux de néons).

La section du canal sera diminuée devant la vitre de comptage. La largeur sera de 50 cm afin d'obtenir une vitesse d'écoulement de l'ordre de 1,3 m/s évitant la stagnation des poissons devant la vitre.

Débit	Cote eau amont station vidéo (NN)	Hauteur d'eau	Largeur	Vitesse devant la vitre
1.0 m <sup>3</sup> /s	185.90 NN	1.60 m	0.50 m	1.25 m/s
1.2 m <sup>3</sup> /s	186.20 NN	1.90 m	0.50 m	1.27 m/s
1.4 m <sup>3</sup> /s	186.40 NN	2.10 m	0.50 m	1.33 m/s

Cette zone sera également couverte d'une tôle pour protéger des rayons du soleil qui peuvent générer des reflets parasites.

Dans la partie aval de la section rétrécie, une vanne d'isolement sera installée.

Les vitres devront être en verre pour éviter les rayures.

La distance entre la vitre et la caméra sera d'environ 2 m.

Un système automatisé de nettoyage des vitres devra être prévu.

Le radier du canal devra être légèrement plus haut (20-30 cm) devant la vitre de comptage pour éviter les stagnations de sables mais également pour diriger les poissons de fond vers le haut afin d'améliorer le comptage.

Le rétro-éclairage sera constitué par des panneaux de néons qui pourront être verticaux (taille des néons : 1,80 m) mais installés sur des rails facilitant leur remplacement.

Il sera nécessaire de coller un film dépoli derrière la vitre d'éclairage et il est préconisé de peindre le local d'éclairage en blanc. Il est également préconisé de peindre le local de comptage pour éviter les poussières de béton.

Les locaux de comptage et d'éclairage devront être ventilés.

Les brosses de nettoyage des vitres devront être nettoyées après le passage d'une crue pour limiter les risques de rayure.

Aucun local de visite ne sera envisagé pour le public.

Afin de permettre un entretien manuel des vitres du local vidéo, la portion de canal, située entre la vanne de condamnation et la vanne de fermeture aval du local vidéo, pourra être mise hors d'eau après isolement par une pompe d'exhaure.

Pour ce faire, un circuit de by-pass formé d'une conduite phi 500 d'environ 25 m de long permettra le transit d'un débit de l'ordre de 600 l/s pour un niveau de canal d'amenée médian.

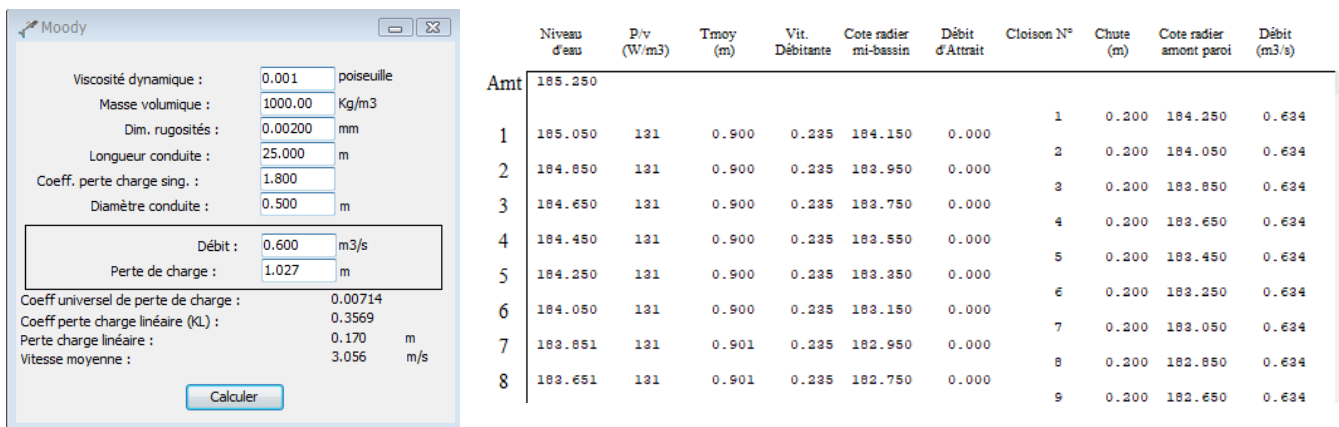


Figure 44 - Calcul des conditions d'équilibre dans le by-pass du local vidéo pour une cote du canal d'amenée médiane

Des macrorugosités de fond identiques à celles des bassins des passes seront implantées de de la passe amont à 5 m en amont du local vidéo.



Figure 45 – macrorugosités de fond au local de comptage de Kembs

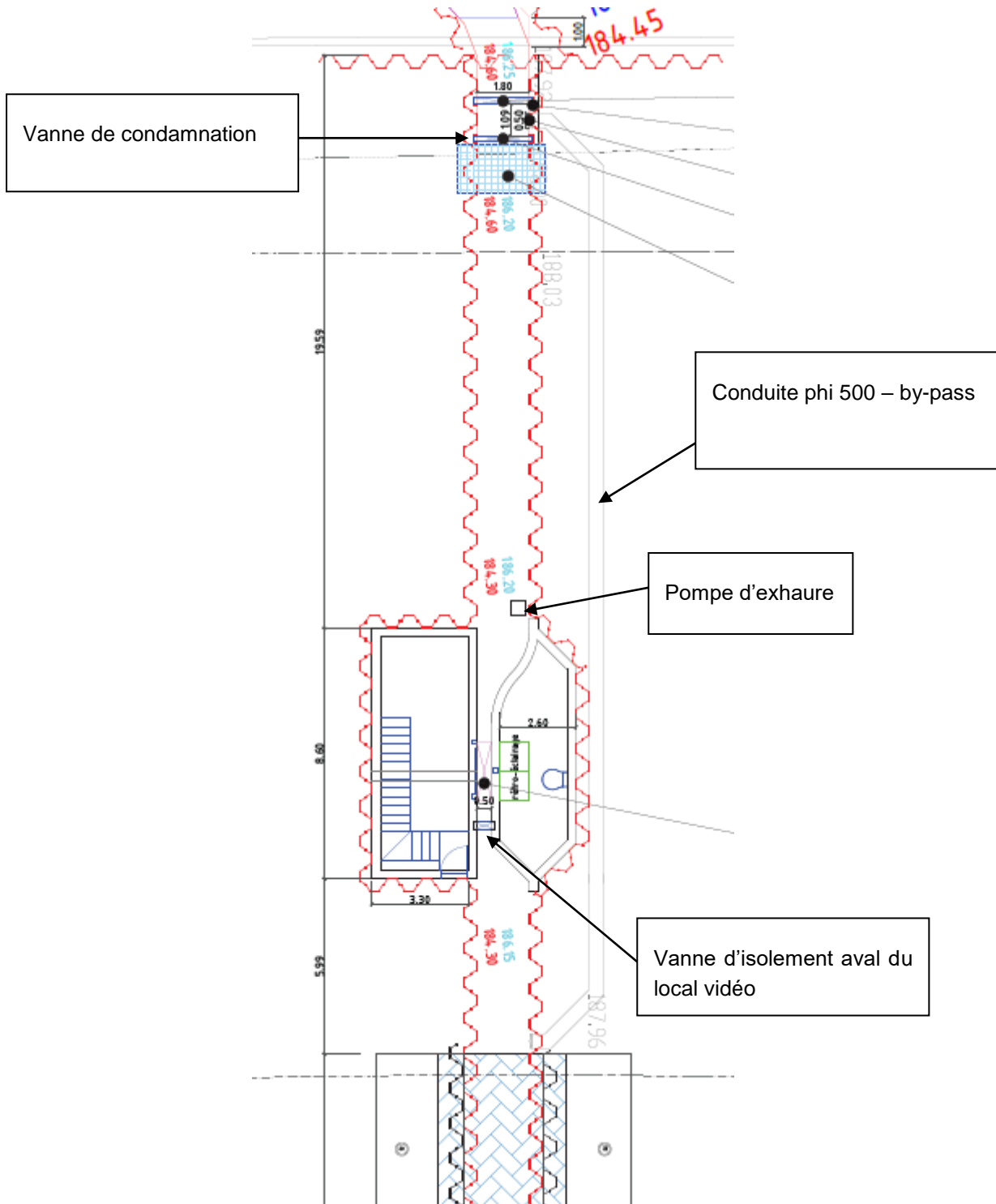


Figure 46 – Canal de liaison amont et local vidéo

#### 4.4.3.15.6 Passage sous la route et coude en amont de la passe amont

Le canal passera sous la route sur une distance de l'ordre de 20 m (radier 184,3 NN et sommet du tunnel 187 NN) ce qui ne posera pas de problème de transitions lumineuses brusques potentiellement répulsives pour les poissons.

