



HAL
open science

Étude hydraulique de définition de travaux de protection contre les inondations de la Zorn et de la Zinsel-du-Sud (67)

Antoine Bozonnet

► **To cite this version:**

Antoine Bozonnet. Étude hydraulique de définition de travaux de protection contre les inondations de la Zorn et de la Zinsel-du-Sud (67). Sciences de l'ingénieur [physics]. 2015. dumas-01581973

HAL Id: dumas-01581973

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01581973v1>

Submitted on 6 Jan 2022

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

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



Crue de la Zorn d'octobre 1998 à Dettwiller

Etude hydraulique de définition des travaux de lutte contre les inondations de la Zorn et de la Zinsel-du-Sud (67)

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

ANTOINE BOZONNET

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur ENGEES

**Promotion MANCHE
2012 - 2015**

MAITRE DE STAGE : SAMUEL DEHAN

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
1. CONTEXTE DE LA MISSION	2
1.1. LE RISQUE INONDATION : UN RISQUE NATUREL MAJEUR	2
1.2. LOCALISATION DU SECTEUR D'ETUDE	3
1.3. LE CONTEXTE HISTORIQUE DE LA ZORN	3
1.4. LES ETUDES PRECEDENTES SUR LE SECTEUR DE LA HAUTE ZORN	4
1.5. DESCRIPTION DU PROGRAMME D' ACTIONS CONTRE LES INONDATIONS	5
1.5.1. Organisation de la maîtrise d' oeuvre	5
1.5.1.1. VOLET RENATURATION DE COURS D'EAU	6
1.5.1.2. VOLET HYDRAULIQUE	6
1.5.2. Les actions de lutte contre les inondations	7
1.5.2.1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE DES PAPI	7
1.5.2.2. LE PAPI DE LA HAUTE ZORN	7
1.6. OBJECTIFS DE L'ETUDE	8
2. HYDROLOGIE DE LA ZORN	8
2.1. OBJECTIFS ET METHODES	8
2.2. ETUDE HYDROLOGIQUE ARTELIA : METHODE SPEED	9
2.3. ETUDE HYDROLOGIQUE IRSTEA	10
2.3.1. Etude Hydrologique par la méthode SHYREG	10
2.3.2. Etude Hydrologique par la méthode SCHADEX	10
2.4. COMPARAISON DES METHODES ET RESULTATS	10
3. MODELISATION HYDRAULIQUE	13
3.1. LA MODELISATION HYDRAULIQUE DES COURS D'EAU	13
3.2. LE LOGICIEL CARIMA	14
3.2.1.1. PRESENTATION DU LOGICIEL CARIMA	14
3.2.1.2. LES LIMITES DU MODELE NUMERIQUE CARIMA	16
3.3. LE MODELE DE LA ZORN EXISTANT	16
3.4. LE MODELE DE LA ZORN ACTUALISE	17
3.4.1. Affinement du modèle	17
3.4.1.1. CONSTRUCTION DES CASIERS	18
3.4.1.2. CONDITIONS AUX LIMITES DU MODELE	21
3.4.1.3. CONDITIONS INITIALES ET LANCEMENT DU CODE DE CALCUL	24
3.4.2. Calage du modèle	25
3.4.2.1. PRINCIPES DU CALAGE	25
3.4.2.2. CALAGE EN NIVEAU	25
3.4.2.3. CALAGE EN DEBITS	30
3.4.2.4. BILAN DU CALAGE DU MODELE	30
3.4.3. Les limites du modèle de la Zorn mis à jour de 2015	31
3.5. DIAGNOSTIC HYDRAULIQUE	31
3.5.1. Dossenheim	32
3.5.2. Hattmatt	32
3.5.3. Saverne	33
3.5.4. Monswiller	34
3.5.5. Steinbourg	35
3.5.6. Dettwiller	36
4. DEFINITION DES PROTECTIONS RAPPROCHEES	38
4.1. SAVERNE	39

4.2.	MONSWILLER	41
4.3.	STEINBOURG	43
4.4.	DETTWILLER	44
4.5.	DOSENHEIM	46
4.6.	HATTMATT	47
4.7.	IMPACTS DES PROTECTIONS RAPPROCHEES EN AVAL	48
5.	PROTECTION DES CRUES PAR RALENTISSEMENT DYNAMIQUE	50
5.1.	OBJECTIFS DU RALENTISSEMENT DYNAMIQUE	50
5.2.	MODELISATION HYDROLOGIQUE DE LA ZORN	52
5.2.1.	Présentation du logiciel Pluton	52
5.2.2.	Le modèle Pluton de la Zorn	53
5.2.3.	Mise à jour des lois cote – surface	54
5.2.4.	Vérification des emprises des sites de rétention	56
6.	ANALYSE CRITIQUE DES RESULTATS ET PERSPECTIVES	59
6.1.	CRITIQUE DES RESULTATS DE MODELISATION	59
6.2.	LA CONCOMITANCE DES CRUES DE LA ZORN ET DE LA ZINSEL	59
6.3.	ASPECT REGLEMENTAIRE DE LA MAITRISE D'ŒUVRE	60
6.4.	LA COMPENSATION DES AMENAGEMENTS	61
	CONCLUSION	62
	BIBLIOGRAPHIE	64
	ANNEXES	65
	ANNEXE 1 Exemple de propositions d'aménagement de restauration écologique sur le bassin versant de la Haute Zorn, SINBIO	67
	ANNEXE 2 Présentation de la méthode SPEED	71
	ANNEXE 3 Principe de calage de la méthode SHYREG, IRSTEA	75
	ANNEXE 4 Présentation du processus de simulation de crues de la méthode SCHADEX, IRSTEA	79
	ANNEXE 5 Exemples de laisses de crue, crue d'octobre 1998	83
	ANNEXE 6 Plan d'aménagements de protections rapprochées à Saverne dimensionnés au stade APS	87
	ANNEXE 7 Plan d'aménagements de protections rapprochées à Monswiller dimensionnés au stade APS	91
	ANNEXE 8 Plan d'aménagements de protections rapprochées à Steinbourg dimensionnés au stade APS	95

ANNEXE 9 Plan d'aménagements de protections rapprochées à Dettwiller dimensionnés au stade APS	99
ANNEXE 10 Présentation du modèle Pluie – débit PLUTON	103
ANNEXE 11 Présentation du modèle PLUTON de la Zorn	107

TABLEAUX

TABL. 1 - DONNEES DE DEBIT UTILISEES METHODES SPEED, SHYREG ET SCHADEX	11
TABL. 2 - DIFFERENCES RELATIVES DES ESTIMATIONS DE DEBITS POUR LES TROIS BASSINS VERSANTS JAUGES	11
TABL. 3 - ESTIMATION DES DEBITS DE PERIODE DE RETOUR 100 ANS ET 1000 ANS	12
TABL. 4 - DEBITS Q30 POINTS D'INJECTION PAR LES METHODES SPEED, SHYREG ET SCHADEX	13
TABL. 5 - DEBITS Q30 AUX POINTS D'INTERET DU MODELE HYDRAULIQUE	13
TABL. 6 - ETAT DE L'ART DE DIFFERENTS LOGICIELS DE MODELISATION DES COURS D'EAU	14
TABL. 7 - RESULTATS CALAGE MODELE HYDRAULIQUE EN DEBITS ET LAISSES DE CRUE	28
TABL. 8 - ECART POINTS DE CALAGE NIVEAU SUR LA ZINSEL	30
TABL. 9 - ECART POINTS DE CALAGE EN TERMES DE DEBIT	30
TABL. 10 - DIMENSIONS DES AMENAGEMENTS DE PROTECTIONS RAPPROCHEES A SAVERNE, CRUE TRENTENNALE	39
TABL. 11 - IMPACT SUR LA LIGNE D'EAU DES PROTECTIONS RAPPROCHEES A SAVERNE	40
TABL. 12 - DIFFERENCES RESULTATS DE MODELISATION A L'ETAT AMENAGE ENTRE 2010 ET 2015 A SAVERNE	40
TABL. 13 - DIMENSIONS DES AMENAGEMENTS DE PROTECTIONS RAPPROCHEES A MONSWILLER, CRUE TRENTENNALE	41
TABL. 14 - IMPACT SUR LA LIGNE D'EAU DES PROTECTIONS RAPPROCHEES A MONSWILLER	42
TABL. 15 - DIMENSIONS DES AMENAGEMENTS DE PROTECTIONS RAPPROCHEES A STEINBOURG, CRUE TRENTENNALE	44
TABL. 16 - IMPACT SUR LA LIGNE D'EAU DES PROTECTIONS RAPPROCHEES A STEINBOURG	44
TABL. 17 - DIMENSIONS DES AMENAGEMENTS DE PROTECTIONS RAPPROCHEES A DETTWILLER, CRUE TRENTENNALE	45
TABL. 18 - IMPACT SUR LA LIGNE D'EAU DES PROTECTIONS RAPPROCHEES A DETTWILLER	45
TABL. 19 - IMPACT SUR LA LIGNE D'EAU DU RALENTISSEMENT DYNAMIQUE A DOSENHEIM	46
TABL. 20 - IMPACT SUR LA LIGNE D'EAU DU RALENTISSEMENT DYNAMIQUE A HATTMATT	48
TABL. 21 - CARACTERISTIQUES DES SITES DE RALENTISSEMENT DYNAMIQUE DES CRUES POUR UNE CRUE TRENTENNALE	54
TABL. 22 - COMPARAISON DES VOLUMES STOCKES 2010 -2015 AUX COTES DE LA CRUE DE PROJET	55
TABL. 23 - COMPARAISON DES EMPRISES 2010 ET 2015 DES SITES DE RALENTISSEMENT DYNAMIQUE	57

FIGURES

FIG. 1. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ETUDE : LE BASSIN VERSANT DE LA ZORN	3
FIG. 2. LOCALISATION DES AMENAGEMENTS ENVISAGES SUR LE BASSIN VERSANT DE LA HAUTE ZORN	4
FIG. 3. LOCALISATION DES SITES D'ESTIMATION DES DEBITS SUR LE BASSIN VERSANT DE LA ZORN	9
FIG. 4. PRINCIPE DE MODELISATION CARIMA	15
FIG. 5. SCHEMA DES ECOULEMENTS CALCULES DANS CARIMA, ARTELIA	15
FIG. 6. SCHEMA DU MODELE HYDRAULIQUE GLOBAL DE LA ZORN DE 2010	17
FIG. 7. SCHEMA DU MODELE HYDRAULIQUE CARIMA DE LA ZORN 2015	18
FIG. 8. LOCALISATION DU CASIER CR09 LOCALISER A SAVERNE	19
FIG. 9. COMPARAISON DES LOIS COTE-SURFACE CASIER CR09, A SAVERNE	19
FIG. 10. CONSTRUCTION DES LOIS COTE-SURFACE A L'AIDE DE L'OUTIL VERTICAL MAPPER, CASIER CR30 EN AMONT DE DETTWILLER	20
FIG. 11. COMPARAISON LIAISON LIT MINEUR – CASIERS MODELES 2010 – 2015	21
FIG. 12. HYDROGRAMMES INJECTES EN AMONT DE DOSENHEIM DANS LE MODELE HYDRAULIQUE CARIMA	22
FIG. 13. CONDITION AVAL DU MODELE HYDRAULIQUE CARIMA, LIMNIGRAMME	23
FIG. 14. CONDITION AVAL DU MODELE HYDRAULIQUE CARIMA, LIMNIGRAMME	24
FIG. 15. LOCALISATION DES POINTS DE CALAGE DE LA ZORN A DETTWILLER : CRUE 1998, FOND IGN 2010	26
FIG. 16. NIVEAU D'EAU 166,51M ORTHO, DETTWILLER CALAGE CASIER CR35	26
FIG. 17. PHOTO CRUE 1998, DETTWILLER CALAGE CASIER CR35, DDAF SAVERNE	27
FIG. 18. LOCALISATION DES POINTS DE CALAGE ZORN AMONT CRUE 1998, FOND IGN 2010	28
FIG. 19. LOCALISATION DES POINTS DE CALAGE DE LA ZINSEL CRUE 1998, FOND IGN 2010	29
FIG. 20. ENVELOPPE Q100 DE LA ZORN ET LA ZINSEL SUR LE SECTEUR D'ETUDE, DONNEES PPRI DE LA ZORN 2008	32

FIG. 21.	LOCALISATION DE SITES VULNERABLES AUX INONDATIONS A DOSENHEIM-SUR-ZINSEL, FOND IGN 2010	32
FIG. 22.	LOCALISATION DE SITES VULNERABLES AUX INONDATIONS A HATTMATT, FOND IGN 2010	33
FIG. 23.	LOCALISATION DE SITES VULNERABLES AUX INONDATIONS A SAVERNE, FOND IGN 2010	34
FIG. 24.	LOCALISATION DE SITES VULNERABLES AUX INONDATIONS A MONSWILLER, FOND IGN 2010	35
FIG. 25.	LOCALISATION DE SITES VULNERABLES AUX INONDATIONS A STEINBOURG FOND IGN 2010	36
FIG. 26.	LOCALISATION DE SITES VULNERABLES AUX INONDATIONS A DETTWILLER, FOND IGN 2010	37
FIG. 27.	SCHEMA D'EXPLICATION DU PHENOMENE D'INONDATIONS DE LA RUE DE SAVERNE A DETTWILLER	38
FIG. 28.	ELARGISSEMENT DU LIT MINEUR AVEC RISBERME EN RIVE GAUCHE A MONSWILLER, PROFIL MO3	42
FIG. 29.	INONDATION DE 1998 RUE DE LA GARE A STEINBOURG, PHOTO AERIENNE DDAF SAVERNE	43
FIG. 30.	IMPACT DU RALENTISSEMENT DYNAMIQUE A DOSENHEIM	47
FIG. 31.	IMPACT DU RALENTISSEMENT DYNAMIQUE A HATTMATT	48
FIG. 32.	IMPACT DES PROTECTIONS RAPPROCHEES EN AVAL DE DETTWILLER	49
FIG. 33.	EXEMPLE D'OUVRAGE DE RALENTISSEMENT DYNAMIQUE EN AUTRICHE	50
FIG. 34.	SCHEMA D'UN BARRAGE ECRETEUR DE CRUE, GUIDE CEMAGREF 2004	51
FIG. 35.	IMPACT D'UN BARRAGE ECRETEUR DE DEBIT SUR UN HYDROGRAMME	52
FIG. 36.	SCHEMA DE FONCTIONNEMENT PLUTON	53
FIG. 37.	LOI DE STOCKAGE DE LA RETENUE Z10 EN AMONT DE DOSENHEIM	56
FIG. 38.	LOI DE STOCKAGE DE LA RETENUE Z14 EN AMONT DE HATTMATT	56
FIG. 39.	EMPRISE DE LA RETENUE Z2 SUR LA ZINSEL CALCULEE AVEC LE MNT, A LA COTE 208,50M	57
FIG. 40.	EMPRISE DE LA RETENUE Z16 (PLAN D'EAU DE STEINBOURG ACTUEL) SUR LA ZINSEL CALCULEE AVEC LE MNT, A LA COTE 174,90M	58

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier particulièrement Christophe TETE, directeur d'agence, m'ayant permis de réaliser ce stage dans les meilleures conditions. Je remercie aussi Pierre Etienne SCHNEEGANS, responsable du pôle hydraulique fluviale pour sa confiance et sa bonne humeur.

Je remercie aussi Samuel DEHAN pour ses conseils avisés, ses coups de main plus qu'essentiels sur CARIMA et ses remises en question qui m'ont permis d'avancer.

Je remercie Quentin GRAIL pour ses conseils et sa formation à la modélisation.

Merci aussi à toute l'équipe du pôle hydraulique fluviale d'ARTELIA Strasbourg : Quentin D, Sarah G, Maxime H, Rémy C, Cyrielle R, Etienne H., Mélanie B, Virginie M et Marc H pour leur accueil et ce qu'ils m'ont fait apprendre au travail et en dehors.

Merci aux membres du pôle hydraulique urbaine et du pôle AVD qui ont contribué à la bonne ambiance au sein de l'agence.

Je tiens à remercier spécialement le pôle stagiaire composé de Cédric, Cloé, Nicolas et Maximilien avec qui se fut un plaisir de partager le bureau.

Merci à mes collègues de la promotion Manche qui m'ont aidés et soutenu pendant ma formation à l'ENGEES et pendant ce stage.

Il y a aussi des personnes ayant contribué à l'élaboration de ce mémoire sans le savoir : merci aux fidèles de la kanter : Neville, Goulven, PLG, Milan pour m'avoir aidé pendant mais en dehors de ce stage.

Merci à ceux qui ne liront probablement pas ce mémoire, Christophe, Georges, Mélusine qui m'ont inspirés pendant l'écriture de ce mémoire.