Il effectuera ensuite un virage à 90 °C pour s'aligner avec l'axe de la passe. Son radier sera alors légèrement incliné afin de rejoindre le fond de fente à 184,25 NN.

L'intrados et l'extrados du virage seront munis de pans-coupés afin d'éviter les décollements susceptibles de créer des recirculations pouvant potentiellement perturber les poissons.

Des macro-rugosités identiques à celles des radiers des passes à bassins seront implantées sur le fond.



#### 4.4.3.15.7 Pertes de charge linéaires

Le canal est en béton lisse.

Nous retiendrons un coefficient de Strickler de  $80 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Pour les conditions d'écoulement calculées précédemment, la perte de charge linéaire est négligeable (pente de la ligne d'énergie de  $\sim 3 \cdot 10^{-6}$ ).

La prise en compte des macrorugosités n'est pas nécessaire car le très grand espacement entre plots rend leur influence sur la rugosité négligeable.

La perte de charge linéaire totale est donc négligeable.

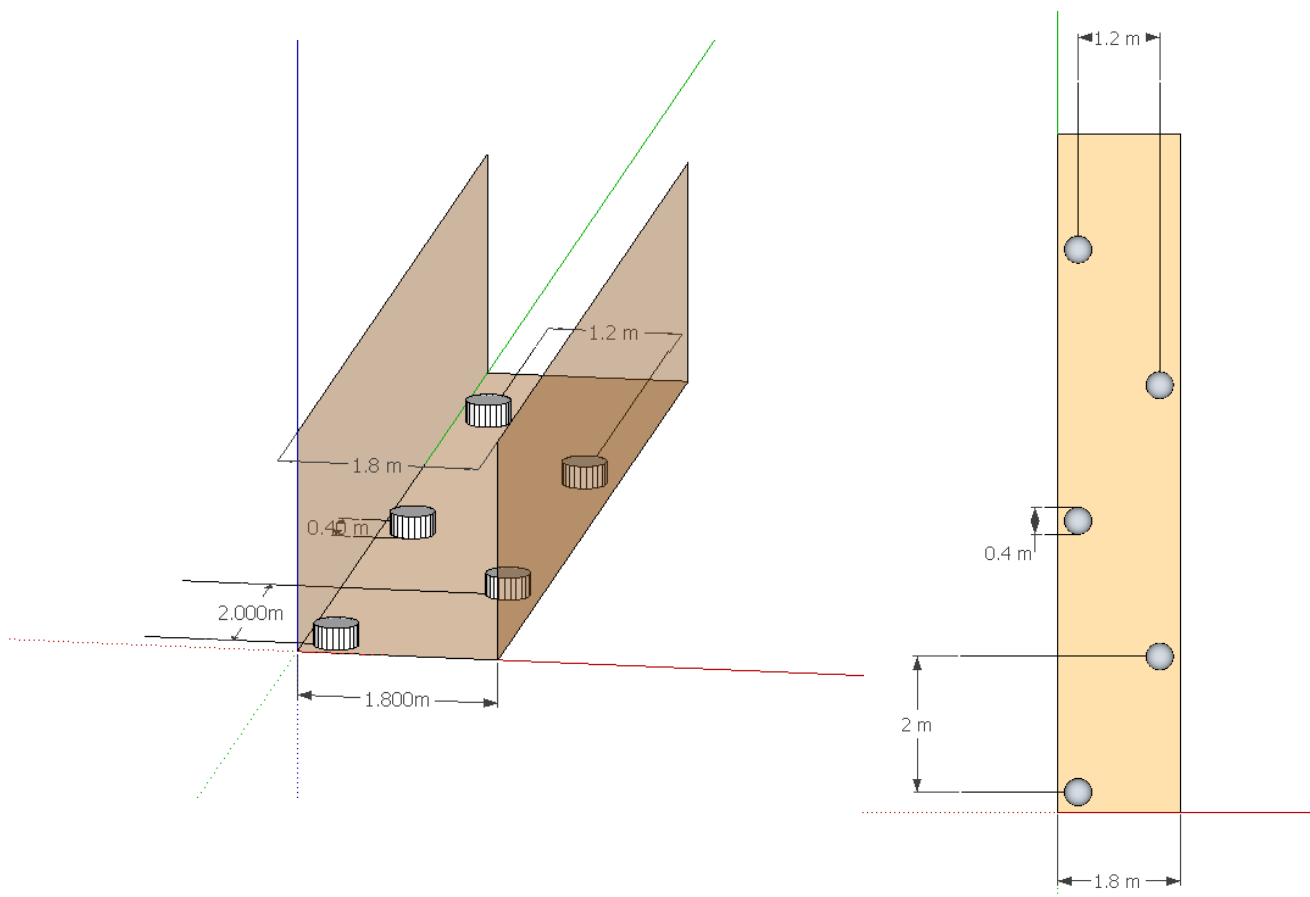


Figure 47 – Macrorugosités du radier du canal de liaison de la sortie piscicole

#### 4.4.3.15.8 Pertes de charge singulières

Les pertes de charge singulières seront causées par la sortie piscicole (notamment le masque et la grille de protection contre les corps flottants), le local de vidéo comptage ainsi que les changements de direction à l'intérieur du chenal.

Pour un débit de 1,2 m<sup>3</sup>/s, la perte de charge due à l'entonnement, à l'élargissement progressif puis au coude peut être estimée à :

$$(0,5+0,04) \times (1,2/(0,9 \times 1,8))^2/2/9,81 + 0,3 \times (1,2/(1,6 \times 1,8))^2/2/9,81 \sim 2 \text{ cm.}$$

Pour rendre compte de l'effet de phénomènes non pris en compte (notamment hétérogénéité des écoulements sous le masque), nous retiendrons une valeur majorée de 5 cm.

L'estimation de l'évolution de la perte de charge à la grille en fonction du taux de colmatage (évaluation par la formule de Raynal) montre que pour un colmatage de l'ordre de 60 % la perte de charge dans le canal peut atteindre 8 cm.

Valeur de perte de charge (cm)	Grille propre	Grille colmatée												
		5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	
C =	0%													
a =	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89	2.89
K <sub>O</sub> =	0.26	0.33	0.43	0.54	0.68	0.85	1.07	1.33	1.68	2.12	2.69	3.47	4.53	
K <sub>B</sub> =	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ξ =	0.75	0.97	1.23	1.56	1.97	2.46	3.08	3.86	4.85	6.12	7.79	10.02	13.11	
V <sub>A,PDG</sub> <sup>2</sup> / 2g =	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
ΔH (cm) =	0.4	0.6	0.7	0.9	1.2	1.5	1.8	2.3	2.9	3.6	4.6	5.9	7.7	

En prenant un coefficient de perte de charge singulière pour le coude à 90° en amont de la passe amont, nous obtenons une perte singulière de 0,3 cm pour une vitesse nominale de 42 cm/s.

La perte de charge au niveau du local vidéo est estimée à 5 cm.

Au total, la perte de charge singulière varie de 11 cm pour une grille propre à 18 cm pour une grille colmatée à 60%.

Nous retiendrons l'ordre de grandeur de 15 cm.

## Bibliographie

Ballu, A., Callaud, D., Pineau, G., & David, L. (2017). Experimental study of the influence of macro-roughnesses on vertical slot fishway flows. *La Houille Blanche*, (2), 9-14.

Wang, R. W., David, L., & Larinier, M. (2010). Contribution of experimental fluid mechanics to the design of vertical slot fish passes. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, (396), 02.

# ANNEXES

**ANNEXE 1 – Cassiopée : passe à bassins amont**

Caractéristiques géométriques de Marcko amont													
	Surf Orif	Mu Orif	Larg. Fent	Mu Fent	Cote dév Fente	Cote Rad amt pa.	Cote Rad mi-bas.	Long Bas.	Larg Bas.	Larg Ech 1	Alpha Ech 1	Béta Ech 1	Cote seuil Ech 1
1	0.000	0.000	0.400	0.800	184.250	184.250	184.150	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	186.550
2	0.000	0.000	0.400	0.800	184.050	184.050	183.950	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	186.350
3	0.000	0.000	0.400	0.800	183.850	183.850	183.750	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	186.150
4	0.000	0.000	0.400	0.800	183.650	183.650	183.550	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	185.950
5	0.000	0.000	0.400	0.800	183.450	183.450	183.350	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	185.750
6	0.000	0.000	0.400	0.800	183.250	183.250	183.150	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	185.550
7	0.000	0.000	0.400	0.800	183.050	183.050	182.950	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	185.350
8	0.000	0.000	0.400	0.800	182.850	182.850	182.750	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	185.150
9	0.000	0.000	0.400	0.800	182.650	182.650	182.550	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	184.950
10	0.000	0.000	0.400	0.800	182.450	182.450	182.350	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	184.750
11	0.000	0.000	0.400	0.800	182.250	182.250	182.150	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	184.550
12	0.000	0.000	0.400	0.800	182.050	182.050	181.950	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	184.350
13	0.000	0.000	0.400	0.800	181.850	181.850	181.750	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	184.150
14	0.000	0.000	0.400	0.800	181.650	181.650	181.550	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	183.950
15	0.000	0.000	0.400	0.800	181.450	181.450	181.350	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	183.750
16	0.000	0.000	0.400	0.800	181.250	181.250	181.150	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	183.550
17	0.000	0.000	0.400	0.800	181.050	181.050	180.950	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	183.350
18	0.000	0.000	0.400	0.800	180.850	180.850	180.750	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	183.150
19	0.000	0.000	0.400	0.800	180.650	180.650	180.550	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	182.950
20	0.000	0.000	0.400	0.800	180.450	180.450	180.350	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	182.750
21	0.000	0.000	0.400	0.800	180.250	180.250	180.150	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	182.550
22	0.000	0.000	0.400	0.800	180.050	180.050	179.950	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	182.350
23	0.000	0.000	0.400	0.800	179.850	179.850	179.750	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	182.150
24	0.000	0.000	0.400	0.800	179.650	179.650	179.550	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	181.950
25	0.000	0.000	0.400	0.800	179.450	179.450	179.350	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	181.750
26	0.000	0.000	0.400	0.800	179.250	179.250	179.150	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	181.550
27	0.000	0.000	0.400	0.800	179.050	179.050	178.950	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	181.350
28	0.000	0.000	0.400	0.800	178.850	178.850	178.750	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	181.150
29	0.000	0.000	0.400	0.800	178.650	178.650	178.550	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	180.950
30	0.000	0.000	0.400	0.800	178.450	178.450	178.350	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	180.750
31	0.000	0.000	0.400	0.800	178.250	178.250				2.200	0.400	0.000	180.550

Vanne : Sans

Paramètres de fonctionnement : MINI										
	Niveau d'eau	P/v (W/m3)	Tmoy (m)	Vit. Débitante	Cote radier mi-bassin	Débit d'Attrait	Cloison N°	Chute (m)	Cote radier amont paroi	Débit (m3/s)
Amt	185.100									
1	184.900	134	0.750	0.239	184.150	0.000	1	0.200	184.250	0.539
2	184.700	134	0.750	0.239	183.950	0.000	2	0.200	184.050	0.539
3	184.500	134	0.750	0.239	183.750	0.000	3	0.200	183.850	0.539
4	184.300	134	0.750	0.239	183.550	0.000	4	0.200	183.650	0.539
5	184.100	134	0.750	0.239	183.350	0.000	5	0.200	183.450	0.539
6	183.900	134	0.750	0.239	183.150	0.000	6	0.200	183.250	0.539
7	183.700	134	0.750	0.239	182.950	0.000	7	0.200	183.050	0.539
8	183.501	134	0.751	0.239	182.750	0.000	8	0.200	182.850	0.539
9	183.301	133	0.751	0.239	182.550	0.000	9	0.200	182.650	0.539
10	183.101	133	0.751	0.239	182.350	0.000	10	0.200	182.450	0.539
11	182.902	133	0.752	0.239	182.150	0.000	11	0.199	182.250	0.539
12	182.702	133	0.752	0.239	181.950	0.000	12	0.199	182.050	0.539
13	182.503	132	0.753	0.238	181.750	0.000	13	0.199	181.850	0.539
14	182.305	132	0.755	0.238	181.550	0.000	14	0.198	181.650	0.539
15	182.107	131	0.757	0.237	181.350	0.000	15	0.198	181.450	0.539
16	181.911	130	0.761	0.236	181.150	0.000	16	0.197	181.250	0.539
17	181.716	128	0.766	0.235	180.950	0.000	17	0.195	181.050	0.539
18	181.523	125	0.773	0.232	180.750	0.000	18	0.193	180.850	0.539
19	181.333	122	0.783	0.229	180.550	0.000	19	0.190	180.650	0.539
20	181.147	117	0.797	0.225	180.350	0.000	20	0.185	180.450	0.539
21	180.968	110	0.818	0.220	180.150	0.000	21	0.179	180.250	0.539
22	180.796	102	0.846	0.212	179.950	0.000	22	0.172	180.050	0.539
23	180.635	91	0.885	0.203	179.750	0.000	23	0.161	179.850	0.539
24	180.486	80	0.936	0.192	179.550	0.000	24	0.149	179.650	0.539
25	180.351	67	1.001	0.179	179.350	0.000	25	0.135	179.450	0.539
26	180.232	55	1.082	0.166	179.150	0.000	26	0.119	179.250	0.539
27	180.129	44	1.179	0.152	178.950	0.000	27	0.103	179.050	0.539
28	180.041	34	1.291	0.139	178.750	0.000	28	0.088	178.850	0.539
29	179.966	26	1.416	0.127	178.550	0.000	29	0.075	178.650	0.539
30	179.903	20	1.553	0.116	178.350	0.000	30	0.063	178.450	0.539
Avl	179.850						31	0.053	178.250	0.539
	Cote Van		Sans							

Paramètres de fonctionnement : BASSE										
	Niveau d'eau	P/v (W/m3)	Tmoy (m)	Vit. Débitante	Cote radier mi-bassin	Débit d'Attrait	Cloison N°	Chute (m)	Cote radier amont paroi	Débit (m3/s)
Amt	185.850									
1	185.650	126	1.500	0.226	184.150	0.000	1	0.200	184.250	1.015
2	185.450	126	1.500	0.226	183.950	0.000	2	0.200	184.050	1.015
3	185.250	126	1.500	0.225	183.750	0.000	3	0.200	183.850	1.015
4	185.050	126	1.500	0.225	183.550	0.000	4	0.200	183.650	1.015
5	184.850	126	1.500	0.225	183.350	0.000	5	0.200	183.450	1.015
6	184.651	126	1.501	0.225	183.150	0.000	6	0.200	183.250	1.015
7	184.451	126	1.501	0.225	182.950	0.000	7	0.200	183.050	1.015
8	184.251	126	1.501	0.225	182.750	0.000	8	0.200	182.850	1.015
9	184.051	126	1.501	0.225	182.550	0.000	9	0.200	182.650	1.015
10	183.852	125	1.502	0.225	182.350	0.000	10	0.200	182.450	1.015
11	183.652	125	1.502	0.225	182.150	0.000	11	0.199	182.250	1.015
12	183.453	125	1.503	0.225	181.950	0.000	12	0.199	182.050	1.015
13	183.254	125	1.504	0.225	181.750	0.000	13	0.199	181.850	1.015
14	183.055	125	1.505	0.225	181.550	0.000	14	0.199	181.650	1.015
15	182.856	125	1.506	0.225	181.350	0.000	15	0.199	181.450	1.015
16	182.658	124	1.508	0.224	181.150	0.000	16	0.198	181.250	1.015
17	182.460	124	1.510	0.224	180.950	0.000	17	0.198	181.050	1.015
18	182.262	123	1.512	0.224	180.750	0.000	18	0.197	180.850	1.015
19	182.066	123	1.516	0.223	180.550	0.000	19	0.197	180.650	1.015
20	181.870	122	1.520	0.223	180.350	0.000	20	0.196	180.450	1.015
21	181.674	121	1.524	0.222	180.150	0.000	21	0.195	180.250	1.015
22	181.480	120	1.530	0.221	179.950	0.000	22	0.194	180.050	1.015
23	181.288	118	1.538	0.220	179.750	0.000	23	0.193	179.850	1.015
24	181.097	116	1.547	0.219	179.550	0.000	24	0.191	179.650	1.015
25	180.908	114	1.558	0.217	179.350	0.000	25	0.189	179.450	1.015
26	180.722	112	1.572	0.215	179.150	0.000	26	0.186	179.250	1.015
27	180.539	109	1.589	0.213	178.950	0.000	27	0.183	179.050	1.015
28	180.360	105	1.610	0.210	178.750	0.000	28	0.179	178.850	1.015
29	180.185	101	1.635	0.207	178.550	0.000	29	0.175	178.650	1.015
30	180.014	96	1.664	0.203	178.350	0.000	30	0.170	178.450	1.015
Avl	179.850						31	0.164	178.250	1.015
	Cote Van		Sans							