Merci à Pierre Brigode qui m'a démontré toute l'originalité qui permet de rendre vivant la lecture d'une thèse.

Enfin je souhaite remercier Coluche pour cette citation qui prend tout son sens en Hydrologie et en Hydraulique : « Les statistiques c'est comme les bikinis, ça donne des idées mais ça cache l'essentiel. ».

RESUME

Etude Hydraulique de définition des travaux de lutte contre les inondations de la Zorn et de la Zinsel-du-Sud (67)

Le bassin versant de la Zorn (67) est soumis à des inondations régulières qui peuvent générer de gros dégâts comme ce fut le cas pour les crues de 1983 et 1998. Les communes situées à l'amont du bassin versant de la Zorn ont été amenées à se regrouper pour former le syndicat intercommunal d'aménagement (SIA) de la Haute Zorn, afin d'avoir une réflexion globale sur le risque inondation. Dès 2002 des études de protections rapprochées ont été menées sur les communes riveraines de la Zorn. Face à la réticence des riverains à la mise en place de protections physiques type murs ou digues entre le lit mineur et les habitations, la stratégie adoptée a été d'étudier le ralentissement dynamique des crues en amont du bassin versant. La mise en place de barrages écrêteurs de crue s'est avérée efficace sur la vallée de la Zinsel (principal affluent de la Zorn), mais inefficace sur la Zorn amont. De ce fait la stratégie adoptée pour la protection contre les inondations consiste à allier ralentissement dynamique et protections rapprochées.

Dans le cadre de la mise en place du PAPI (Programme d'Actions de Prévention des Inondations) de la Haute Zorn labélisé en juillet 2013, ARTELIA s'est vu confier la mission de maîtrise d'œuvre du volet de protection contre les inondations. Ce stage s'inscrit dans ce contexte avec pour objectif l'affinement du modèle hydraulique de la Zorn avec le logiciel CARIMA afin de dimensionner au stade d'avant-projet sommaire des aménagements de protections rapprochées. La redéfinition des volumes disponibles pour les ouvrages écrêteurs de crue, ainsi que la vérification de leurs emprises sont étudiées afin d'affiner le dimensionnement des ouvrages de ralentissement dynamique des crues.

ABSTRACT

Hydraulic study of flood protections of the Zorn and the Zinsel-du-Sud river

The catchment area of the Zorn river is usually in flood which can generate important damages. In order to control this phenomenon of flood, the association of the riverside cities in the upstream part of the catchment decided to work together to imagine solution for all the catchment area. The first studies started in 2002 to think about physics protection (like walls or dikes) between the river and the houses. In front of the opposition of the people of the catchment area were to build physics screens between the houses and the river, the cities began to think about protections using dams of dynamic flood control. In 2010, they decided for a strategy combining dynamic flood control and physics protections to protect them of flood.

Within the framework of the PAPI of High Zorn, cities decided to work with ARTELIA to elaborate the steps of sizing and realisation of civil structures to protect goods and people. This internship consist in modeling the Zorn river in flood with the software CARIMA. It aims at size walls and dikes of protection, in order to evaluate the impact of it on the water line. An update of the sizing of the dams of dynamic flood control is done in order to adjust the strategy of dynamic flood control.

GLOSSAIRE

SOGREAH : Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydraulique, société antérieure à ARTELIA jusqu'en 2010. Certaines références sont faites à des études de SOGREAH car étant réalisées avant 2010.

PAPI : Programme d'Action de Prévention contre les Inondations

APS : Avant Projet Sommaire

SIA Haute Zorn: Syndicat Intercommunal d'Aménagement de la Haute Zorn

SPEED : Système Probabiliste d'Etude par Evènements Discrets : méthode de détermination des débits développée par ARTELIA.

SHYREG : méthode régionalisée de prédétermination des débits de crue développée par IRSTEA en 2012, version régionalisée de la méthode SHYPRE (Simulation d'Hydrogrammes pour la Prédétermination des débits de crue)

SCHADEX : Simulation Climato-Hydrologique pour l'Appréciation des Débits Extrêmes, cette méthode de simulation semi-continue de crues développée par EDF sert entre autre à l'estimation de crues extrêmes pour le dimensionnement des évacuateurs de crue des barrages.

SAGEECE : Schéma d'Aménagement, de Gestion et d'Entretien Ecologique des Cours d'Eau.

MNT : Modèle Numérique de Terrain

INTRODUCTION

Le risque inondation est un risque qui concerne une commune sur trois en France, la surface de 22 000 km² est reconnue comme particulièrement inondable soit plus de deux millions de riverains concernés (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2004). La gestion du risque inondation a été initiée par la loi du 2 février 1995 avec les Plans de Préventions des Risques Inondations (PPRI) qui a permis à l'échelle de la commune de réglementer entre autre l'urbanisation des lits majeurs des cours d'eau. La mise en place des PAPI (Programmes d'Actions de Prévention des Inondations) depuis 2002 est un outil qui permet la gestion des inondations avec une réflexion globale à l'échelle du bassin versant

Le bassin versant de la Zorn se situe au nord-ouest de Strasbourg, dans le département du Bas-Rhin. La Zorn prend sa source à Dabo en Lorraine, en amont de Saverne et se jette dans la Moder au niveau de Rohrwiler après un parcours de 102 km.

Les inondations de la Zorn ont été importantes par le passé, c'est pourquoi la protection des biens et des personnes contre les inondations est une priorité dans l'aménagement du territoire du bassin versant de la Zorn.

Après avoir subi des crues importantes en 1983, 1997 et 1998, la protection contre les inondations est devenue une priorité pour les communes situées dans le bassin versant de la Haute Zorn.

Différentes études ont été menées sur le bassin versant de la Zorn depuis le SAGEECE (Schéma d'Aménagement, de Gestion et d'Entretien Ecologique des Cours d'Eau) établi en 1998, puis des études de protections réalisées à l'échelle des communes.

La réflexion d'une stratégie de protection à l'échelle de l'amont du bassin versant a été initiée dès 2002 avec deux études réalisées par ARTELIA qui ont visé à élaborer des scénarios d'aménagements de réduction de vulnérabilité par des protections rapprochées et de réduction de l'aléa par des ouvrages d'écrêtement des crues.

Le scénario retenu est celui d'une protection contre des crues trentennales par ouvrages de ralentissement dynamique des crues sur la partie amont du bassin versant sur la Zinsel, ainsi que des protections rapprochées sur la partie amont du bassin versant sur la Zorn.

En 2014, la mission de maîtrise d'œuvre complète de travaux de lutte contre les inondations dans le cadre du PAPI de la Haute Zorn s'est vue confiée à ARTELIA.

L'objectif de ce stage est de prendre en compte les nouvelles données disponibles afin d'actualiser le modèle hydraulique existant, ce qui permettra par la suite d'affiner le dimensionnement des ouvrages de protections rapprochées ainsi que les ouvrages de ralentissement dynamique.

1. CONTEXTE DE LA MISSION

1.1. LE RISQUE INONDATION : UN RISQUE NATUREL MAJEUR

Afin d'appréhender le risque inondation, il est nécessaire de définir ce qu'est une inondation.

Une inondation est une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors d'eau. On distingue une inondation d'une crue qui se définit par l'élévation du niveau de la rivière suite à un épisode pluvieux ou une fonte des neiges. Les crues font parties du fonctionnement naturel des rivières, et deviennent des inondations uniquement lorsqu'elles atteignent des zones habituellement hors d'eau.

Les inondations peuvent être classées en deux grands types :

- Les inondations rapides par formation de crues torrentielles :

Suite à des précipitations de grandes intensités qui tombent sur un bassin versant à forte pente, les eaux se concentrent rapidement dans le cours d'eau ce qui entraîne une élévation du niveau d'eau rapide et brutale. Ce type de crue est accompagné d'un fort charriage de sédiments et d'embâcles qui engendre des dégâts importants. Ces inondations sont les plus dangereuses du fait de leur brutalité et de la difficulté de les prévoir, l'exemple le plus frappant reste la crue de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine en 1992.

- Les inondations lentes de plaine :

Suite à des précipitations importantes, le niveau du cours d'eau monte progressivement jusqu'au débordement en lit majeur. La durée de submersion peut être assez longue, ce qui engendre des dégâts importants. Ce type d'inondations est le plus commun en France, telle la crue de la Saône de 1983.

Le risque inondation en France concerne la totalité du territoire. Le type d'inondation majoritairement présent en Alsace est l'inondation de plaine. Le cas de la Zorn correspond à ce type de crue, la majorité du bassin versant se situant en plaine, les inondations ont un temps de submersion important.

1.2. LOCALISATION DU SECTEUR D'ETUDE

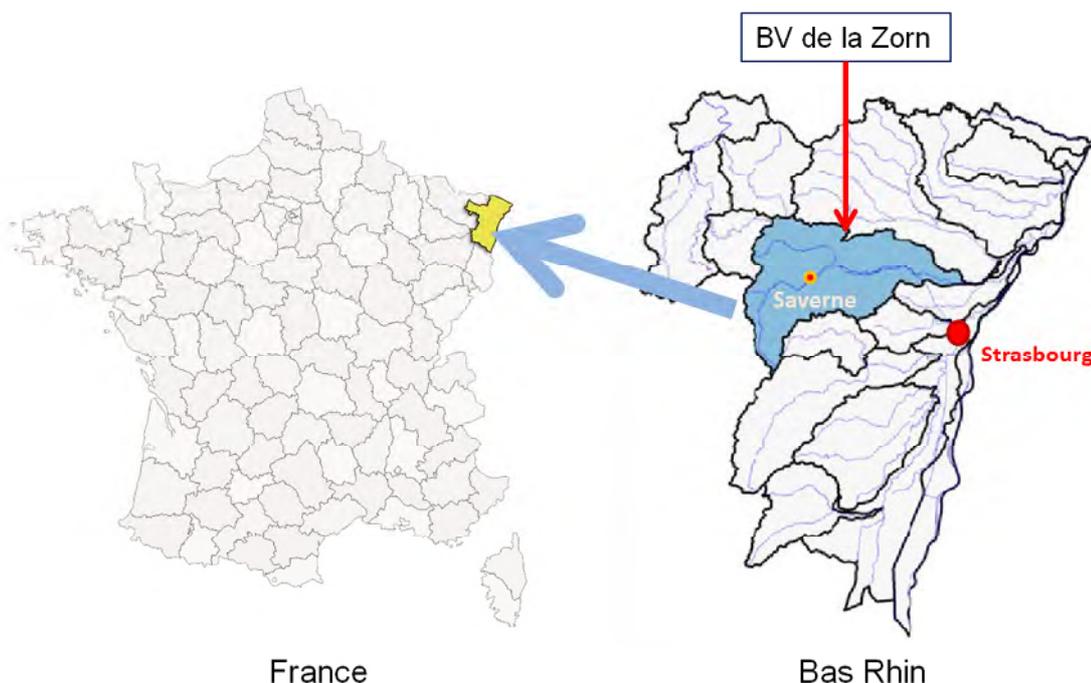


Fig. 1. Localisation géographique de la zone d'étude : le bassin versant de la Zorn

La Zorn naît de la confluence entre la Zorn Blanche et la Zorn Jaune en Lorraine. Le bassin versant de la Zorn a une superficie de 750 km², il comprend 580 km de linéaire de cours d'eau dont 450km dans le Bas-Rhin. Les principaux affluents de la Zorn sont la Zinsel-du-Sud, la Mossel et le Rohrbach. La Zinsel du Sud prend sa source sur le plateau mosellan, et se jette dans la Zorn à Steinbourg après un linéaire de 31 km (Consail Général du Bas Rhin, 2011). La valeur du débit moyen inter-annuel (module) à Saverne est de 2,25 m³/s.

La majorité du bassin versant est occupée par l'agriculture céréalière ainsi que l'élevage. Les villes de Saverne et Brumath sont les principaux pôles urbains du bassin versant.

1.3. LE CONTEXTE HISTORIQUE DE LA ZORN

Le bassin versant de la Zorn subit régulièrement des inondations. Les crues les plus importantes sont les crues 1910, 1947, 1970, 1983, 1990, 1997, 1998, 2001.

Des données de mesures débitométriques sont disponibles à partir de la crue de 1970. La crue la plus importante du bassin versant est la crue de 1983 avec une période de retour estimée à 30 ans à Saverne et inférieure à 100 ans à Waltenheim-sur-Zorn. Ces crues ont entraîné des dégâts importants sur les communes du bassin versant qui ont été amenées à se regrouper afin de gérer le risque inondation.

Le Syndicat Intercommunal d'Aménagement de la Haute Zorn a été ainsi créé pour assurer une meilleure maîtrise des écoulements de la Zorn et de son principal affluent la Zinsel du Sud. Les communes membre du syndicat de la Haute Zorn sont les communes de Dossenheim-sur-Zinsel, Eschbourg, Hattmatt, Ernolsheim-lès-Saverne, Saint Jean de Saverne, Eckartswiller, Reinhardsmunster, Thal Marmoutier, Haegen, Gottenhouse, Otterswiller, Saverne, Monswiller, Steinbourg, Dettwiller, Altenheim, Littenheim et Lupstein.

Suite à l'élaboration du SAGEECE (Schéma d'Aménagement, de Gestion et d'Entretien Ecologique des Cours d'Eau) en 1998, le Syndicat Intercommunal d'Aménagement du Bassin de la Haute Zorn a engagé entre 2002 et 2006 des études de faisabilité pour la réalisation de protections rapprochées afin de protéger les communes de Dettwiller, Steinbourg, Monswiller, Saverne, Otterswiller, Hattmatt, Dossenheim et Oberhof contre les inondations.

Face à la réticence des riverains à la mise en place d'écrans physiques entre la rivière et les habitations, la gestion des crues a été envisagée à l'échelle des bassins versants grâce à des actions de rétention amont.

Une étude de définition d'une stratégie de lutte contre les inondations par ralentissement dynamique a été menée par ARTELIA entre 2006 et 2009 en ciblant des crues d'occurrence trentennale. La stratégie adoptée est celle de mettre en place des ouvrages de ralentissement dynamique sur la vallée de la Zinsel, et de mettre en place des protections rapprochées sur les communes riveraines de la Zorn (où le ralentissement dynamique n'avait pas d'impact).

Le SIA Haute Zorn a ensuite engagé une démarche de Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) labélisé en 2013 afin de proposer un programme global abordant également les thématiques écologiques et hydromorphologiques. ARTELIA s'est vu confié la mission de maîtrise d'œuvre de l'opération.

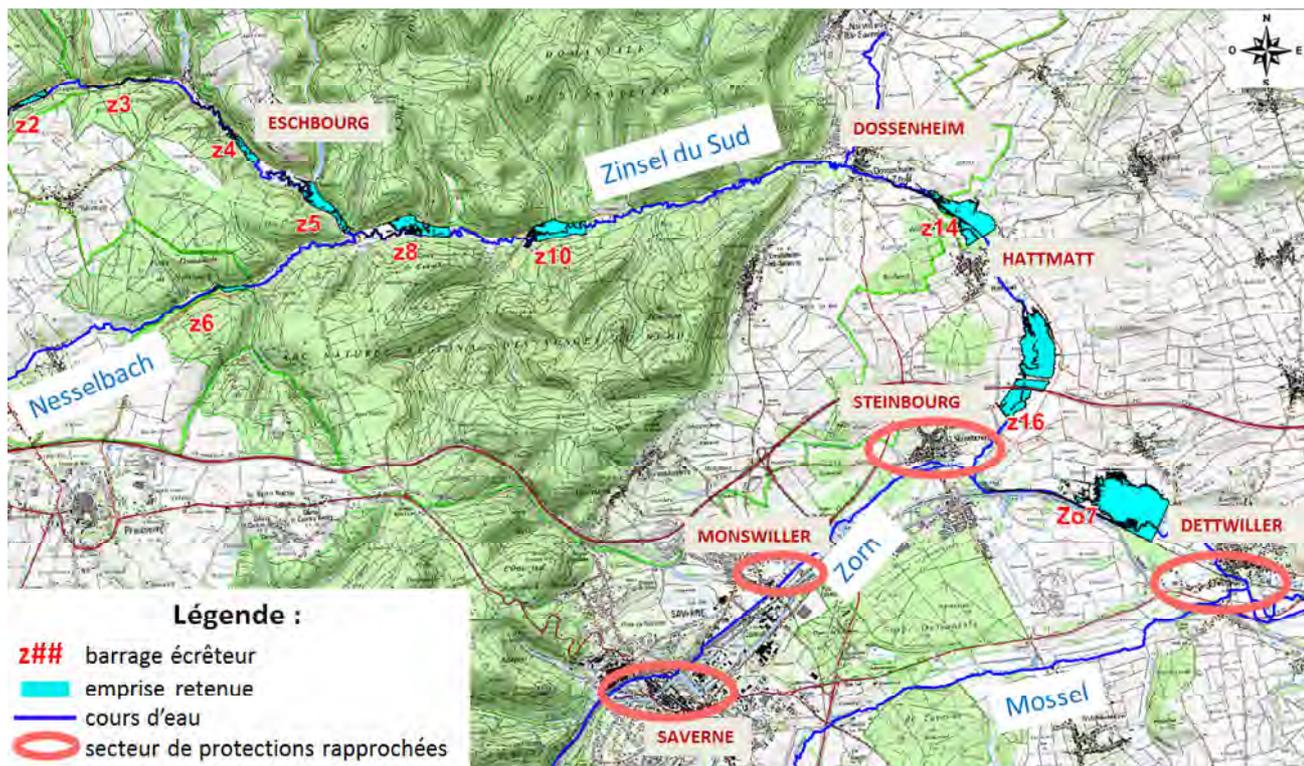


Fig. 2. Localisation des aménagements envisagés sur le bassin versant de la Haute Zorn

1.4. LES ETUDES PRECEDENTES SUR LE SECTEUR DE LA HAUTE ZORN

Le secteur du bassin versant de la Zorn amont est étudié depuis de nombreuses années dont certaines études menées par ARTELIA parmi lesquelles les principales sont les suivantes :

- SAGEECE (Schéma d'Aménagement, de Gestion et d'Entretien Ecologique des Cours d'Eau) de la Zorn, 1998, (ARTELIA, 1998)

Le SAGEECE du bassin versant de la Zorn est la première étude globale du bassin versant. C'est dans le cadre du SAGEECE que le premier modèle hydraulique de la Zorn a été élaboré. Le SAGEECE aborde la thématique des inondations. De plus, il établit un programme d'entretien et de restauration des cours d'eau du bassin versant.

- Etude de faisabilité pour la réalisation d'ouvrages de protection contre les crues de la Zorn sur les communes de Saverne, Monswiller, Steinbourg, Dossenheim, Hattmat, Otterswiller et Dettwiller 2002-2006, (ARTELIA, 2006)

Cette étude s'inscrit dans la continuité du SAGEECE de 1998 avec pour objectif d'étudier la faisabilité des aménagements de lutte contre les inondations proposés lors du SAGEECE. La crue importante ayant eu lieu en 1998 a permis de mettre à jour les données des stations débitométriques et d'actualiser l'hydrologie du modèle hydraulique de la Zorn. De plus, le relevé des laisses de crue de 1998 a permis de construire un modèle d'une bonne précision. Les aménagements de protection proposés sont de type digue, mur et réaménagements d'ouvrages hydrauliques devenus obsolètes.

- Etude de définition d'une stratégie de lutte contre les inondations par ralentissement dynamique, 2008, (ARTELIA, 2008)

Face à la réticence des riverains à la mise en place d'écrans physiques (digues ou murs) entre la rivière et les habitations soumises au risque inondation, l'étude vise à définir la faisabilité de gestion des crues par la mise en place de rétentions à l'amont du bassin versant de la Zorn. La localisation des ouvrages se situe dans la partie amont du bassin versant de la Zorn, sur les bassins versants de la Zinsel-du-Sud et de la Mossel. Les ouvrages les plus performants en termes d'impact sur la ligne d'eau se situent dans la vallée de la Zinsel. Une comparaison coût-efficacité a permis de définir les ouvrages de rétention à retenir.

- Etude d'élaboration d'un programme global d'aménagements contre les inondations sur les communes du bassin de la Haute Zorn. 2010, (ARTELIA, 2010)

Cette étude a pour but d'élaborer une stratégie d'aménagements, en croisant les résultats de l'étude de 2006 sur les protections rapprochées et de 2008 sur le ralentissement dynamique. Deux scénarios sont étudiés (crue trentennale et crue centennale) à la fois sur la faisabilité mais aussi en s'appuyant sur une analyse coûts-bénéfices afin d'estimer le coût des dommages des inondations confronté aux coûts des ouvrages de protection.

Le scénario retenu par le SIA de la Haute Zorn est le programme d'aménagement contre une crue trentennale.

1.5. DESCRIPTION DU PROGRAMME D'ACTIONS CONTRE LES INONDATIONS

1.5.1. Organisation de la maîtrise d'oeuvre

La mission de maîtrise d'oeuvre de protection contre les inondations par ralentissement dynamique s'est vue confiée à ARTELIA en 2014 par le SIA de la Haute Zorn. Cette mission de maîtrise d'oeuvre est gérée en collaboration avec le bureau d'études SINBIO pour le volet renaturation de cours d'eau ainsi qu'avec IRSTEA pour le volet hydrologie.

La partie renaturation de cours d'eau est rapidement détaillée dans le paragraphe 1.5.1, la présentation de la prestation de l'hydrologie par IRSTEA est détaillée dans le paragraphe 1.5.2

1.5.1.1. VOLET RENATURATION DE COURS D'EAU

L'étude menée par SINBIO a été effectuée sur un linéaire de 80km de cours d'eau tout d'abord par une étude cartographique, puis par des sondages terrain. (SINBIO, 2014)

Les principaux problèmes identifiés sont :

- L'uniformisation et banalisation du milieu
- La présence d'ouvrages hydrauliques obstacle à la continuité écologique
- La présence d'espèces exotiques invasives Renouée du Japon, Balsamine, Solidage
- Une artificialisation de berge et passages en souterrains
- L'absence de ripisylve
- Le manque d'entretien de la végétation rivulaire
- La présence de peupliers, résineux, robiniers faux acacias

Le volet renaturation étant secondaire dans la réalisation de ce stage, un exemple de propositions d'aménagement est disponible en annexe 1 mais ces propositions devant être actées avant d'être réalisées, elles n'ont pas été prises en compte dans le modèle hydraulique de la Zorn.

1.5.1.2. VOLET HYDRAULIQUE

Le volet hydraulique de la mission de maîtrise d'œuvre est géré par ARTELIA et IRSTEA.

Le volet Hydrologie est géré par IRSTEA qui affine les résultats de l'étude hydrologique réalisée en 2007 par ARTELIA, via les méthodes SCHADDEX et SHYREG.

La méthode utilisée par ARTELIA est la méthode SPEED, une méthode probabiliste basée sur la théorie du Gradex.

L'objectif est donc à la fois de valider les débits obtenus pour les périodes de retour trentennale et centennale en 2007, mais aussi d'avoir des valeurs de débits millénnales robustes au droit des ouvrages de ralentissement dynamique pour affiner le dimensionnement des déversoirs de sécurité.

L'hydrologie d'un cours d'eau étant un élément primordial dans la modélisation hydraulique des crues, l'hydrologie du bassin versant de la Zorn est détaillée dans le paragraphe 2.

La partie hydraulique s'appuie sur les résultats de l'étude hydrologique menée par IRSTEA. La modélisation hydraulique de la Zorn, le dimensionnement des protections rapprochées ainsi que la modélisation et le dimensionnement des ouvrages de ralentissement dynamique des crues seront effectués par ARTELIA.

La diversité des missions de la maîtrise d'œuvre a impliqué la collaboration de trois entités, SINBIO, IRSTEA et ARTELIA.

1.5.2. Les actions de lutte contre les inondations

1.5.2.1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE DES PAPI

Les Programmes d'Actions de Prévention contre les Inondations (PAPI) ont été créés en 2002, et visent à réduire les conséquences des inondations sur les territoires à travers une approche globale du risque (santé humaine, sécurité des biens, prise en compte de l'activité économique et de l'environnement).

Entre 2003 et 2009, ce sont plus de 50 PAPI qui ont été mis en œuvre sur le territoire français.

Le dispositif des PAPI a été rénové en 2009 afin de prendre en compte la Directive Inondation (Directive européenne 2007/60/CE du 23 octobre 2007).

Le cahier des charges d'un PAPI impose sept axes qui précisent les mesures à mettre en œuvre dans le cadre de la stratégie élaborée :

- Axe 1 : L'amélioration de la connaissance et de la conscience du risque
- Axe 2 : La surveillance, la prévision des crues et des inondations
- Axe 3 : L'alerte et la gestion de crise
- Axe 4 : La prise en compte du risque inondation dans l'urbanisme
- Axe 5 : Les actions de réduction de la vulnérabilité des personnes et des biens
- Axe 6 : Le ralentissement des écoulements
- Axe 7 : La gestion des ouvrages de protection hydraulique

Dans le cadre de la mission qui lui est confiée, ARTELIA est directement concerné par les axes 6 et 7.

1.5.2.2. LE PAPI DE LA HAUTE ZORN

Le PAPI de la Haute Zorn a été initié à la suite des études de faisabilité de 2006 et 2010 réalisées par ARTELIA. Ce PAPI a été labélisé le 10 juillet 2013, porté par le SIA de la Haute Zorn et instruit par la DREAL Alsace (service Milieux et Risque Naturels). Le montant total des actions proposées s'élève à 5 437 000 euros dont 44% sont financés par l'Etat au titre des Fonds de Prévention des Risques Naturels Majeurs, 19% de financements du Conseil Général du Bas-Rhin et un financement à hauteur de 8% par l'agence de l'eau Rhin Meuse. Les 29% restants sont portés par le SIA de la Haute Zorn.

Le programme d'actions contre les inondations (axes 6 et 7) se décompose en trois axes :

- Protection contre les crues d'occurrence trentennale par ralentissement dynamique dans la vallée de la Zinsel du Sud.
- Protections rapprochées dans la vallée de la Zorn où la construction d'ouvrages de ralentissement dynamique serait inefficace
- Sensibilisation du public, l'amélioration du réseau d'alerte, la mise en cohérence des documents d'urbanisme ainsi que l'aide à la réduction de la vulnérabilité des personnes et des biens.

1.6. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Ce stage s'inscrit donc dans la mission de maîtrise d'œuvre confiée à ARTELIA dans laquelle ma contribution concerne la phase d'avant-projet.

Les objectifs de la mission qui m'est confiée sont donc les suivants :

- Actualisation de l'hydrologie de la Zorn, comparaison des méthodes IRSTEA et méthode ARTELIA
- Mise à jour du modèle hydraulique existant en intégrant les nouvelles données disponibles
- Affinement du dimensionnement des protections rapprochées au stade avant-projet
- Mise à jour du modèle hydrologique incluant les nouvelles données et les sites de ralentissement dynamique des crues.

2. HYDROLOGIE DE LA ZORN

2.1. OBJECTIFS ET METHODES

La connaissance de l'hydrologie d'un cours d'eau est primordiale dans la protection contre les inondations. Le secteur d'étude est complexe car les données de débits sont absentes sur le secteur de la Zinsel pour les crues historiques de 1983 et 1998.

Les hydrogrammes obtenus en différents points de la Zorn et de la Zinsel sont essentiels dans la modélisation hydraulique, car ce sont les données d'entrée du modèle.

L'objectif de la maîtrise d'œuvre étant d'avoir des résultats les plus fins possible, une comparaison des différentes méthodes d'évaluation des débits sur le bassin versant de la Zorn permettra d'avoir un modèle hydraulique d'autant plus précis.

Une étude hydrologique menée par ARTELIA en 2007 a permis de connaître les débits de pointes pour différentes périodes de retour grâce à la méthode probabiliste SPEED.

La contribution d'IRSTEA consiste à refaire une étude hydrologique en utilisant deux autres méthodes : la méthode SCHADDEX et la méthode SHYREG. Cet appui permettra de valider et d'affiner les résultats obtenus par la méthode SPEED, mais aussi d'avoir une hydrologie plus fine avec un pas de temps horaire et enfin d'avoir une estimation robuste des débits de période de retour 1000 ans pour dimensionner les évacuateurs de crue.

Mon travail consiste à présenter chaque méthode, à les comparer, puis à sélectionner les conclusions essentielles à utiliser par la suite dans le modèle hydraulique.

L'étude hydrologique est réalisée sur neuf points d'estimation de débit localisés sur la figure suivante :

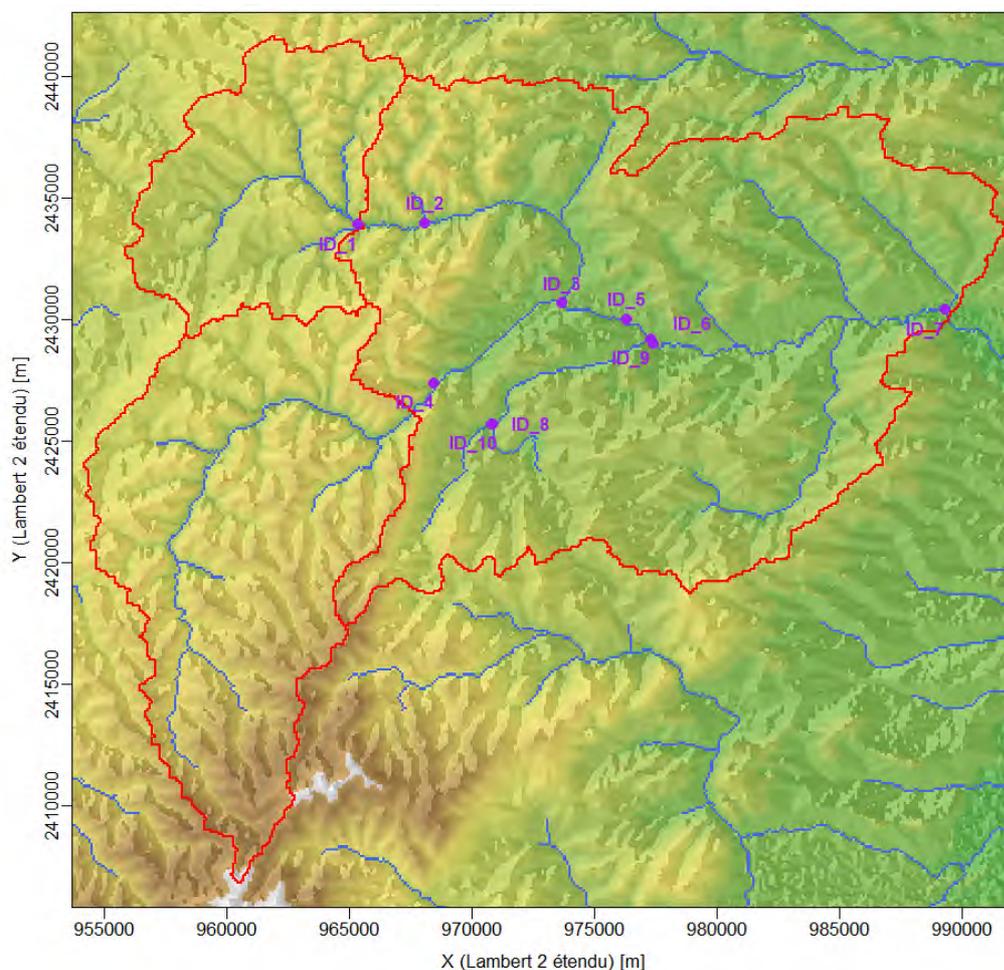


Fig. 3. Localisation des sites d'estimation des débits sur le bassin versant de la Zorn

2.2. ETUDE HYDROLOGIQUE ARTELIA : METHODE SPEED

- Présentation de la méthode SPEED :

La méthode SPEED (Système Probabiliste d'Etude par Evènements Discrets) est une méthode développée par ARTELIA qui consiste à la détermination du débit de période de retour T en se basant sur des séries de données débitométriques (Banque HYDRO) et pluviométriques (Banque Pluvio de météo France).

La méthode SPEED consiste en une corrélation entre les données pluviométriques et les données débitométriques disponibles. Cette corrélation suit la théorie du Gradex avec une prise en compte de la saturation du sol à partir d'une période de retour donnée. L'avantage de cette méthode est la régionalisation de l'étude qui permet la détermination du pivot et de réduire les incertitude de l'ajustement statistique.

Cette méthode passe par une analyse régionale des Pluies, qui permet de déterminer les paramètres du bassin versant que sont le seuil de ruissellement du Gradex, le pivot de distribution, la période de retour minimale du Gradex.

La théorie de la méthode SPEED est présentée plus en détails dans l'annexe 2.

Les résultats de débits sont présentés dans le paragraphe 2.

2.3. ETUDE HYDROLOGIQUE IRSTEA

2.3.1. Etude Hydrologique par la méthode SHYREG

La méthode SHYREG, (version régionalisée de la méthode SHYPRE (Simulation d'Hydrogrammes pour la PRÉdétermination des débits de crue) est développée par l'unité Ouvrages Hydrauliques (OHAX) d'IRSTEA Aix en Provence. Cette méthode s'appuie sur le couplage entre un générateur événementiel de pluie pour décrire le phénomène pluvieux, et un modèle hydrologique pluie-débit simple.