Paramètres de fonctionnement : NOMINALE										
	Niveau d'eau	P/v (W/m3)	Tmoy (m)	Vit. Débitante	Cote radier mi-bassin	Débit d'Attrait	Cloison N°	Chute (m)	Cote radier amont paroi	Débit (m3/s)
Amt	186.150									
1	185.950	125	1.800	0.223	184.150	0.000	1	0.200	184.250	1.205
2	185.750	125	1.800	0.223	183.950	0.000	2	0.200	184.050	1.205
3	185.550	125	1.800	0.223	183.750	0.000	3	0.200	183.850	1.205
4	185.350	125	1.800	0.223	183.550	0.000	4	0.200	183.650	1.205
5	185.150	125	1.799	0.223	183.350	0.000	5	0.200	183.450	1.205
6	184.949	125	1.799	0.223	183.150	0.000	6	0.200	183.250	1.205
7	184.749	125	1.799	0.223	182.950	0.000	7	0.200	183.050	1.205
8	184.549	125	1.799	0.223	182.750	0.000	8	0.200	182.850	1.205
9	184.349	125	1.799	0.223	182.550	0.000	9	0.200	182.650	1.205
10	184.148	125	1.798	0.223	182.350	0.000	10	0.200	182.450	1.205
11	183.948	125	1.798	0.223	182.150	0.000	11	0.200	182.250	1.205
12	183.748	125	1.798	0.223	181.950	0.000	12	0.200	182.050	1.205
13	183.547	125	1.797	0.223	181.750	0.000	13	0.201	181.850	1.205
14	183.347	125	1.797	0.224	181.550	0.000	14	0.201	181.650	1.205
15	183.146	125	1.796	0.224	181.350	0.000	15	0.201	181.450	1.205
16	182.945	126	1.795	0.224	181.150	0.000	16	0.201	181.250	1.205
17	182.744	126	1.794	0.224	180.950	0.000	17	0.201	181.050	1.205
18	182.542	126	1.792	0.224	180.750	0.000	18	0.201	180.850	1.205
19	182.341	126	1.791	0.224	180.550	0.000	19	0.202	180.650	1.205
20	182.139	127	1.789	0.224	180.350	0.000	20	0.202	180.450	1.205
21	181.936	127	1.786	0.225	180.150	0.000	21	0.202	180.250	1.205
22	181.733	128	1.783	0.225	179.950	0.000	22	0.203	180.050	1.205
23	181.530	128	1.780	0.226	179.750	0.000	23	0.204	179.850	1.205
24	181.325	129	1.775	0.226	179.550	0.000	24	0.204	179.650	1.205
25	181.120	130	1.770	0.227	179.350	0.000	25	0.205	179.450	1.205
26	180.913	131	1.763	0.228	179.150	0.000	26	0.207	179.250	1.205
27	180.705	133	1.755	0.229	178.950	0.000	27	0.208	179.050	1.205
28	180.495	135	1.745	0.230	178.750	0.000	28	0.210	178.850	1.205
29	180.283	137	1.733	0.232	178.550	0.000	29	0.212	178.650	1.205
30	180.068	140	1.718	0.234	178.350	0.000	30	0.215	178.450	1.205
31							31	0.218	178.250	1.205
Avl	179.850									
	Cote Van		Sans							

Paramètres de fonctionnement : HAUTE										
	Niveau d'eau	P/v (W/m3)	Tmoy (m)	Vit. Débitante	Cote radier mi-bassin	Débit d'Attrait	Cloison N°	Chute (m)	Cote radier amont paroi	Débit (m3/s)
Amt	186.350									
1	186.150	124	2.000	0.222	184.150	0.000	1	0.200	184.250	1.332
2	185.949	124	1.999	0.222	183.950	0.000	2	0.200	184.050	1.332
3	185.749	124	1.999	0.222	183.750	0.000	3	0.200	183.850	1.332
4	185.549	124	1.999	0.222	183.550	0.000	4	0.200	183.650	1.332
5	185.348	124	1.998	0.222	183.350	0.000	5	0.200	183.450	1.332
6	185.148	124	1.998	0.222	183.150	0.000	6	0.201	183.250	1.332
7	184.947	124	1.997	0.222	182.950	0.000	7	0.201	183.050	1.332
8	184.747	125	1.997	0.222	182.750	0.000	8	0.201	182.850	1.332
9	184.546	125	1.996	0.222	182.550	0.000	9	0.201	182.650	1.332
10	184.345	125	1.995	0.223	182.350	0.000	10	0.201	182.450	1.332
11	184.143	125	1.993	0.223	182.150	0.000	11	0.201	182.250	1.332
12	183.942	125	1.992	0.223	181.950	0.000	12	0.202	182.050	1.332
13	183.740	126	1.990	0.223	181.750	0.000	13	0.202	181.850	1.332
14	183.538	126	1.988	0.223	181.550	0.000	14	0.202	181.650	1.332
15	183.335	126	1.985	0.224	181.350	0.000	15	0.203	181.450	1.332
16	183.132	127	1.982	0.224	181.150	0.000	16	0.203	181.250	1.332
17	182.929	128	1.979	0.224	180.950	0.000	17	0.204	181.050	1.332
18	182.724	128	1.974	0.225	180.750	0.000	18	0.204	180.850	1.332
19	182.519	129	1.969	0.225	180.550	0.000	19	0.205	180.650	1.332
20	182.313	130	1.963	0.226	180.350	0.000	20	0.206	180.450	1.332
21	182.106	131	1.956	0.227	180.150	0.000	21	0.207	180.250	1.332
22	181.897	133	1.947	0.228	179.950	0.000	22	0.209	180.050	1.332
23	181.686	135	1.936	0.229	179.750	0.000	23	0.211	179.850	1.332
24	181.473	137	1.923	0.231	179.550	0.000	24	0.213	179.650	1.332
25	181.257	140	1.907	0.233	179.350	0.000	25	0.216	179.450	1.332
26	181.038	144	1.888	0.235	179.150	0.000	26	0.219	179.250	1.332
27	180.815	149	1.865	0.238	178.950	0.000	27	0.223	179.050	1.332
28	180.586	154	1.836	0.242	178.750	0.000	28	0.229	178.850	1.332
29	180.351	162	1.801	0.247	178.550	0.000	29	0.236	178.650	1.332
30	180.106	173	1.756	0.253	178.350	0.000	30	0.244	178.450	1.332
31							31	0.256	178.250	1.332
Avl	179.850									
	Cote Van		Sans							

Paramètres de fonctionnement : MAXI										
	Niveau d'eau	P/v (W/m3)	Tmoy (m)	Vit. Débitante	Cote radier mi-bassin	Débit d'Attrait	Cloison N°	Chute (m)	Cote radier amont paroi	Débit (m3/s)
Amt	186.550									
1	186.350	124	2.200	0.221	184.150	0.000	1	0.200	184.250	1.460
2	186.149	124	2.199	0.221	183.950	0.000	2	0.201	184.050	1.460
3	185.948	124	2.198	0.221	183.750	0.000	3	0.201	183.850	1.460
4	185.748	124	2.198	0.221	183.550	0.000	4	0.201	183.650	1.460
5	185.547	124	2.197	0.221	183.350	0.000	5	0.201	183.450	1.460
6	185.346	124	2.196	0.222	183.150	0.000	6	0.201	183.250	1.460
7	185.145	125	2.195	0.222	182.950	0.000	7	0.201	183.050	1.460
8	184.943	125	2.193	0.222	182.750	0.000	8	0.201	182.850	1.460
9	184.741	125	2.191	0.222	182.550	0.000	9	0.202	182.650	1.460
10	184.539	125	2.189	0.222	182.350	0.000	10	0.202	182.450	1.460
11	184.337	126	2.187	0.222	182.150	0.000	11	0.202	182.250	1.460
12	184.134	126	2.184	0.223	181.950	0.000	12	0.203	182.050	1.460
13	183.931	127	2.181	0.223	181.750	0.000	13	0.203	181.850	1.460
14	183.727	127	2.177	0.223	181.550	0.000	14	0.204	181.650	1.460
15	183.523	128	2.173	0.224	181.350	0.000	15	0.204	181.450	1.460
16	183.317	129	2.167	0.224	181.150	0.000	16	0.205	181.250	1.460
17	183.111	130	2.161	0.225	180.950	0.000	17	0.206	181.050	1.460
18	182.904	131	2.154	0.226	180.750	0.000	18	0.207	180.850	1.460
19	182.695	132	2.145	0.227	180.550	0.000	19	0.209	180.650	1.460
20	182.484	134	2.134	0.228	180.350	0.000	20	0.210	180.450	1.460
21	182.272	136	2.122	0.229	180.150	0.000	21	0.212	180.250	1.460
22	182.057	139	2.107	0.231	179.950	0.000	22	0.215	180.050	1.460
23	181.839	142	2.089	0.233	179.750	0.000	23	0.218	179.850	1.460
24	181.618	145	2.068	0.235	179.550	0.000	24	0.221	179.650	1.460
25	181.392	150	2.042	0.238	179.350	0.000	25	0.226	179.450	1.460
26	181.161	156	2.011	0.242	179.150	0.000	26	0.231	179.250	1.460
27	180.924	164	1.974	0.247	178.950	0.000	27	0.238	179.050	1.460
28	180.677	174	1.927	0.252	178.750	0.000	28	0.247	178.850	1.460
29	180.419	188	1.869	0.260	178.550	0.000	29	0.258	178.650	1.460
30	180.145	207	1.795	0.271	178.350	0.000	30	0.274	178.450	1.460
31							31	0.295	178.250	1.460
Avl	179.850									
	Cote Van		Sans							

**ANNEXE 2 – calcul des lignes d'eau dans la passe rive droite**

Caractéristiques géométriques de Marcko rive droite

	Surf Orif	Mu Orif	Larg. Fent	Mu Fent	Cote dév Fente	Cote Rad amt pa.	Cote Rad mi-bas.	Long Bas.	Larg Bas.	Larg Ech 1	Alpha Ech 1	Bêta Ech 1	Cote seuil Ech 1
1	0.000	0.000	0.400	0.800	177.900	177.900	177.800	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	180.500
2	0.000	0.000	0.400	0.800	177.700	177.700	177.600	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	180.000
3	0.000	0.000	0.400	0.800	177.500	177.500	177.400	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	179.800
4	0.000	0.000	0.400	0.800	177.300	177.300	177.200	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	179.600
5	0.000	0.000	0.400	0.800	177.100	177.100	177.000	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	179.400
6	0.000	0.000	0.400	0.800	176.900	176.900	176.800	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	179.200
7	0.000	0.000	0.400	0.800	176.700	176.700	176.600	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	179.000
8	0.000	0.000	0.400	0.800	176.500	176.500	176.400	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	178.800
9	0.000	0.000	0.400	0.800	176.300	176.300	176.200	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	178.600
10	0.000	0.000	0.400	0.800	176.100	176.100	176.000	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	178.400
11	0.000	0.000	0.400	0.800	175.900	175.900	175.800	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	178.200
12	0.000	0.000	0.400	0.800	175.700	175.700	175.600	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	178.000
13	0.000	0.000	0.400	0.800	175.500	175.500	175.400	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	177.800
14	0.000	0.000	0.400	0.800	175.300	175.300	175.200	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	177.600
15	0.000	0.000	0.400	0.800	175.100	175.100	175.000	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	177.400
16	0.000	0.000	0.400	0.800	174.900	174.900	174.800	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	177.200
17	0.000	0.000	0.400	0.800	174.700	174.700	174.600	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	177.000
18	0.000	0.000	0.400	0.800	174.500	174.500	174.400	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	176.800
19	0.000	0.000	0.400	0.800	174.300	174.300	174.200	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	176.600
20	0.000	0.000	0.400	0.800	174.100	174.100	174.000	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	176.400
21	0.000	0.000	0.400	0.800	173.900	173.900	173.800	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	176.200
22	0.000	0.000	0.400	0.800	173.700	173.700	173.600	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	176.000
23	0.000	0.000	0.400	0.800	173.500	173.500	173.400	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	175.800
24	0.000	0.000	0.400	0.800	173.300	173.300	173.200	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	175.600
25	0.000	0.000	0.400	0.800	173.100	173.100	173.000	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	175.400
26	0.000	0.000	0.400	0.800	172.900	172.900	172.800	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	175.200
27	0.000	0.000	0.400	0.800	172.700	172.700	172.600	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	175.000
28	0.000	0.000	0.400	0.800	172.500	172.500	172.400	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	174.800
29	0.000	0.000	0.400	0.800	172.300	172.300	172.200	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	174.600
30	0.000	0.000	0.400	0.800	172.100	172.100	172.000	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	174.400
31	0.000	0.000	0.400	0.800	171.900	171.900	171.800	5.250	3.000	2.220	0.400	0.000	174.200
32	0.000	0.000	0.400	0.800	171.700	171.700	171.700	9.900	4.000	2.220	0.400	0.000	174.000
33	0.000	0.000	0.800	0.800	170.700	170.700				0.000	0.400	0.000	0.000

Vanne : Sans

Paramètres de fonctionnement : Ligne nominale aval bas										
	Niveau d'eau	P/v (W/m3)	Tmoy (m)	Vit. Débitante	Cote radier mi-bassin	Débit d'Attrait	Cloison N°	Chute (m)	Cote radier amont paroi	Débit (m3/s)
Amt	179.800									
1	179.600	125	1.800	0.223	177.800	0.000	1	0.200	177.900	1.204
2	179.400	125	1.800	0.223	177.600	0.000	2	0.200	177.700	1.204
3	179.200	125	1.800	0.223	177.400	0.000	3	0.200	177.500	1.204
4	179.000	125	1.800	0.223	177.200	0.000	4	0.200	177.300	1.204
5	178.800	125	1.800	0.223	177.000	0.000	5	0.200	177.100	1.204
6	178.600	125	1.800	0.223	176.800	0.000	6	0.200	176.900	1.204
7	178.400	125	1.800	0.223	176.600	0.000	7	0.200	176.700	1.204
8	178.200	125	1.800	0.223	176.400	0.000	8	0.200	176.500	1.204
9	178.000	124	1.800	0.223	176.200	0.000	9	0.200	176.300	1.204
10	177.800	124	1.800	0.223	176.000	0.000	10	0.200	176.100	1.204
11	177.600	124	1.800	0.223	175.800	0.000	11	0.200	175.900	1.204
12	177.400	124	1.800	0.223	175.600	0.000	12	0.200	175.700	1.204
13	177.200	124	1.800	0.223	175.400	0.000	13	0.200	175.500	1.204
14	177.000	124	1.800	0.223	175.200	0.000	14	0.200	175.300	1.204
15	176.800	124	1.800	0.223	175.000	0.000	15	0.200	175.100	1.204
16	176.600	124	1.800	0.223	174.800	0.000	16	0.200	174.900	1.204
17	176.400	124	1.800	0.223	174.600	0.000	17	0.200	174.700	1.204
18	176.201	124	1.801	0.223	174.400	0.000	18	0.200	174.500	1.204
19	176.001	124	1.801	0.223	174.200	0.000	19	0.200	174.300	1.204
20	175.801	124	1.801	0.223	174.000	0.000	20	0.200	174.100	1.204
21	175.601	124	1.801	0.223	173.800	0.000	21	0.200	173.900	1.204
22	175.401	124	1.801	0.223	173.600	0.000	22	0.200	173.700	1.204
23	175.202	124	1.802	0.223	173.400	0.000	23	0.200	173.500	1.204
24	175.002	124	1.802	0.223	173.200	0.000	24	0.200	173.300	1.204
25	174.802	124	1.802	0.223	173.000	0.000	25	0.200	173.100	1.204
26	174.603	124	1.803	0.223	172.800	0.000	26	0.200	172.900	1.204
27	174.403	124	1.803	0.223	172.600	0.000	27	0.199	172.700	1.204
28	174.204	124	1.804	0.223	172.400	0.000	28	0.199	172.500	1.204
29	174.005	124	1.805	0.222	172.200	0.000	29	0.199	172.300	1.204
30	173.806	124	1.806	0.222	172.000	0.000	30	0.199	172.100	1.204
31	173.607	82	1.807	0.222	171.800	0.000	31	0.199	171.900	1.204
32	173.408	34	1.708	0.176	171.700	2.300	32	0.199	171.700	1.204
33							33	0.208	170.700	3.504
Avl	173.200									
	Cote Van		Sans							