Le principe est de simuler une multitude de scénarios de crues sur un maillage de 1km², à partir desquelles sont extraites certaines caractéristiques telles que les débits instantanés et les lames d'eau écoulées entre 1h et 72h. Les débits à l'exutoire des bassins versants sont agglomérés à l'aide d'une fonction d'abattement statistique. Cette méthode permet d'obtenir des estimations en tout point du réseau hydrographique français de l'aléa pluvial et hydrométrique.

Le calage de la méthode SHYREG est présenté en annexe 3.

2.3.2. Etude Hydrologique par la méthode SCHADEX

La méthode SCHADEX est utilisée depuis plusieurs années par EDF pour dimensionner les évacuateurs de crues de ses barrages (BRIGODE, 2013). Cette méthode permet d'obtenir des distributions de débits journaliers et de débits de pointe pour des périodes de retour élevées telle la crue millénale (IRSTEA, 2015). (cf annexe 4) Le principe est comme avec la méthode SHYREG de simuler une longue série de pluie qui va générer une longue série de débits à partir d'un modèle pluie débit.

La méthode SCHADEX propose une décomposition en 3 parties du processus de crues extrêmes :

- L'aléa pluie forte (générateur de pluie)
- L'aléa saturation des bassins versants (chronique hydroclimatologique)
- La transformation pluie – débit : modèle hydrologique MORDOR

2.4. COMPARAISON DES METHODES ET RESULTATS

Le but de l'étude hydrologique menée par l'IRSTEA est de valider les hypothèses hydrologiques réalisées lors des études précédentes par la méthode SPEED, pour le calcul des débits de période de retour trentennale et centennale.

En effet, les débits trentennaux et centennaux sont les débits pour lesquels il est nécessaire d'être précis avant d'injecter les hydrogrammes dans le modèle hydraulique.

Les données utilisées pour les méthodes SHYREG et SCHADEX sont issues de la banque HYDRO. Les chroniques de débit aux pas des temps horaires et journaliers mesurés sur trois stations hydrométriques du bassin versant de la Zorn. Le tableau 1 présente les données disponibles pour les trois stations. A noter que pour la méthode SPEED les données analysées s'arrêtent à l'année 2006.

Code HYDRO	A3422010	A3430210	A3472010
Nom	Zorn à Saverne	Zinsel à Oberhof	Zorn à Waltenheim
Surface du bassin versant (km ²)	184	89	684
Q moyen (m ³ /s)	2,2	0,9	6,4
Disponibilité des données journalières	01/10/1966 25/09/2014	05/07/2006 01/10/2014	01/01/1958 30/09/2014
Taux de lacunes des données journalières sur la période (%)	0,0	0,1	0,2
Disponibilité des données horaires	09/02/1970 25/09/2014	05/07/2006 01/10/2014	08/12/1983 30/09/2014
Taux de lacunes des données horaires sur la période (%)	1,76	0,0	0,0

Tabl. 1 - Données de débit utilisées méthodes SPEED, SHYREG et SCHADEX

Les trois méthodes présentent des résultats comparables sur les trois bassins versants jaugés qui sont la Zinsel à Oberhof (ID1), la Zorn à Saverne (ID4) et la Zorn à Waltenheim (ID7). Le tableau suivant présente les différences relatives entre les différentes méthodes pour le débit trentennal, centennal et millénal (calculé seulement avec les méthodes IRSTEA)

Différences relatives SCHADEX/SHYREG			
	Q_{P30}	Q_{P100}	Q_{P1000}
ID 1 Zinsel à Oberhof	1,14	1,06	0,98
ID 4 Zorn à Saverne	1,13	1,15	1,24
ID 7 Zorn à Walten.	1,01	0,97	0,93
Différences relatives SHYREG/SPEED			
	Q_{P30}	Q_{P100}	
ID 1 Zinsel à Oberhof	0,84	0,68	
ID 4 Zorn à Saverne	1,03	0,93	
ID 7 Zorn à Walten.	0,84	0,65	
Différences relatives SCHADEX/SPEED			
	Q_{P30}	Q_{P100}	
ID 1 Zinsel à Oberhof	0,96	0,72	
ID 4 Zorn à Saverne	1,16	1,07	
ID 7 Zorn à Walten.	0,85	0,63	

Tabl. 2 - Différences relatives des estimations de débits pour les trois bassins versants jaugés

La comparaison entre SCHADEX et SHYREG montre des débits supérieurs de 1% à 15% par la méthode SCHADEX pour les débits trentennaux et centennaux. Le débit millénal est sensiblement le même sur la Zinsel, et supérieur de 24% par la méthode SCHADEX. La méthode SPEED donne des résultats supérieurs à la méthode SHYREG pour les débits trentennaux et centennaux allant de 16% à 35%. Le point ID4 donne un débit trentennal semblable pour la Zorn à Saverne entre les deux méthodes.

Enfin, la comparaison entre la méthodes SCHADEX et la méthode SPEED donne des débits supérieurs par la méthode SPEED au niveau des points ID1 et ID7 allant de 4% à 37%. Au niveau de la Zorn à Saverne, la méthode SCHADEX donne un débit supérieur de 16% par rapport à la méthode SPEED.

Après analyse, la méthode SPEED est plus sécuritaire au niveau de la Zinsel à Oberhof et la Zorn à Waltenheim. Pour la Zorn à Saverne, c'est la méthode SCHADEX qui donne des débits plus sécuritaires.

La différence entre les méthodes s'explique par l'utilisation de données différentes entre la méthode SPEED et les méthodes IRSTEA. Les stations pluviométriques et hydrométriques sont les mêmes mais la plage de données de 2006 à 2014 est disponible uniquement pour les deux méthodes IRSTEA.

Les résultats des débits de période de retour supérieure à 30 ans sont présentés uniquement sur les deux bassins versants jaugés en amont.

Les valeurs des débits de période de retour millénaire et centennale sont présentées dans le tableau suivant :

Station	Période de retour	Débit SPEED (m ³ /s)	Débit SHYREG (m ³ /s)	Débit SCHADEX (m ³ /s)
Zorn à Saverne ID4	Q100	69	64,3	74,4
	Q1000	NC	115,1	142,5
Zinsel à Oberhof ID1	Q100	52,8	35,8	37,6
	Q1000	NC	67,2	66,4

Tabl. 3 - Estimation des débits de période de retour 100 ans et 1000 ans

Pour les débits de période de retour 100 ans, la méthode SPEED est en accord sur la Zorn à Saverne, et surestime le débit sur la Zinsel. Cela s'explique par la prise en compte de la totalité du ruissellement à partir d'une certaine période de retour (théorie du Gradex) qui peut avoir tendance à surestimer des débits.

Pour les débits de période de retour 1000 ans seules les méthodes IRSTEA donnent des résultats, de l'ordre de 67 m³/s pour la Zinsel à Oberhof et entre 120 m³/s et 140 m³/s pour la Zorn à Saverne. Ces valeurs extrêmes devront être calculées par la suite au droit de chaque ouvrage de ralentissement dynamique des crues pour le dimensionnement de l'évacuateur de crue.

Les sites d'intérêt pour les hydrogrammes sont les points d'injection du modèle, c'est-à-dire la Zorn à Saverne (ID4) ainsi que la Zinsel à Dossenheim. Le seul bassin versant jaugé sur la Zinsel est la Zinsel à Oberhof (ID1), le point le plus proche de Dossenheim est le point situé sur la Zinsel à Eckartswiller (ID2) qui se situe en amont du point d'injection.

Les valeurs des débits trentennaux pour les points d'injections sont récapitulées dans la figure suivante :

	Débit SPEED (m ³ /s)	Débit SHYREG (m ³ /s)	Débit SCHADEX (m ³ /s)
Zinsel à Oberhof (ID1)	30,1	25,4	28,6
Zinsel à Eckartswiller (ID2)	32,8	26,7	26,9
Zorn à Saverne (ID4)	45,6	46,9	53,2

Tabl. 4 - Débits Q30 points d'injection par les méthodes SPEED, SHYREG et SCHADEX

Au niveau du point d'injection à Saverne sur la Zorn, la méthode SCHADEX donne un débit plus élevé par rapport aux méthodes SPEED et SHYREG. Cependant, les résultats de la méthode SCHADEX n'étant pas définitifs dans l'attente des données de la DREAL, le choix est de conserver l'hydrogramme obtenu par la méthode SPEED avec un débit de pointe trentennal de $45,6\text{m}^3/\text{s}$. Etant donné qu'une revanche de sécurité est appliquée dans le dimensionnement des protections rapprochées, le débit injecté à Saverne reste dans le sens sécuritaire.

D'après ce tableau, les valeurs des débits de pointe pour Q30 avec la méthode SPEED sont validés, avec une sécurité par rapport au débit sur la Zinsel. Le débit injecté en amont de Dossenheim sera donc le débit obtenu avec la méthode SPEED.

Les autres points d'estimation du débit à prendre en compte sont : la Zinsel à la confluence (ID3), la Zorn à l'aval de la confluence Zinsel (ID5) et la Zorn à l'aval de la confluence avec le Mosselbach (ID6). Ces débits ont été calculés uniquement par les méthodes SPEED et SCHADEX car les bassins versant ne sont pas jaugés.

Ces résultats sont présentés dans le tableau suivant :

	Débit SPEED (m^3/s)	Débit SHYREG (m^3/s)	Débit SCHADEX (m^3/s)
Zinsel conf. Zorn (ID3)	50	38,3	NC
Zorn aval confl, Zinsel (ID5)	91,5	83,6	NC
Zorn aval confl. Mossel. (ID6)	106	95,3	NC

Tabl. 5 - Débits Q30 aux points d'intérêt du modèle hydraulique

On observe un débit supérieur de 31% par la méthode SPEED sur la Zinsel par rapport à SHYREG. Pour les points ID5 et ID6, la méthode SPEED donne aussi des débits supérieurs à la méthode SHYREG avec des écarts de 9% et 11% respectivement.

Globalement les débits de la méthode SPEED sont aussi plus sécuritaires pour les débits trentennaux des bassins non jaugés.

Pour la partie détermination des débits au droit des ouvrages de ralentissement dynamique, la méthode SHYREG pourra fournir les débits de période de retour millénale afin de dimensionner les évacuateurs de crue. Cependant, à l'heure actuelle, IRSTEA est en attente de données de la DREAL afin de déterminer ces débits, les débits de période de retour 30 ans et 100 ans pourront aussi être calculés au droit de chaque ouvrage.

3. MODELISATION HYDRAULIQUE

3.1. LA MODELISATION HYDRAULIQUE DES COURS D'EAU

La modélisation numérique des cours d'eau est une problématique réelle qui a été traitée dès les années soixante dix afin de simuler les écoulements et les crues des cours d'eau. Différents codes de calcul basés sur la résolution des équations de Barré de Saint Venant ont été développés pour reproduire les écoulements en rivière. (CEMTEF, 2013)

La figure suivante fait un état de l'art non exhaustif des logiciels de modélisation des cours d'eau.

	HEC RAS	Mascaret	CARIMA	Télémac 2D	MIKE FLOOD	Hydrariv	Info Works	SW2D
Développeur Pays	US Army Etats Unis	EDF France	ARTELIA France	EDF DRD France	DHI Danemark	Hydratec France	Innovyze Etats Unis	Guinot, Lhomme, Finaud- Guyot et al France.
Equations de base	Barré Saint Venant	Barré Saint Venant	Barré Saint Venant	Barré Saint Venant	Barré Saint Venant	Barré Saint Venant	Barré Saint Venant	Barré Saint Venant
Lit mineur	1D	1D	1D	2D	1D	1D	1D	1D ou 2D
Lit majeur	1D	1D	1D ou Casiers	2D	2D	Casiers ou 2D	2D	2D
Données construction modèle	Profils en travers, ouvrages	Profils en travers, ouvrages	Profils en travers, ouvrages, voir MNT	Bathymétrie, ouvrages, MNT lidar	Profils en travers, ouvrages, MNT lidar	Bathymétrie, ouvrages, MNT lidar	ouvrages, MNT lidar	Bathymétrie, ouvrages, MNT lidar

Tabl. 6 - Etat de l'art de différents logiciels de modélisation des cours d'eau

L'objectif est de situer le logiciel CARIMA, utilisé pour le modèle hydraulique de la Zorn parmi d'autres logiciels de modélisation couramment utilisés. Le logiciel CARIMA est adapté à la modélisation du bassin versant de la Haute Zorn, car c'est une zone où l'habitat est peu dense (hormis Saverne), et où les casiers permettent en lit majeur de modéliser les phénomènes de stockage.

3.2. LE LOGICIEL CARIMA

3.2.1.1. PRESENTATION DU LOGICIEL CARIMA

Le logiciel CARIMA (CALculs de Rivières Maillées) est un système de modélisation des écoulements permanents ou transitoires à surface libre développé par ARTELIA. Il traite deux régimes de base des écoulements :

- L'écoulement unidimensionnel (1-D) suivant le lit mineur de la rivière : chaque point de calcul correspond à un profil en travers dont la géométrie a été relevée. Ces points sont reliés par des tronçons de calcul unidimensionnels. Ces tronçons peuvent constituer un réseau maillé, par exemple dans le cas de la séparation de l'écoulement en deux bras de part et d'autre d'une île importante, dans le cas d'une coupure de boucle ou dans celui des différents bras d'un delta qui s'interconnectent.
- L'écoulement dans le champ d'inondations, représenté par une modélisation « à casiers » (ou pseudo 2-D) : l'écoulement dans le lit majeur est représenté par des enchaînements de casiers tenant compte de la topographie du site (l'emplacement des casiers et des liaisons entre les casiers est choisi, dans la mesure du possible, en fonction des obstacles dans le champ d'inondation telles que routes, digues, etc.).

La figure suivante montre le cas schématisé d'une zone d'écoulement unidimensionnelle maillée :

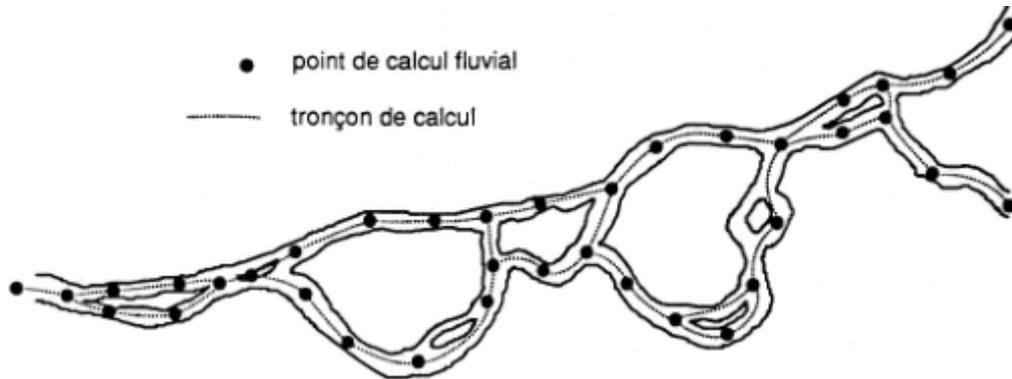


Fig. 4. Principe de modélisation CARIMA

Les écoulements au droit des ouvrages et singularités (ponts, seuils, barrages, vannes, digues et remblais, ouvrages en charge, etc.) sont également modélisés. Les singularités naturelles et artificielles sont représentées dans CARIMA par l'expression de la perte de charge qu'elles provoquent et non par la représentation des comportements hydrauliques en régime torrentiel qui pourraient être engendrés par ces singularités.

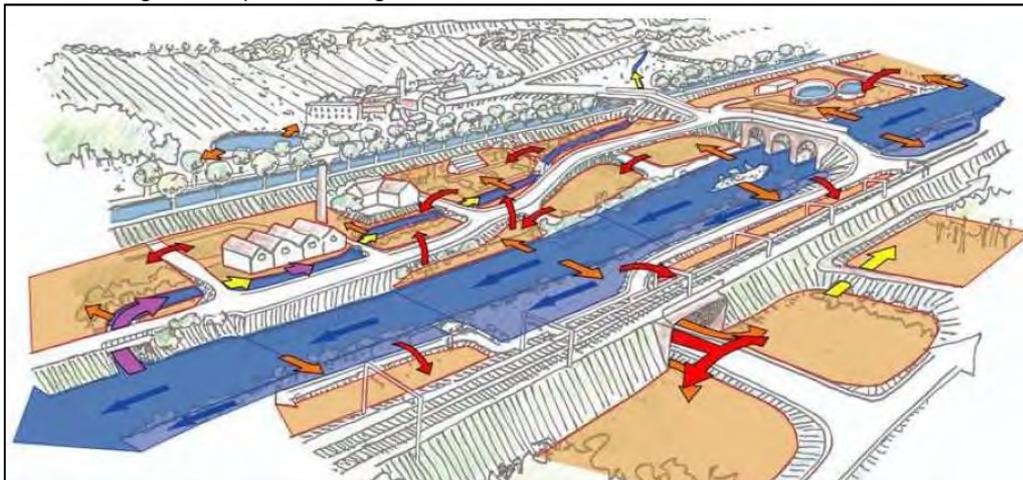


Fig. 5. Schéma des écoulements calculés dans CARIMA, ARTELIA

Le code de calcul est basé sur l'équation dynamique de Barré Saint Venant monodimensionnelle et l'équation de conservation de masse du fluide. (ARTELIA, 2003).

Les liaisons entre le lit mineur et les casiers sont définies par des lois de seuil.

Les liaisons entre deux casiers dans le lit majeur de la rivière sont modélisées par une loi de seuil ou une loi d'orifice si la limite entre les casiers est un remblai, ou un dalot.

Ces liaisons entre deux casiers peuvent aussi prendre en compte la dissipation d'énergie cinétique en définissant des liaisons de type fluvial.

L'utilisation des casiers pour la modélisation de l'écoulement est essentielle dans le cadre des protections des crues de la Zorn, car les protections de type digues en lit majeur forment des casiers artificiels à combiner avec les casiers dus à la topographie naturelle. Les berges sont la plupart du temps surélevées par rapport au champ d'inondation, ces liaisons entre le lit mineur et les casiers sont modélisées par des liaisons avec une loi de seuil.

3.2.1.2. LES LIMITES DU MODELE NUMERIQUE CARIMA

Les hypothèses prises en compte dans les équations et les formules résolues par le logiciel de calcul conduisent toutefois à une simplification de la représentation des écoulements réels. Ainsi, certains phénomènes multidirectionnels, tels que les écoulements turbulents au voisinage des ouvrages, ou les écoulements débordants à faible hauteur, ne sont pas directement quantifiables par le calcul pur.

La précision des résultats annoncés sur les niveaux absolus des crues simulées dépend donc de plusieurs paramètres :

- De la représentativité des coefficients empiriques représentant la complexité de la topologie du cours d'eau ;
- De l'imprécision inhérente à la topographie (levés géomètre, MNT) ;
- Du calage du modèle lié aux relevés des laisses de crue, mais dont la validité est encore conditionnée par la finesse de l'analyse hydrologique et la connaissance précise des hydrogrammes des crues de calage ;
- Des débits d'entrée dans le modèle liés à l'incertitude sur l'hydrologie du secteur d'étude et de la détermination des débits caractéristiques ;
- la représentativité des conditions aux limites aval qui conditionnent l'évacuation du débit du modèle.

3.3. LE MODELE DE LA ZORN EXISTANT

Le modèle numérique de la Zorn a été construit dans le cadre du SAGEECE de 1998 avec le logiciel CARIMA et calé sur les crues historiques de 1990 et 1993. Entre 2002 et 2006 dans le cadre de l'étude de faisabilité menée par ARTELIA, le modèle a pu être affiné et son calage ajusté à partir des nivellements de laisses de crue d'octobre 1998. Le modèle global de la Zorn a ensuite été mis à jour en 2010 dans le cadre de l'élaboration d'un programme global de protection contre les inondations intégrant les aménagements de protections rapprochées initialement prévus.

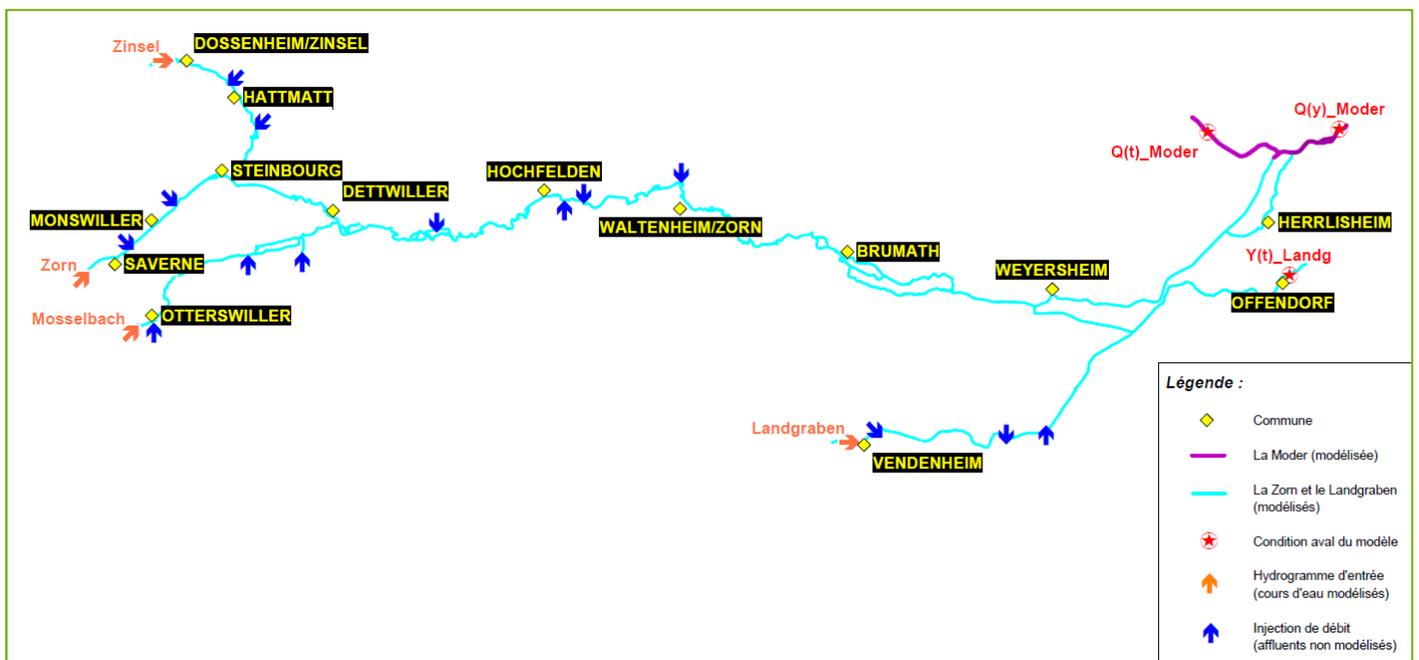


Fig. 6. Schéma du modèle hydraulique global de la Zorn de 2010

Le modèle de la Zorn de 2010 comporte un linéaire de 90km de cours d'eau prenant en compte la Zorn à partir de Saverne, la Zinsel-du-Sud (principal affluent de la Zorn) à partir de Dossenheim sur Zinsel, le Mosselbach à partir d'Otterswiller et le Landgraben à partir de Vendenheim. Le système altimétrique du modèle est le référentiel NGF orthométrique.

Il y a quatre hydrogrammes injectés en entrées de modèle sur les cours d'eau de la Zorn, la Zinsel-du-Sud, le Mosselbach et le Landgraben. Les autres affluents de la Zorn sont modélisés par des injections de débits.

Les simulations de ce modèle sont effectuées sur un pas de temps de 7 minutes, sur une durée de 96h.

Le modèle comporte trois conditions aux limites aval :

- Condition de niveau en fonction du débit à la confluence avec la Moder
- Hydrogramme de la Moder à la confluence
- Limnigramme à Offendorf en aval de la diffluence

Ces trois conditions aval permettent d'avoir des résultats robustes et d'avoir une bonne précision du modèle en tout point.

L'incertitude du modèle de 2010 avait été évaluée à 30 cm.

3.4. LE MODELE DE LA ZORN ACTUALISE

3.4.1. Affinement du modèle

Les données disponibles à intégrer dans le modèle proviennent des éléments suivants :

- Le MNT :

Dans le cadre de la maîtrise d'œuvre, le modèle numérique de terrain a été réalisé par l'entreprise Aerodata France le 2 avril 2011, en deux vols. La densité de points obtenue est de 4 points/m². Le MNT dispose d'une précision planimétrique de 30 cm et d'une précision altimétrique de 15 cm. Le système altimétrique du MNT est le système NGF IGN69.

- Les levés profils et ouvrages 2015 :

De nouveaux profils ont été levés par le cabinet de géomètre JUNG en février 2015, 60 profils et 11 ouvrages ont été levés en amont de Dossenheim-sur-Zinsel. Des profils et ouvrages ont été levés sur les communes de Saverne, Monswiller, Steinbourg, et Dettwiller.

- Enquêtes de terrain :

J'ai pu me rendre deux journées sur le terrain dans la phase de construction du modèle afin de relever les ouvrages présents en lit majeur qui n'étaient pas répertoriés, de constater les ouvrages supprimés ou modifiés récemment. Cette étape est essentielle pour visualiser les comportements hydrauliques de la rivière ainsi que les aménagements prévus.

L'emprise du modèle après affinement est la suivante :

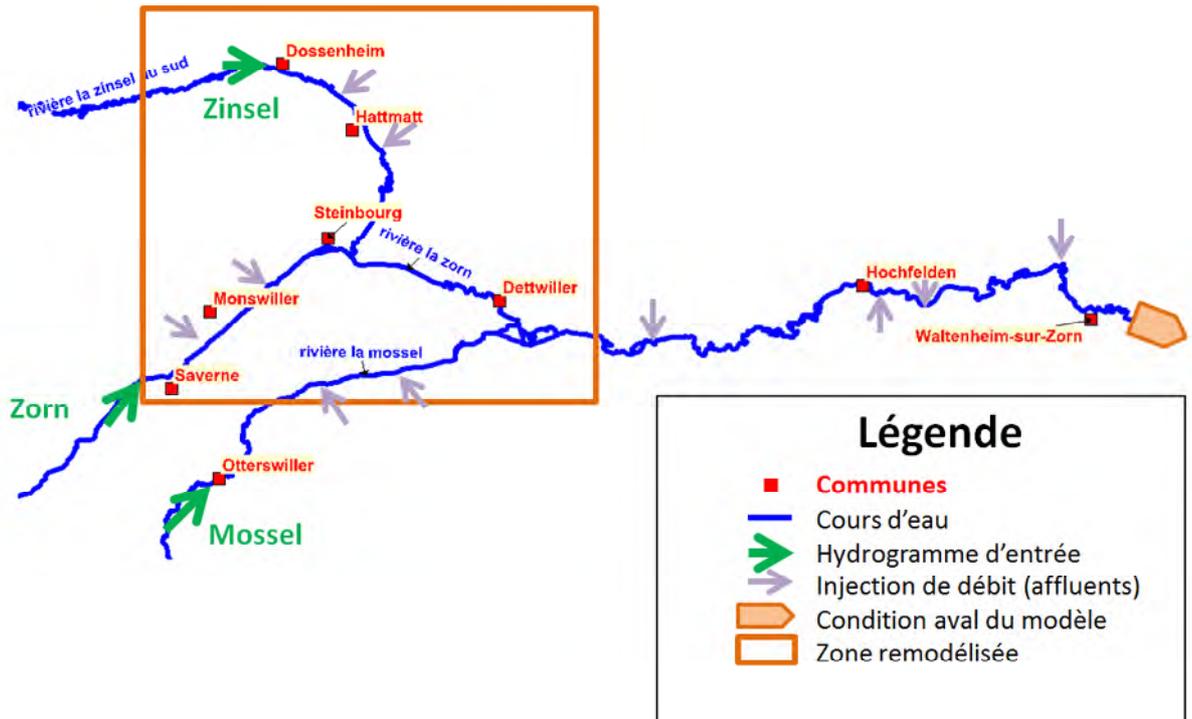


Fig. 7. Schéma du modèle hydraulique CARIMA de la Zorn 2015

Les principales modifications apportées sont les suivantes :

- La suppression des points de calculs (casiers et profils 1D) situés entre Brumath et Herrlisheim
- Modification de la condition aval du modèle : une nouvelle courbe de tarage est définie en aval de Waltenheim
- Mise à jour des casiers sur la Zorn et la Zinsel jusqu'à Detwiller avec le MNT
- Ajout de l'ouvrage LGV de la SNCF sur la Zorn
- Correction de la topographie du lit majeur de profils 1D de la Zinsel par le MNT

3.4.1.1. CONSTRUCTION DES CASIERS

Les casiers du modèle hydraulique CARIMA de 2009 ont été construits à partir des courbes de niveau IGN, des obstacles présents, des photos aériennes de crues, des profils en travers disponibles et de relevés terrain. Ce type de définition entraîne des imprécisions au niveau de l'emprise réelle du casier, mais aussi dans la définition des lois cote-surface qui gèrent le remplissage.

Le modèle CARIMA dans la zone remodélisée comporte 32 casiers sur la Zorn et 8 casiers sur la Zinsel. Certains casiers ont été mis à jour en termes de lois cote-surface et d'autres ont été ajoutés.

La figure suivante présente la mise à jour des casiers D137 et D138 du modèle de 2010, remplacés par le casier CR09 du modèle mis à jour :

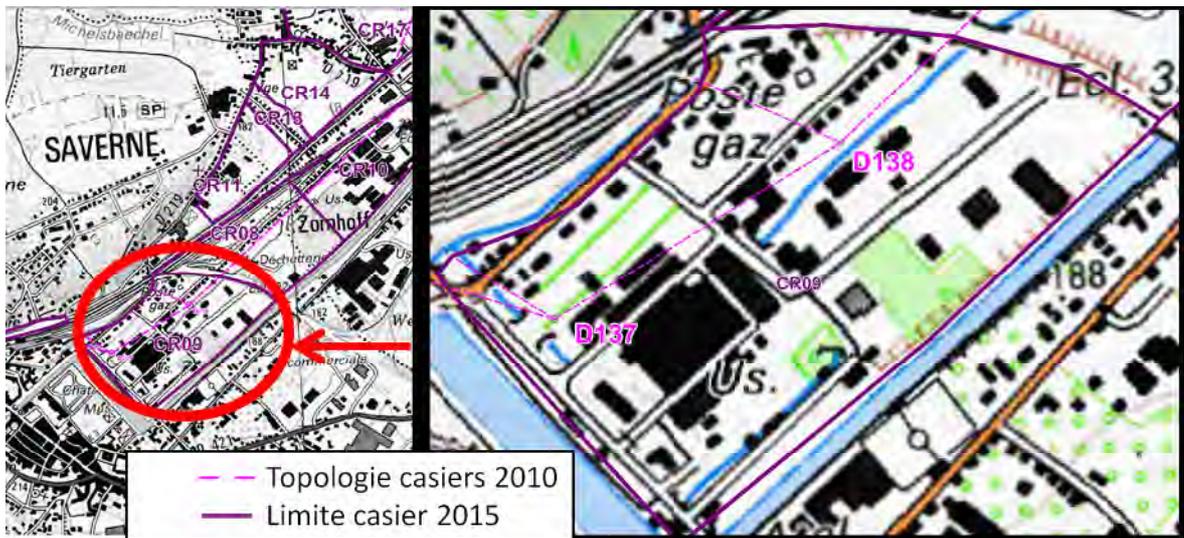


Fig. 8. Localisation du casier CR09 localiser à Saverne

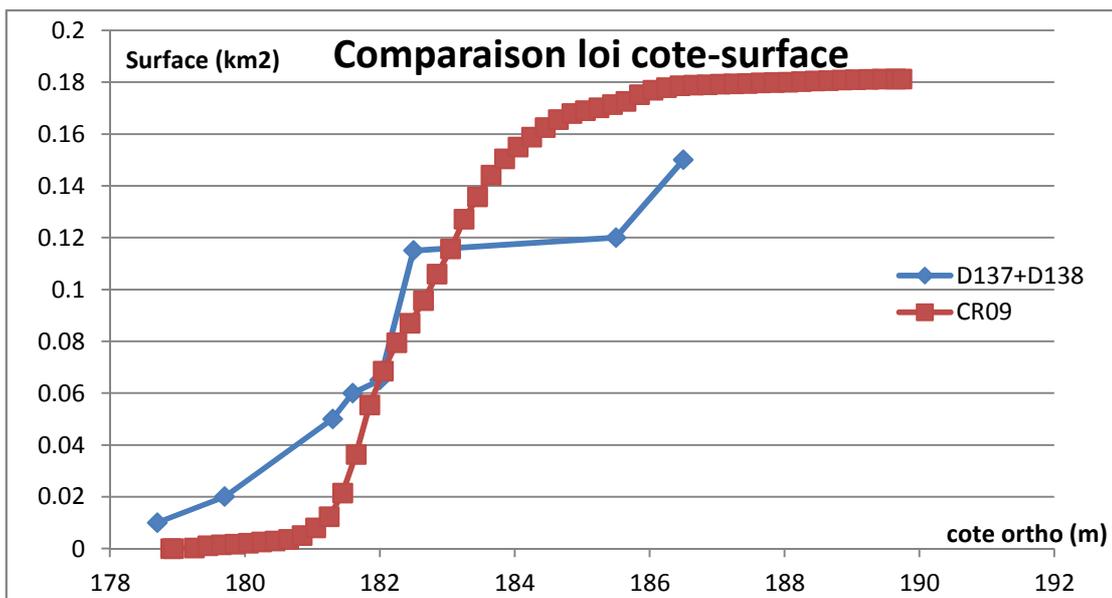


Fig. 9. Comparaison des lois cote-surface casier CR09, à Saverne

La figure précédente montre la précision accrue avec la nouvelle loi cote-surface réalisée avec le MNT. Le MNT permet de plus de connaître au mieux la topographie du lit majeur et de ce fait la présence d'obstacles qui peuvent constituer une limite de casier.