Paramètres de fonctionnement : Ligne nominale aval haut										
	Niveau d'eau	P/v (W/m3)	Tmoy (m)	Vit. Débitante	Cote radier mi-bassin	Débit d'Attrait	Cloison N°	Chute (m)	Cote radier amont paroi	Débit (m3/s)
Amt	179.800									
1	179.601	124	1.801	0.223	177.800	0.000	1	0.199	177.900	1.203
2	179.401	124	1.801	0.223	177.600	0.000	2	0.199	177.700	1.203
3	179.202	124	1.802	0.222	177.400	0.000	3	0.199	177.500	1.203
4	179.003	123	1.803	0.222	177.200	0.000	4	0.199	177.300	1.203
5	178.805	123	1.805	0.222	177.000	0.000	5	0.199	177.100	1.203
6	178.607	123	1.807	0.222	176.800	0.000	6	0.198	176.900	1.203
7	178.409	122	1.809	0.222	176.600	0.000	7	0.198	176.700	1.203
8	178.211	122	1.811	0.221	176.400	0.000	8	0.198	176.500	1.203
9	178.014	122	1.814	0.221	176.200	0.000	9	0.197	176.300	1.203
10	177.818	121	1.818	0.221	176.000	0.000	10	0.196	176.100	1.203
11	177.622	120	1.822	0.220	175.800	0.000	11	0.196	175.900	1.203
12	177.427	119	1.827	0.219	175.600	0.000	12	0.195	175.700	1.203
13	177.234	118	1.834	0.219	175.400	0.000	13	0.194	175.500	1.203
14	177.041	117	1.841	0.218	175.200	0.000	14	0.192	175.300	1.203
15	176.850	115	1.850	0.217	175.000	0.000	15	0.191	175.100	1.203
16	176.661	114	1.861	0.215	174.800	0.000	16	0.189	174.900	1.203
17	176.474	112	1.874	0.214	174.600	0.000	17	0.187	174.700	1.203
18	176.289	109	1.889	0.212	174.400	0.000	18	0.185	174.500	1.203
19	176.108	107	1.908	0.210	174.200	0.000	19	0.182	174.300	1.203
20	175.929	103	1.929	0.208	174.000	0.000	20	0.178	174.100	1.203
21	175.754	100	1.954	0.205	173.800	0.000	21	0.175	173.900	1.203
22	175.584	96	1.984	0.202	173.600	0.000	22	0.170	173.700	1.203
23	175.418	92	2.018	0.199	173.400	0.000	23	0.166	173.500	1.203
24	175.258	87	2.058	0.195	173.200	0.000	24	0.160	173.300	1.203
25	175.103	82	2.103	0.191	173.000	0.000	25	0.155	173.100	1.203
26	174.955	77	2.155	0.186	172.800	0.000	26	0.148	172.900	1.203
27	174.814	71	2.214	0.181	172.600	0.000	27	0.141	172.700	1.203
28	174.681	65	2.281	0.176	172.400	0.000	28	0.133	172.500	1.203
29	174.572	51	2.372	0.169	172.200	0.000	29	0.109	172.300	1.203
30	174.495	34	2.495	0.161	172.000	0.000	30	0.077	172.100	1.203
31	174.444	14	2.644	0.152	171.800	0.000	31	0.051	171.900	1.203
32	174.411	3	2.711	0.111	171.700	2.300	32	0.033	171.700	1.203
Avl	174.300						33	0.111	170.700	3.503
	Cote Van	Sans								

**ANNEXE 3 – Cassiopée : calcul des lignes d'eau dans la passe rive gauche**



Caractéristiques géométriques de Marcko rive gauche

	Surf Orif	Mu Orif	Larg. Fent	Mu Fent	Cote dév Fente	Cote Rad amt pa.	Cote Rad mi-bas.	Long Bas.	Larg Bas.	Larg Ech 1	Alpha Ech 1	Béta Ech 1	Cote seuil Ech 1
1	0.000	0.000	0.400	0.800	177.300	177.300				2.220	0.400	0.000	179.600
2	0.000	0.000	0.400	0.800	177.100	177.100	177.200	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	179.200
3	0.000	0.000	0.400	0.800	176.900	176.900	177.000	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	179.000
4	0.000	0.000	0.400	0.800	176.700	176.700	176.800	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	178.800
5	0.000	0.000	0.400	0.800	176.500	176.500	176.600	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	178.600
6	0.000	0.000	0.400	0.800	176.300	176.300	176.400	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	178.400
7	0.000	0.000	0.400	0.800	176.100	176.100	176.200	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	178.200
8	0.000	0.000	0.400	0.800	175.900	175.900	176.000	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	178.000
9	0.000	0.000	0.400	0.800	175.700	175.700	175.800	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	177.800
10	0.000	0.000	0.400	0.800	175.500	175.500	175.600	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	177.600
11	0.000	0.000	0.400	0.800	175.300	175.300	175.400	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	177.400
12	0.000	0.000	0.400	0.800	175.100	175.100	175.200	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	177.200
13	0.000	0.000	0.400	0.800	174.900	174.900	175.000	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	177.000
14	0.000	0.000	0.400	0.800	174.700	174.700	174.800	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	176.800
15	0.000	0.000	0.400	0.800	174.500	174.500	174.600	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	176.600
16	0.000	0.000	0.400	0.800	174.300	174.300	174.400	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	176.400
17	0.000	0.000	0.400	0.800	174.100	174.100	174.200	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	176.200
18	0.000	0.000	0.400	0.800	173.900	173.900	174.000	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	176.000
19	0.000	0.000	0.400	0.800	173.700	173.700	173.800	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	175.800
20	0.000	0.000	0.400	0.800	173.500	173.500	173.600	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	175.600
21	0.000	0.000	0.400	0.800	173.300	173.300	173.400	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	175.400
22	0.000	0.000	0.400	0.800	173.100	173.100	173.200	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	175.200
23	0.000	0.000	0.400	0.800	172.900	172.900	173.000	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	175.000
24	0.000	0.000	0.400	0.800	172.700	172.700	172.800	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	174.800
25	0.000	0.000	0.400	0.800	172.500	172.500	172.600	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	174.600
26	0.000	0.000	0.400	0.800	172.300	172.300	172.400	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	174.400
27	0.000	0.000	0.400	0.800	172.100	172.100	172.200	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	174.200
28	0.000	0.000	0.400	0.800	171.900	171.900	172.000	3.500	3.000	2.220	0.400	0.000	174.000
29	0.000	0.000	0.400	0.800	171.700	171.700	171.800	4.650	3.500	2.220	0.400	0.000	173.800
30	0.000	0.000	0.800	0.800	170.700	170.700	171.000	7.000	4.000	0.000	0.400	0.000	0.000

Vanne : Sans

Paramètres de fonctionnement : Ligne nominale aval bas										
	Niveau d'eau	P/v (W/m3)	Tmoy (m)	Vit. Débitante	Cote radier mi-bassin	Débit d'Attrait	Cloison N°	Chute (m)	Cote radier amont paroi	Débit (m3/s)
Amt	179.200									
1	179.000	125	1.800	0.223	177.200	0.000	1	0.200	177.300	1.204
2	178.800	125	1.800	0.223	177.000	0.000	2	0.200	177.100	1.204
3	178.600	125	1.800	0.223	176.800	0.000	3	0.200	176.900	1.204
4	178.400	125	1.800	0.223	176.600	0.000	4	0.200	176.700	1.204
5	178.200	125	1.800	0.223	176.400	0.000	5	0.200	176.500	1.204
6	178.000	124	1.800	0.223	176.200	0.000	6	0.200	176.300	1.204
7	177.800	124	1.800	0.223	176.000	0.000	7	0.200	176.100	1.204
8	177.600	124	1.800	0.223	175.800	0.000	8	0.200	175.900	1.204
9	177.400	124	1.800	0.223	175.600	0.000	9	0.200	175.700	1.204
10	177.200	124	1.800	0.223	175.400	0.000	10	0.200	175.500	1.204
11	177.000	124	1.800	0.223	175.200	0.000	11	0.200	175.300	1.204
12	176.800	124	1.800	0.223	175.000	0.000	12	0.200	175.100	1.204
13	176.600	124	1.800	0.223	174.800	0.000	13	0.200	174.900	1.204
14	176.400	124	1.800	0.223	174.600	0.000	14	0.200	174.700	1.204
15	176.201	124	1.801	0.223	174.400	0.000	15	0.200	174.500	1.204
16	176.001	124	1.801	0.223	174.200	0.000	16	0.200	174.300	1.204
17	175.801	124	1.801	0.223	174.000	0.000	17	0.200	174.100	1.204
18	175.601	124	1.801	0.223	173.800	0.000	18	0.200	173.900	1.204
19	175.401	124	1.801	0.223	173.600	0.000	19	0.200	173.700	1.204
20	175.202	124	1.802	0.223	173.400	0.000	20	0.200	173.500	1.204
21	175.002	124	1.802	0.223	173.200	0.000	21	0.200	173.300	1.204
22	174.802	124	1.802	0.223	173.000	0.000	22	0.200	173.100	1.204
23	174.603	124	1.803	0.223	172.800	0.000	23	0.200	172.900	1.204
24	174.403	124	1.803	0.223	172.600	0.000	24	0.199	172.700	1.204
25	174.204	124	1.804	0.223	172.400	0.000	25	0.199	172.500	1.204
26	174.005	124	1.805	0.222	172.200	0.000	26	0.199	172.300	1.204
27	173.806	124	1.806	0.222	172.000	0.000	27	0.199	172.100	1.204
28	173.607	79	1.807	0.190	171.800	0.000	28	0.199	171.900	1.204
29	173.408	34	2.408	0.125	171.000	2.300	29	0.199	171.700	1.204
Avl	173.200						30	0.208	170.700	3.504
	Cote Van		Sans							