Le modèle numérique de terrain permet d'avoir une définition précise de la loi de remplissage du casier. Les casiers actualisés permettent d'obtenir une loi avec un pas d'espace de 20cm. La figure 10 illustre la construction de la loi de remplissage à l'aide de l'outil Vertical Mapper de Mapinfo.

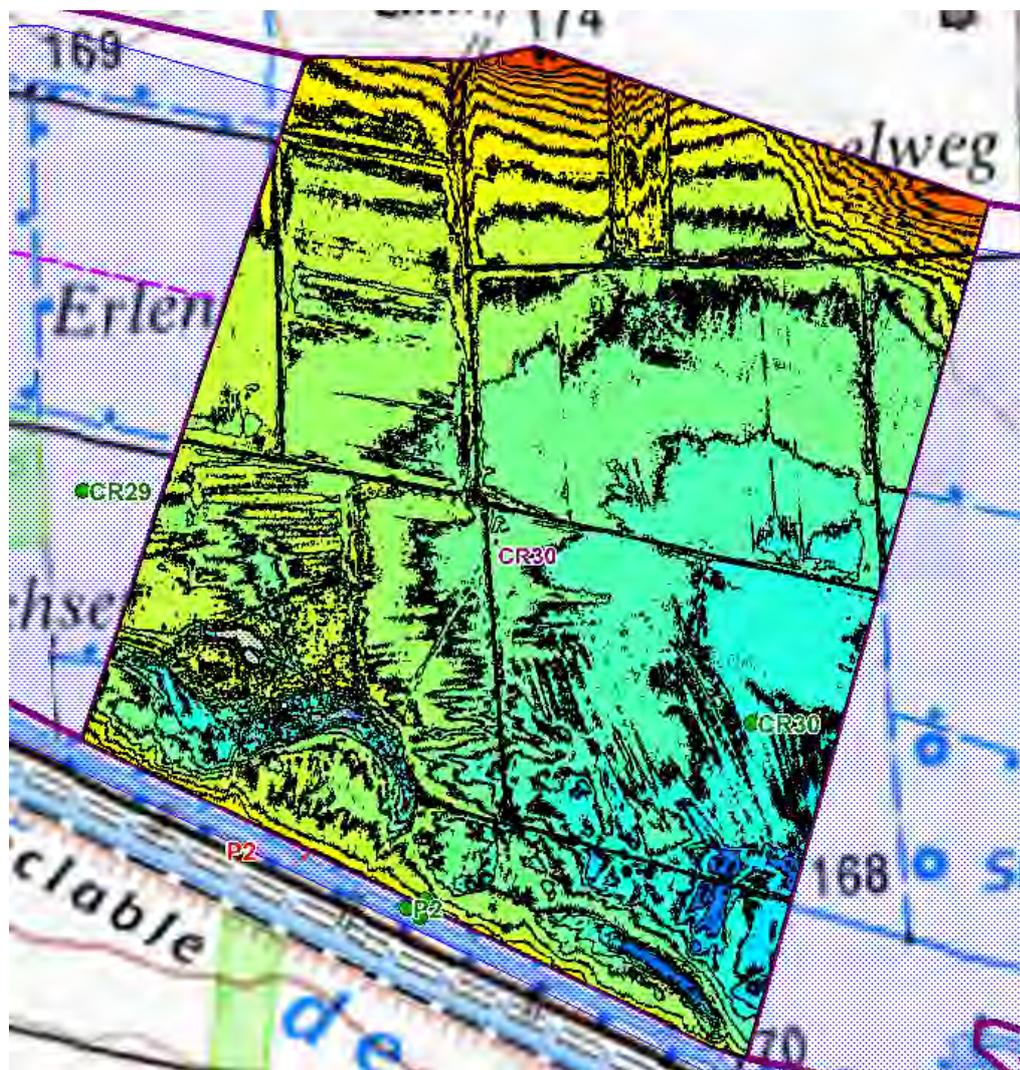


Fig. 10. Construction des lois cote-surface à l'aide de l'outil Vertical Mapper, casier CR30 en amont de Dettwiller

L'ensemble des liaisons entre le lit mineur et les casiers ont été mises à jour avec le MNT. Un exemple significatif d'actualisation des berges effectuant une liaison entre le lit mineur de la Zorn et un casier est développé par la suite.

Le casier G142 a été remplacé par le casier CR18 pour refaire une loi cote – surface, la comparaison des berges qui constituent une liaison type déversoir est présentée dans la figure suivante.

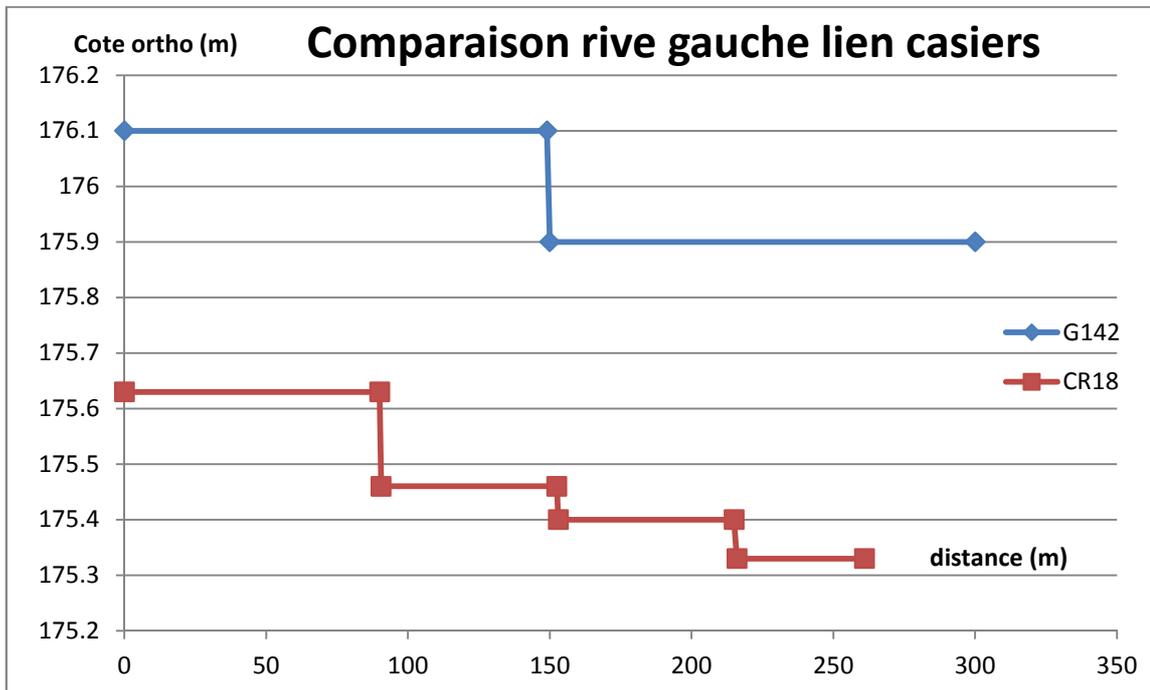


Fig. 11. Comparaison liaison lit mineur – casiers modèles 2010 – 2015

La figure précédente montre la définition d'une liaison lit mineur – casier mise à jour avec le MNT. Les profils géomètre ayant servis à faire la liaison précédente sont moins récents que le MNT ce qui explique les différences de cote.

3.4.1.2. CONDITIONS AUX LIMITES DU MODELE

Les points d'injections du modèle sont situés à Dossenheim-sur-Zinsel pour la Zinsel, à Saverne pour la Zorn et à Otterswiller pour la Mossel. La durée de la simulation est de 96h avec un pas de temps de 5 minutes.

Les hydrogrammes injectés dans le modèle reprennent les débits de pointes de la méthode SPEED avec un hydrogramme type crue de 1998. Deux hydrogrammes différents sont pris en compte : l'hydrogramme de 1998 pour le calage du modèle et l'hydrogramme du débit trentennal pour l'étude des protections rapprochées.

Les hydrogrammes injectés en amont de Dossenheim-sur-Zinsel sont présentés dans la figure suivante :

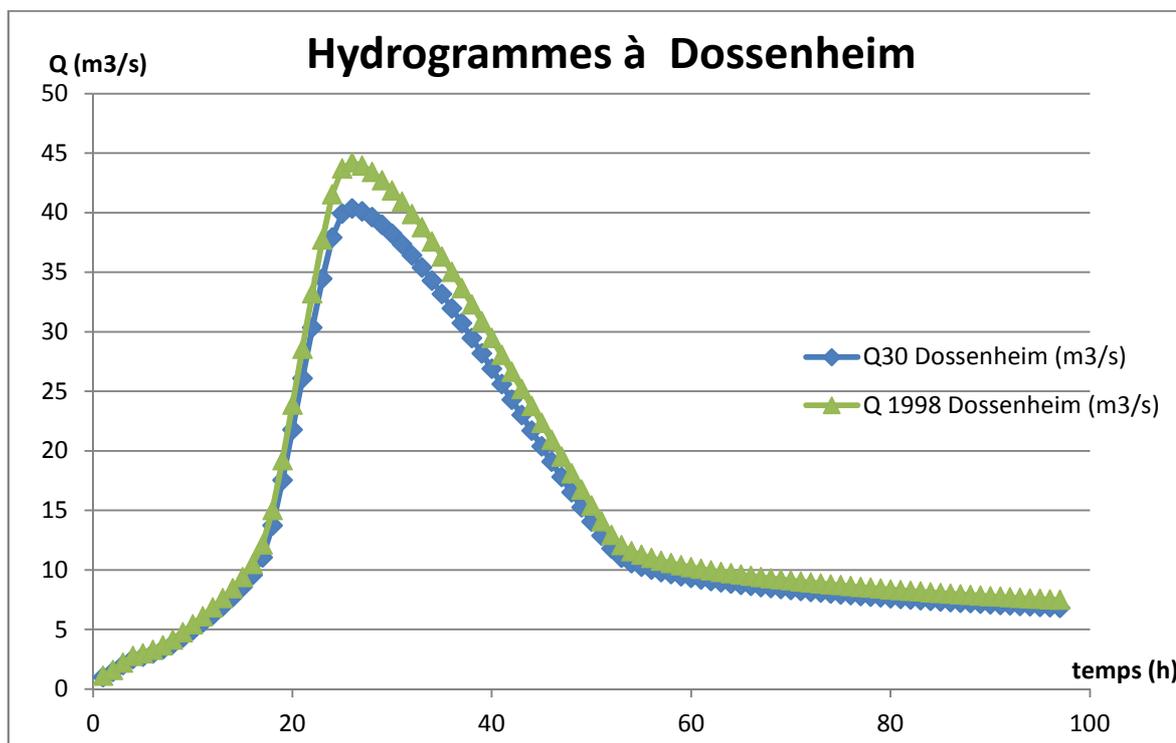


Fig. 12. Hydrogrammes injectés en amont de Dossenheim dans le modèle hydraulique CARIMA

Le modèle de 2009 couvrant déjà un linéaire de cours d'eau important et face à la contrainte de rencontrer des instabilités de calcul en ajoutant un nombre important de points de calcul, le modèle hydraulique a été coupé afin de conserver uniquement sa partie amont.

Le choix du point aval du modèle est important car une condition aval mal choisie peut influencer les résultats de la modélisation. En effet, en général, la condition aval est construite à partir d'une loi cote-débit supposant un régime uniforme établi ; cette dernière hypothèse étant toujours difficile à valider avec exactitude dans la nature (des perturbations locales pouvant générer quelques écarts par rapport à un écoulement uniforme), une incertitude sur la condition aval est courante en modélisation. De fait, il convient de choisir un point de condition aval suffisamment loin pour que la condition aval n'ait pas d'influence sur les résultats de calcul au droit des secteurs à enjeux. Ainsi, les principaux points d'attention dans la construction d'une condition aval sont d'éviter de définir cette dernière à proximité d'un ouvrage ou sur un profil en lien avec des casiers en lit majeur.

Dans notre cas, étant donné qu'il existe déjà un modèle hydraulique de la partie aval du bassin versant de la Zorn, la condition aval peut être extraite des résultats de calculs du modèle initial permettant de tenir compte des conditions d'écoulements simulées et d'éviter une hypothèse simplificatrice supposant un écoulement uniforme.

A partir du modèle de 2010 de la crue de 1998, le limnigramme du point P24, situé 14 km en aval de Dettwiller (cf figure 14), a pu être extrait. Cette zone présente un intérêt du fait de l'uniformité de la section : trois profils 1D avec une pente uniforme de 0,0012. Les incertitudes sur les résultats de calcul du modèle initial sont ainsi relativement limitées à ce niveau.

Le limnigramme de condition aval, défini en aval de Waltenheim-sur-Zorn est présenté sur la figure suivante :

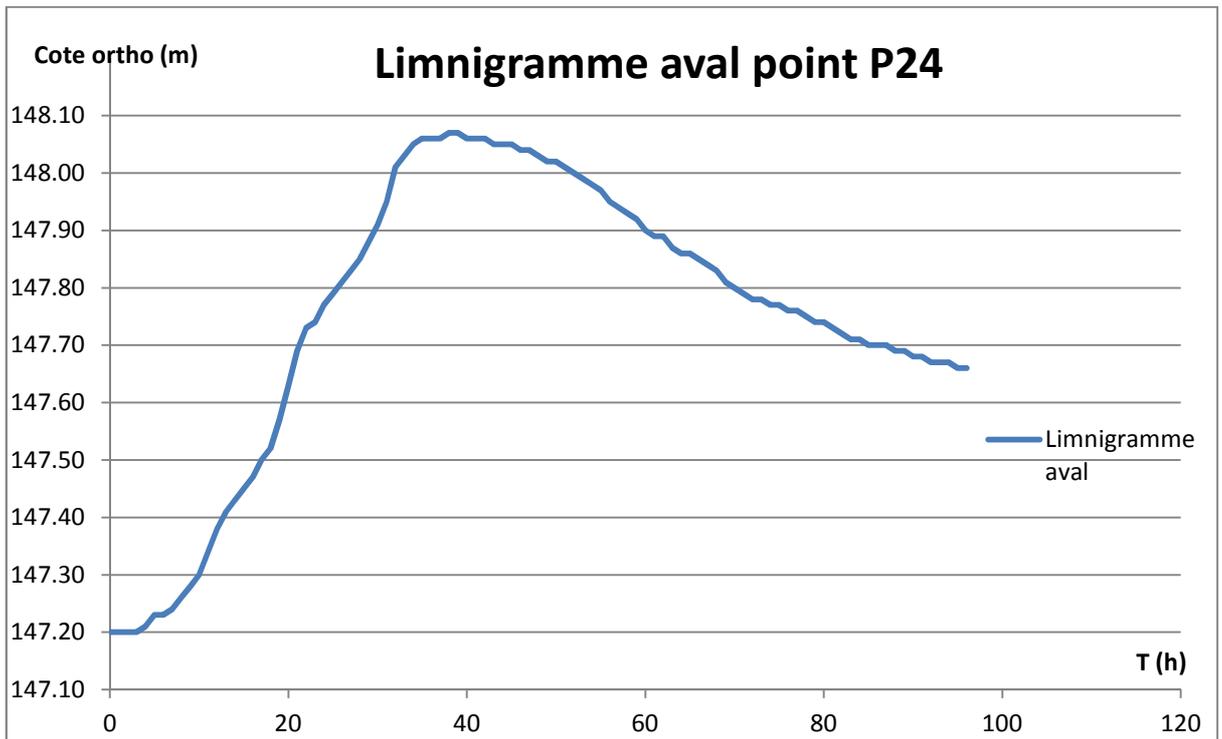


Fig. 13. Condition aval du modèle hydraulique CARIMA, Limnigramme

Afin de vérifier que le choix de la condition aval, étant donné l'incertitude du modèle initial, n'influence pas la ligne d'eau sur le secteur étudié, des tests de sensibilité ont été effectués.

Le limnigramme a successivement été surélevé de 30cm puis abaissé de 30cm par rapport au limnigramme initial. Les résultats de ligne d'eau sont présentés sur la figure suivante. Le résultat obtenu est une différence des lignes d'eau seulement 1 km en amont du point P24 de la condition aval. On peut donc conclure que la condition aval n'influence pas les hauteurs d'eau sur le secteur d'étude : situé en amont du profil P6.

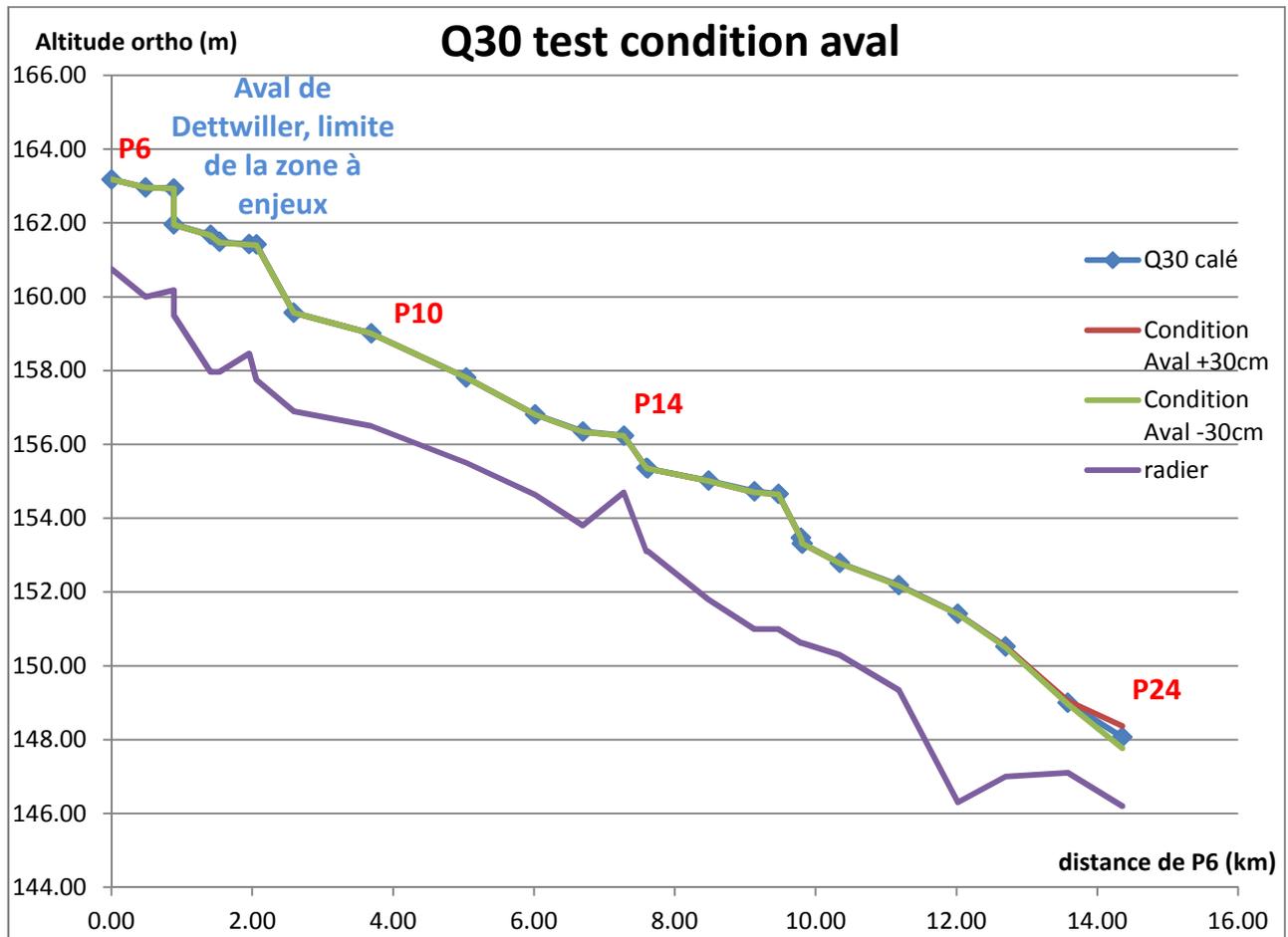


Fig. 14. Condition aval du modèle hydraulique CARIMA, Limnigramme

3.4.1.3. CONDITIONS INITIALES ET LANCEMENT DU CODE DE CALCUL

Le logiciel CARIMA permet de réaliser des modélisations de cours d'eau en régime transitoire. Le code de calcul a besoin de conditions initiales pour lancer le calcul, il lui faut une hauteur d'eau et un débit initial afin d'initier le calcul.

Les cotes initialisées par défaut par CARIMA sont 4m de hauteur d'eau en chaque point et chaque casier avec un débit nul, car le code de calcul ne tolère pas de zones sèches. Des précautions sont donc à prendre car la cote d'eau initiale du casier ne doit pas influencer le résultat final, en pré-remplissant le casier avant l'arrivée réelle de la crue.

Pour chaque casier l'objectif est de mettre la cote d'eau minimale au lancement du calcul, tout en n'influençant pas l'effet de stockage que pourraient avoir ces casiers.

Dans notre cas du modèle de la Zorn, afin d'initialiser le modèle sans fausser les résultats de calculs au niveau des casiers, des simulations ont été réalisées pour des débits courants (modules) et ces résultats ont été utilisés au niveau des points 1D (lit mineur) pour initialiser le calcul en régime transitoire de la crue trentennale. Pour les casiers, chaque cote a été ajustée manuellement afin de limiter les hauteurs d'eau initiales.

3.4.2. Calage du modèle

3.4.2.1. PRINCIPES DU CALAGE

Le calage est réalisé à partir des laisses de crue de la crue de 1998 (de période de retour trentennale). Ce calage sera représentatif car il reproduit un évènement récent, avec une période de retour correspondant au dimensionnement des aménagements de protection à savoir une période de retour de 30 ans.

La principale difficulté du calage du modèle hydraulique réside dans le décalage des pics des hydrogrammes entre la Zorn et la Zinsel. Il n'y avait pas de station débitométrique sur la Zinsel en 1998, il est donc difficile d'évaluer le débit de pointe sur la Zinsel ainsi que l'horaire du pic de crue.

L'étude réalisée par ARTELIA en 2007 a permis d'étudier la crue de 1998 et de définir son débit en différents points du modèle. L'objectif sera donc également de caler le modèle en terme de débits.

Le modèle hydrologique de la Zorn mis au point en 2007 donne une quasi concomitance des pics de crue de la Zorn et de la Zinsel.

Les laisses de crue de la crue d'octobre 1998 ont été relevés en février 1999 par le cabinet de géomètre Carbiener en se basant sur des laisses apparentes, des photos ou témoignages de riverains (cf annexe 5). Le secteur étudié contient ainsi neuf laisses de crue sur la Zorn et sept laisses de crue sur la Zinsel.

Le processus de calage a consisté à atteindre les laisses de crue en modifiant la rugosité et la définition des ouvrages, puis dans un deuxième temps en modifiant la rugosité du lit mineur lorsque cela est justifiable

3.4.2.2. CALAGE EN NIVEAU

La méthode de calage du modèle en termes de niveaux d'eau a consisté à caler le modèle en partant de l'aval.

. La première zone de calage est donc Dettwiller qui répertorie six points de calage. Quatre points de calage se situent dans le lit mineur de la Zorn et deux point de calage se situent dans le lit majeur de la Zorn : au niveau d'un fossé sur le ponceau SNCF et au niveau de la menuiserie située dans la rue de Saverne à Dettwiller.

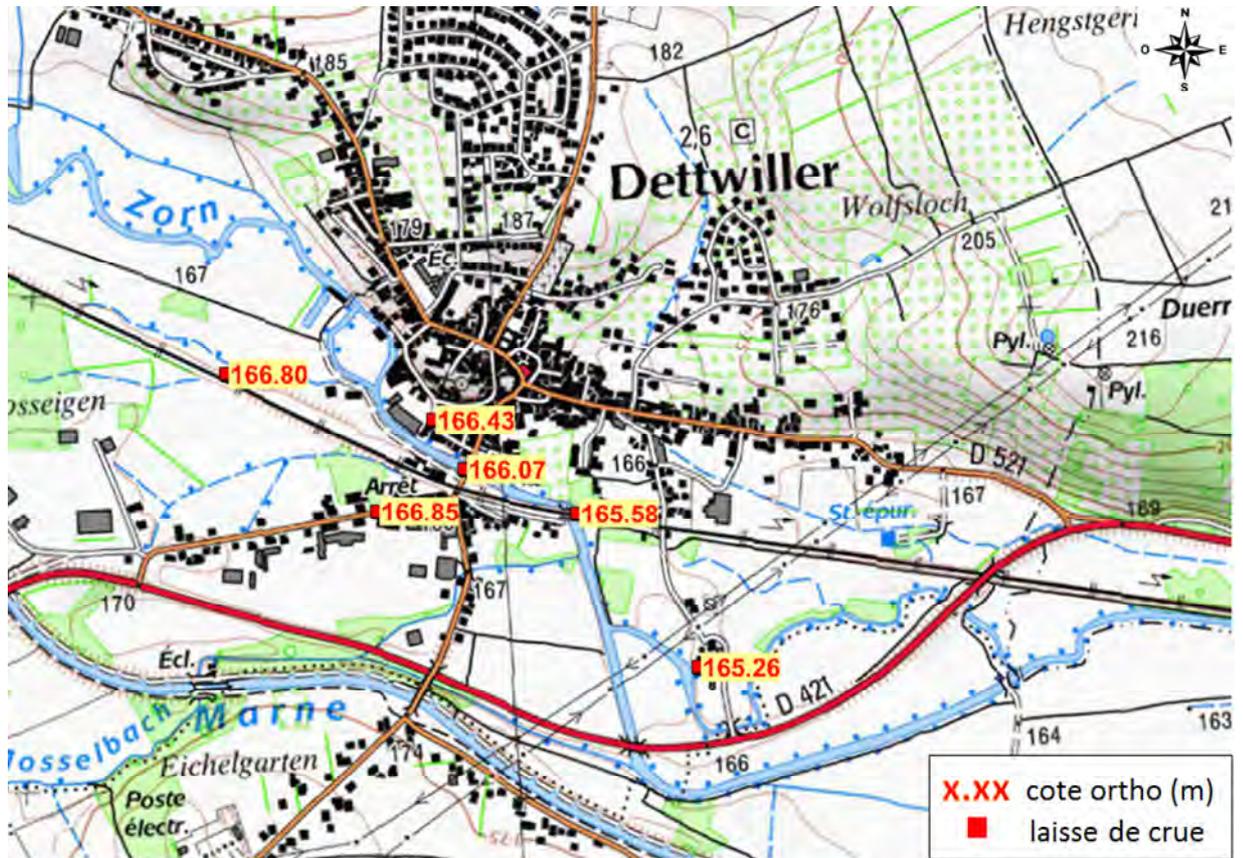


Fig. 15. Localisation des points de calage de la Zorn à Dettwiller : crue 1998, fond IGN 2010

Le calage à Dettwiller s'est fait en ajustant le coefficient de contraction horizontal du pont de la Zorn et en modifiant le coefficient de strickler au niveau du tronçon entre les deux ponts. Après vérification, la laisse de crue située dans la rue de Saverne relevée à 166,85m semble surestimée lorsqu'on regarde les photos de crue comme le montrent les figures ci-après.

D'après les photos aériennes de la crue, la rue de Saverne n'est pas entièrement inondée alors qu'une cote de 166,85m impliquerait une inondation de toute la rue. La cote obtenue par le modèle CARIMA de 166,51m correspond avec la photo aérienne de la crue de 1998, ainsi ce point de calage est considéré comme satisfaisant.



Fig. 16. Niveau d'eau 166,51m ortho, Dettwiller calage casier CR35



Fig. 17. Photo crue 1998, Dettwiller calage casier CR35, DDAF Saverne

Les points de calage de la Zorn amont ont été ajustés par la suite. Trois points de calage sont disponibles sur cette zone situés à Steinbourg, Monswiller et Saverne.

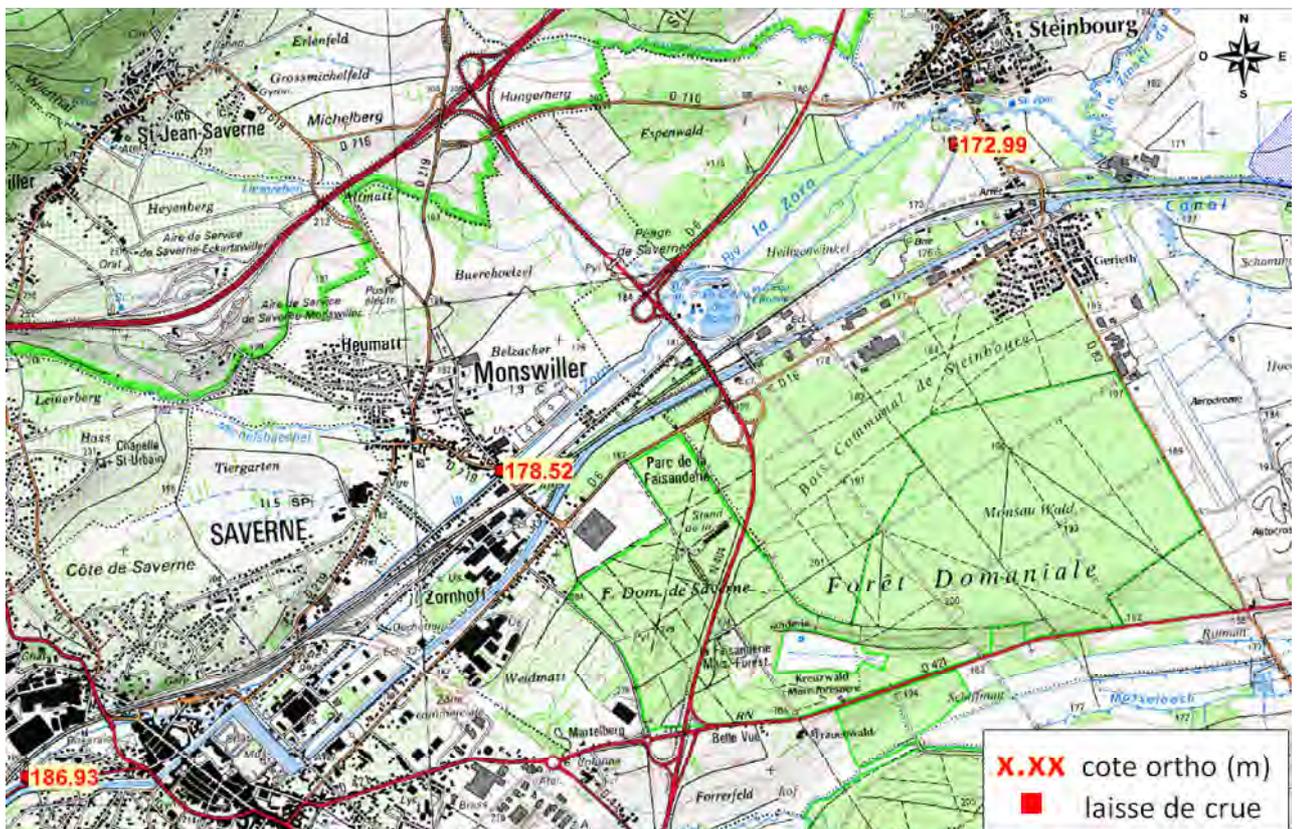


Fig. 18. Localisation des points de calage Zorn amont crue 1998, fond IGN 2010

Le calage de la Zorn amont s'est effectué en partant de la laisse de crue au niveau de la digue Kohler à Steinbourg. Le calage a été réalisé en affinant les liaisons lit mineur – casier au maximum, puis en ajustant les coefficients de pertes de charge aux ouvrages et les coefficients de strickler. Les résultats du calage du modèle de la Zorn sont disponibles sur le tableau suivant :

laisses de crue	laisse de crue en ortho (m)	cote CARIMA 2015 (m)	écart 2015 (m)	Commentaire
ZORN amont				
Pont Fritsch Saverne P132	186,93	186,97	0,04	
Pont Monswiller rue principale (amont) P140	178,52	178,48	-0,04	
Amont Digue Kohler Steinbourg casier CR23	172,99	172,95	-0,04	
ZORN aval				
ponceau SNCF (casier CR33)	166,80	166,57	-0,23	Interpolation cote au casier entier
Rue de la haute montée 149b	166,43	166,4	-0,03	
Pont de la Zorn P149	166,07	166,02	-0,05	
Menuiserie Osswald (casier CR35)	166,85	166,51	-0,34	cote de laisse erronée (cf photos)
Pont SNCF Q130	165,58	165,72	0,14	
Moulin marzlof P231	165,26	165,04	-0,22	laisse de crue peu fiable

Tabl. 7 - Résultats calage modèle hydraulique en débits et laisses de crue

Le calage du modèle apparaît correct en excluant le dernier point de calage jugé approximatif en l'absence de photo ou de laisse visible. L'écart constaté avec la laisse présente dans le casier en lit majeur au droit du ponceau SNCF peut être expliqué par la pente du casier et l'interpolation d'une seule cote dans tout le casier.