Paramètres de fonctionnement : Ligne nominale aval haut										
	Niveau d'eau	P/v (W/m3)	Tmoy (m)	Vit. Débitante	Cote radier mi-bassin	Débit d'Attrait	Cloison N°	Chute (m)	Cote radier amont paroi	Débit (m3/s)
Amt	179.200									
1	179.001	124	1.801	0.222	177.200	0.000	1	0.199	177.300	1.202
2	178.802	124	1.802	0.222	177.000	0.000	2	0.199	177.100	1.202
3	178.603	123	1.803	0.222	176.800	0.000	3	0.199	176.900	1.202
4	178.404	123	1.804	0.222	176.600	0.000	4	0.199	176.700	1.202
5	178.206	123	1.806	0.222	176.400	0.000	5	0.198	176.500	1.202
6	178.008	122	1.808	0.222	176.200	0.000	6	0.198	176.300	1.202
7	177.810	122	1.810	0.221	176.000	0.000	7	0.198	176.100	1.202
8	177.613	122	1.813	0.221	175.800	0.000	8	0.197	175.900	1.202
9	177.417	121	1.817	0.221	175.600	0.000	9	0.196	175.700	1.202
10	177.221	120	1.821	0.220	175.400	0.000	10	0.196	175.500	1.202
11	177.026	119	1.826	0.219	175.200	0.000	11	0.195	175.300	1.202
12	176.833	118	1.833	0.219	175.000	0.000	12	0.194	175.100	1.202
13	176.640	117	1.840	0.218	174.800	0.000	13	0.193	174.900	1.202
14	176.449	116	1.849	0.217	174.600	0.000	14	0.191	174.700	1.202
15	176.260	114	1.860	0.215	174.400	0.000	15	0.189	174.500	1.202
16	176.072	112	1.872	0.214	174.200	0.000	16	0.187	174.300	1.202
17	175.887	110	1.887	0.212	174.000	0.000	17	0.185	174.100	1.202
18	175.705	107	1.905	0.210	173.800	0.000	18	0.182	173.900	1.202
19	175.526	104	1.926	0.208	173.600	0.000	19	0.179	173.700	1.202
20	175.351	100	1.951	0.205	173.400	0.000	20	0.175	173.500	1.202
21	175.180	96	1.980	0.202	173.200	0.000	21	0.171	173.300	1.202
22	175.014	92	2.014	0.199	173.000	0.000	22	0.166	173.100	1.202
23	174.855	86	2.055	0.195	172.800	0.000	23	0.159	172.900	1.202
24	174.713	75	2.113	0.190	172.600	0.000	24	0.142	172.700	1.202
25	174.600	57	2.200	0.182	172.400	0.000	25	0.113	172.500	1.202
26	174.520	38	2.320	0.173	172.200	0.000	26	0.080	172.300	1.202
27	174.467	24	2.467	0.162	172.000	0.000	27	0.053	172.100	1.202
28	174.433	9	2.633	0.130	171.800	0.000	28	0.034	171.900	1.202
29	174.411	2	3.411	0.088	171.000	2.300	29	0.022	171.700	1.202
Avl	174.300						30	0.111	170.700	3.502
	Cote Van		Sans							

**ANNEXE 4 – Cassiopée : calcul des lignes d'eau dans la passe de transfert**

Caractéristiques géométriques de Marcko transfert

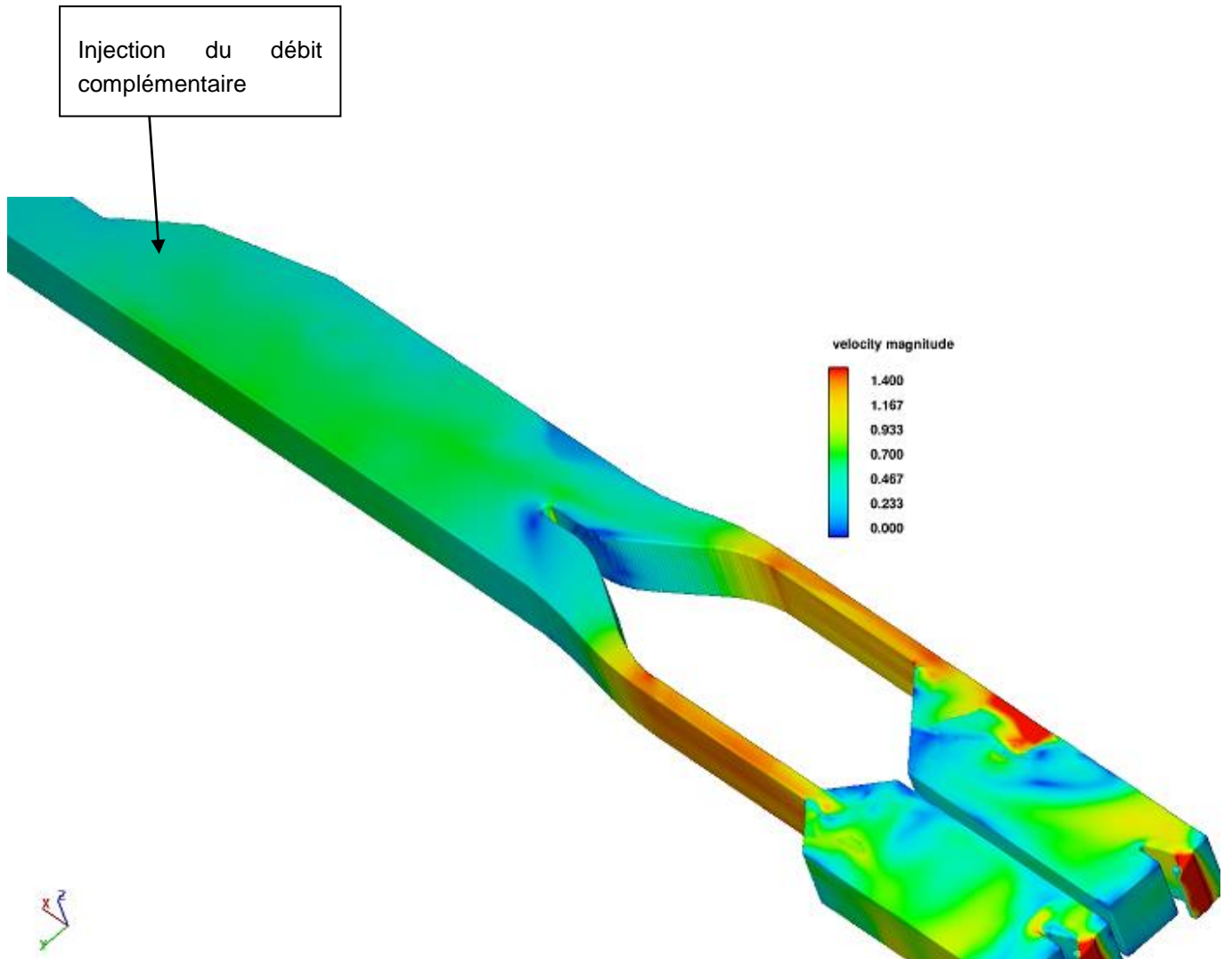
	Surf Orif	Mu Orif	Larg. Fent	Mu Fent	Cote dév Fente	Cote Rad amt pa.	Cote Rad mi-bas.	Long Bas.	Larg Bas.	Larg Ech 1	Alpha Ech 1	Béta Ech 1	Cote seuil Ech 1
1	0.000	0.700	0.400	0.820	177.900	177.900				2.200	0.400	0.000	180.500
2	0.000	0.700	0.400	0.820	177.700	177.700	177.800	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	180.000
3	0.000	0.700	0.400	0.820	177.500	177.500	177.600	3.500	3.000	2.200	0.400	0.000	179.800

Vanne : Sans

Paramètres de fonctionnement : Ligne d'eau N°1

	Niveau d'eau	P/v (W/m3)	Tmoy (m)	Vit. Débitante	Cote radier mi-bassin	Débit d'Attrait	Cloison N°	Chute (m)	Cote radier amont paroi	Débit (m3/s)
Amt	179.800									
1	179.600	128	1.800	0.229	177.800	0.000	1	0.200	177.900	1.236
2	179.400	128	1.800	0.229	177.600	0.000	2	0.200	177.700	1.236
3	179.200						3	0.200	177.500	1.236
Avl	179.200									
	Cote Van		Sans							

**ANNEXE 5 – Flow 3 D : modélisation de l'écoulement au niveau du débit complémentaire**



**ANNEXE 6 – Sensibilité de l’ouvrage aux valeurs extrêmes de niveau**



### Evolutions de l'ouvrage pour les valeurs extrêmes amont

Les valeurs extrêmes conduisent à des débits dans la passe amont de 0,89 m<sup>3</sup>/s pour la cote basse (185,80 NN) et de 1,64 m<sup>3</sup>/s pour la cote haute (186,70 NN).

Pour un débit de 0,9 m<sup>3</sup>/s, la profondeur moyenne dans les bassins sera supérieure ou égale à 1,3 m. La vitesse dans le canal amont-aval sera de 27 cm/s

Pour un débit de 1,46 m<sup>3</sup>/s, la profondeur moyenne dans les bassins sera supérieure ou égale à 2,2 m. La vitesse dans le canal amont-aval sera de 45 cm/s.

Ces paramètres sont acceptables vis-à-vis de la migration des poissons.

Rappelons qu'en aval de l'injection du débit complémentaire, les variations de débit seront compensées par la régulation qui maintiendra un débit total de 2,4 m<sup>3</sup>/s dans les passes (1,2 m<sup>3</sup>/s par rive).

La délivrance de la valeur du débit d'attrait ne sera pas influencée par les valeurs amont extrêmes.

### Evolutions de l'ouvrage pour les valeurs extrêmes aval

Par sécurité, nous allons étudier le cas d'un niveau aval de 172,8 NN.

Lorsque le niveau en aval de l'usine atteint la cote de 172,8 NN, le débit d'attrait délivré par les pompes de la rive gauche et la turbine de la rive droite sera maintenu.

L'analyse que l'on fait ci-après est donc la même pour la rive droite et pour la rive gauche.

Pour un niveau aval de 172,8 NN, les vannes de régulation des entrées piscicoles se positionneront en butée basse soit à la cote 171,3 NN. Dans cette configuration, une vanne délivrera 5 m<sup>3</sup>/s sous une chute de 26 cm, ce qui reste acceptable pour la migration des poissons.

Le niveau en amont des vannes sera donc de 173,06 NN.

Cela majorera légèrement les valeurs des chutes de la partie basse des passes de rive (évolution de 23 cm jusqu'à 20 cm, cf. calcul Cassiopée ci-après). Les chutes restent acceptables.

Les vitesses d'injection des débits d'attrait seront également légèrement majorées tout en restant acceptables (vitesse au travers de la grande grille d'injection 37 cm/s et vitesse au travers de la petite grille d'injection 33 cm/s).

Paramètres de fonctionnement : Ligne nominale aval bas										
	Niveau d'eau	P/v (W/m <sup>3</sup> )	Tmoy (m)	Vit. Débitante	Cote radier mi-bassin	Débit d'Attrait	Cloison N°	Chute (m)	Cote radier amont paroi	Débit (m <sup>3</sup> /s)
Amt	179.800									
1	179.600	125	1.800	0.223	177.800	0.000	1	0.200	177.900	1.205
2	179.400	125	1.800	0.223	177.600	0.000	2	0.200	177.700	1.205
3	179.200	125	1.800	0.223	177.400	0.000	3	0.200	177.500	1.205
4	179.000	125	1.800	0.223	177.200	0.000	4	0.200	177.300	1.205
5	178.800	125	1.800	0.223	177.000	0.000	5	0.200	177.100	1.205
6	178.600	125	1.800	0.223	176.800	0.000	6	0.200	176.900	1.205
7	178.399	125	1.799	0.223	176.600	0.000	7	0.200	176.700	1.205
8	178.199	125	1.799	0.223	176.400	0.000	8	0.200	176.500	1.205
9	177.999	125	1.799	0.223	176.200	0.000	9	0.200	176.300	1.205
10	177.799	125	1.799	0.223	176.000	0.000	10	0.200	176.100	1.205
11	177.598	125	1.798	0.223	175.800	0.000	11	0.200	175.900	1.205
12	177.398	125	1.798	0.223	175.600	0.000	12	0.200	175.700	1.205
13	177.198	125	1.798	0.223	175.400	0.000	13	0.200	175.500	1.205
14	176.997	125	1.797	0.223	175.200	0.000	14	0.201	175.300	1.205
15	176.796	125	1.796	0.224	175.000	0.000	15	0.201	175.100	1.205
16	176.595	125	1.795	0.224	174.800	0.000	16	0.201	174.900	1.205
17	176.394	126	1.794	0.224	174.600	0.000	17	0.201	174.700	1.205
18	176.193	126	1.793	0.224	174.400	0.000	18	0.201	174.500	1.205
19	175.992	126	1.792	0.224	174.200	0.000	19	0.202	174.300	1.205
20	175.790	126	1.790	0.224	174.000	0.000	20	0.202	174.100	1.205
21	175.587	127	1.787	0.225	173.800	0.000	21	0.202	173.900	1.205
22	175.385	127	1.785	0.225	173.600	0.000	22	0.203	173.700	1.205
23	175.181	128	1.781	0.225	173.400	0.000	23	0.203	173.500	1.205
24	174.977	129	1.777	0.226	173.200	0.000	24	0.204	173.300	1.205
25	174.772	130	1.772	0.227	173.000	0.000	25	0.205	173.100	1.205
26	174.566	131	1.766	0.227	172.800	0.000	26	0.206	172.900	1.205
27	174.359	132	1.759	0.228	172.600	0.000	27	0.207	172.700	1.205
28	174.150	134	1.750	0.229	172.400	0.000	28	0.209	172.500	1.205
29	173.939	136	1.739	0.231	172.200	0.000	29	0.211	172.300	1.205
30	173.726	139	1.726	0.233	172.000	0.000	30	0.214	172.100	1.205
31	173.509	95	1.709	0.235	171.800	0.000	31	0.217	171.900	1.205
32	173.288	41	1.588	0.190	171.700	2.300	32	0.221	171.700	1.205
Avl	173.060						33	0.228	170.700	3.505
	Cote Van		Sans							



CHANGER L'ENERGIE ENSEMBLE

## Page d'approbation

### PASSE A POISSONS DE MARCKOLSHEIM – DIMENSIONNEMENT HYDRAULIQUE ET PISCICOLE

Réf. : H-30575713-2022-000004

Indice : A Date : 24/03/2022 Accessibilité : Interne EDF

#### Rédacteur(s) :

- DUMOND Lionel - 24/03/2022

#### Vérificateur(s) :

- MARTINEZ Alban pour le compte de GANT Magali - 24/03/2022

#### Approbateur(s) :

- MARTINEZ Alban pour le compte de MOURRAT Aude - 24/03/2022
- MARTINEZ Alban pour le compte de BROUSSE Guillian - 24/03/2022

EDF SA  
22-30 avenue de Wagram  
75382 Paris Cedex 08 – France  
Capital de 1 549 961 789,50 euros  
552 081 317 R.C.S Paris

[www.edf.fr](http://www.edf.fr)

© EDF -2022. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation.

H-30575713-2022-000004 A approuvé le 24/03/2022 CONSULTABLE EN GED