Le calage de la Zorn amont est également très satisfaisant car la précision atteinte est de 4cm, cependant étant donné qu'il n'y a que trois points de calage sur ce linéaire, des vérifications de l'enveloppe de crue avec les photos aériennes de la crue de 1998 (DDAF Saverne) ont été effectuées.

Pour le calage de la Zinsel, le même raisonnement est effectué en calant les laisses relevées à Hattmatt puis à Dossenheim. La localisation des laisses de crue est disponible dans la figure suivante :

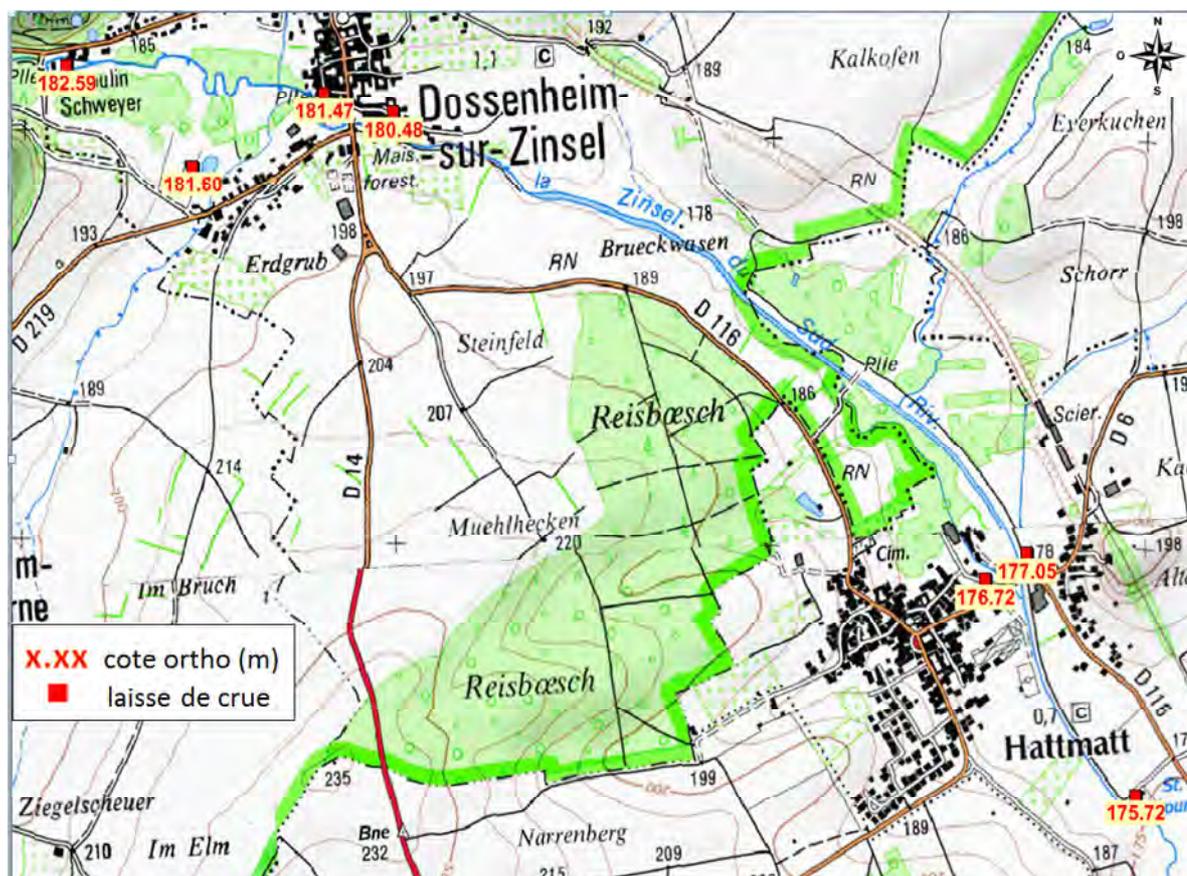


Fig. 19. Localisation des points de calage de la Zinsel crue 1998, fond IGN 2010

ZINSEL				commentaires
Dossenheim Sur Zinsel				
Dossenheim Moulin Schweyer : SWA	182,59	181,7	-0,89	Possible influence de l'ouvrage
Dossenheim Camping : Z02	181,6	181,55	-0,05	
Dossenheim Rue du moulin : BUR	181,47	181,42	-0,05	
Dossenheim Rue de la Zinsel Z04	180,48	180,5	0,02	
Hattmat	Q injecté amont Hattmatt	55,1 m ³ /s		
Hattmatt Pont Zinsel (BES1)	177,05	176,76	-0,29	Hypothèse de phénomène non reproductible
Hattmatt Pont canal (BOU3)	176,72	176,71	-0,01	
Hattmatt STEP (Z09)	175,72	175,69	-0,03	

Tabl. 8 - Ecart points de calage niveau sur la Zinsel

Les lisses de crue de la Zinsel sont atteintes à moins de 5 cm sauf pour deux points de calage. Considérant le bon calage des points amont et aval, la lisse du pont de Hattmatt non atteinte peut se justifier par un phénomène s'étant produit pendant la crue du type embâcles ou modification de terrain non relevée. Le gros écart au niveau de la lisse en amont de Dossenheim s'explique probablement par une ouverture partielle des vannes du moulin ayant provoqué une rehausse ponctuelle de la ligne d'eau au droit des bâtiments. Toutefois, aucune information n'est disponible concernant l'ouverture des vannes lors de la crue de 1998 (également possibilité d'embâcles). Dans le cas de la crue trentennale, les ouvrages seront considérés tout ouverts. De plus, aucun enjeu n'étant concerné à l'amont, cet écart n'aura pas d'influence sur la suite de l'étude.

3.4.2.3. CALAGE EN DEBITS

Le calage du modèle s'interprète aussi en termes de débit, car il permet d'avoir un indicateur sur la concomitance des crues. Ce calage est présenté dans le tableau suivant :

Localisation	Débit crue 1998, étude hydrologique SPEED (m ³ /s)	Débits CARIMA crue 1998 (m ³ /s)	Ecart relatif
aval confluence Zorn - Zinsel	101	101,5	0,5%
Zorn amont Dettwiller	94	99,2	5,5%

Tabl. 9 - Ecart points de calage en termes de débit

Les hydrogrammes injectés en entrée de modèle sont issus de la modélisation hydrologique de 2007 et tiennent ainsi compte des décalages des pics de crue estimés par ce modèle pluie-débit. Toutefois, des écarts peuvent apparaître sur les linéaires aval : en effet, les hypothèses prises en compte dans le modèle hydrologique pour estimer les temps de propagation sont différentes et moins précises que celles du modèle hydraulique. Ainsi, 0,5% de différence est observé sur le débit à la confluence Zorn/Zinsel en lien avec le temps de propagation calculé par le modèle hydraulique. En aval de la confluence, les phénomènes d'amortissement de la crue dans le large lit majeur en amont de Dettwiller explique l'écart de 5,5% constaté.

3.4.2.4. BILAN DU CALAGE DU MODELE

En conclusion, le modèle hydraulique a donc une précision différente suivant le secteur étudié. L'objectif du modèle est d'être précis dans les secteurs à enjeux qui sont les secteurs des protections rapprochées, ce qui est globalement le cas si l'on considère les résultats du calage.

Les incertitudes sur la topographie du modèle sont présentes à la fois sur le MNT qui a une précision altimétrique de 15cm et sur les levés géométriques qui ont été relevés entre 1996 et 2015. Par ailleurs, les études hydrologiques ont également mis en évidence des incertitudes sur les débits de crue caractéristiques, conduisant à des incertitudes sur les niveaux absolus de crue trentennale.

La précision globale du modèle peut être estimée à 30cm.

3.4.3. Les limites du modèle de la Zorn mis à jour de 2015

Lors d'une modélisation hydraulique, de nombreuses d'hypothèses sont émises afin d'approximer la réalité lorsque les données manquent.

Tout d'abord la topographie de la Zorn des profils 1D prend en compte des relevés géométriques compris entre les années 1996 et 2015. La dynamique fluviale des cours d'eau implique nécessairement des modifications de leur topographie, cependant l'hypothèse est faite que l'évolution des profils se compense avec le nombre important de levés.

Le modèle de la Zorn de 2015 est calé sur la crue d'octobre 1998 (crue environ trentennale), la précision des laisses de crues influe donc sur la précision globale du modèle. Les laisses de crue reposant parfois sur des témoignages de riverains, appuyés sur des photos n'étant pas nécessairement prises au pic de la crue, impliquent des incertitudes.

La condition aval a été extraite du modèle de la Zorn de 2010, avec l'incertitude qui l'accompagne. Néanmoins la condition aval du modèle est considérée suffisamment éloignée du point aval du secteur d'étude pour ne pas avoir d'influence.

La précision des lignes d'eau à proximité des ouvrages qui impliquent des passages en régime torrentiel ou de prendre en compte des écoulements tridimensionnels sont à interpréter avec précaution.

3.5. DIAGNOSTIC HYDRAULIQUE

Avant d'envisager la modélisation des aménagements aux secteurs problématiques, il convient d'effectuer le diagnostic hydraulique commune par commune.

L'enveloppe de la crue centennale sur le secteur d'étude est présentée sur la figure suivante :

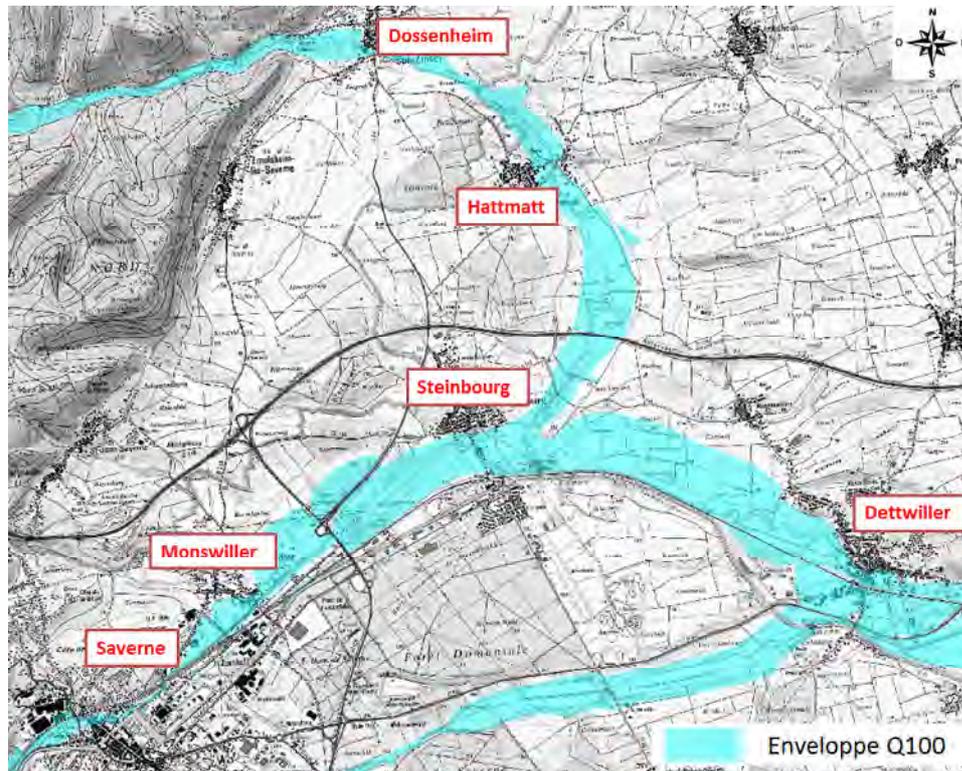


Fig. 20. Enveloppe Q100 de la Zorn et la Zinsel sur le secteur d'étude, données PPRI de la Zorn 2008

3.5.1. Dossenheim

Les débits de pointe à Dossenheim sur Zinsel sont estimés à $40,3 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le débit trentennal et à $69 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le débit centennal par la méthode SPEED.

Le secteur actuellement vulnérable aux inondations est la Rue de la Zinsel, zone inondable à partir de la crue décennale en aval du pont de la RD14.



Fig. 21. Localisation de sites vulnérables aux inondations à Dossenheim-sur-Zinsel, fond IGN 2010

3.5.2. Hattmatt

Les débits de pointes au niveau d'Hattmatt sont sensiblement les mêmes que les débits calculés à Dossenheim.

Les zones les plus vulnérables face aux inondations sont les suivantes :

- Les habitations situées sur le site de l'ancienne usine à mèche, entre la Zinsel et le canal de dérivation qui sont inondables pour une période de retour décennale.
- La rue des Acacias qui contient un point bas, qui est régulièrement inondée lorsque la Zinsel déborde.
- La salle polyvalente qui serait inondée pour une crue d'occurrence centennale.

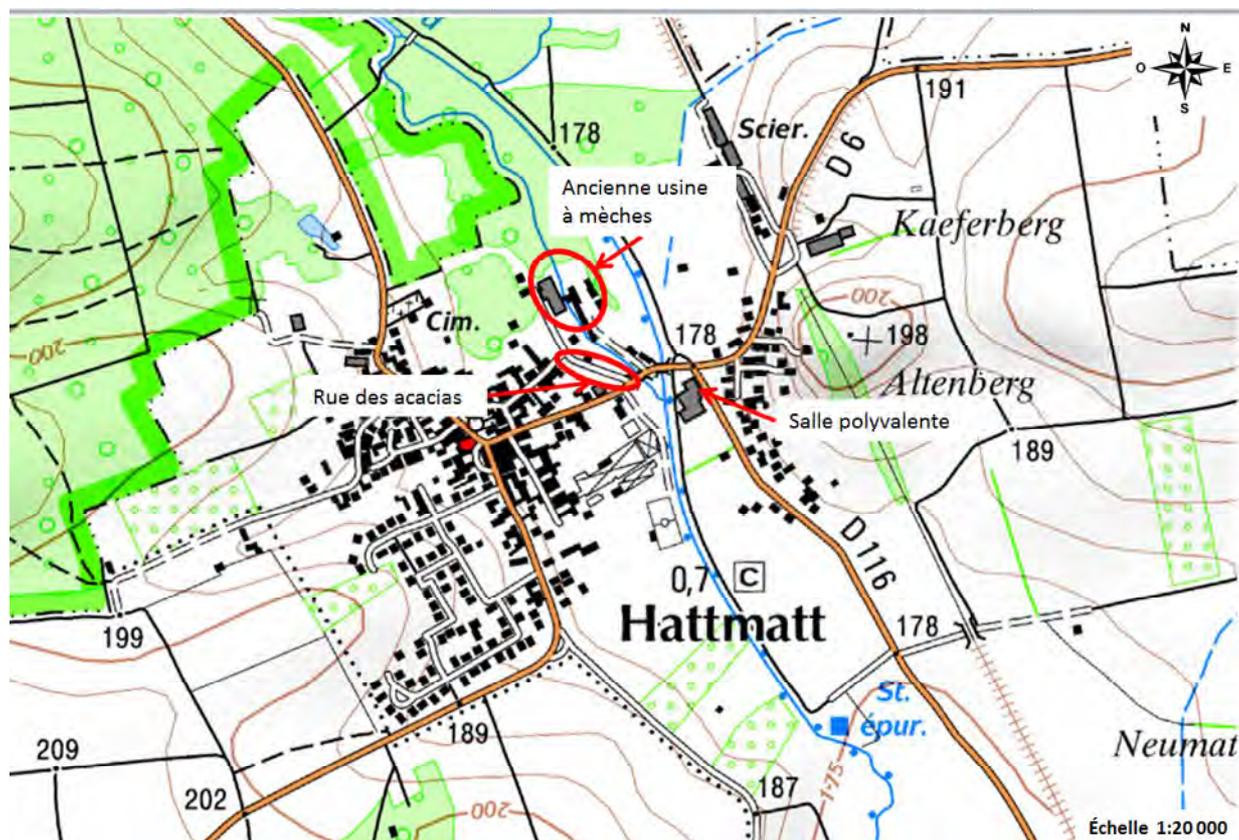


Fig. 22. Localisation de sites vulnérables aux inondations à Hattmatt, fond IGN 2010

3.5.3. Saverne

Les débits de pointe estimés à Saverne sont de $44 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le débit trentennal et de $69 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le débit centennal.

Les secteurs les plus vulnérables aux inondations sont les suivants :

- Quai de la Zorn : situé en amont du seuil faisant la diffluence avec le canal du Goldenberg, cette zone est inondable pour une crue de période de retour 30 ans.
- Passage des Tanneurs : ce secteur est inondable pour une crue de période de retour trentennale.
- Parking des Remparts : ce secteur est inondable à partir de la crue décennale
- Rue de la Roseraie : les habitations de la rue de la Roseraie ont été inondées lors de la crue d'octobre 1998 (crue trentennale à Saverne).

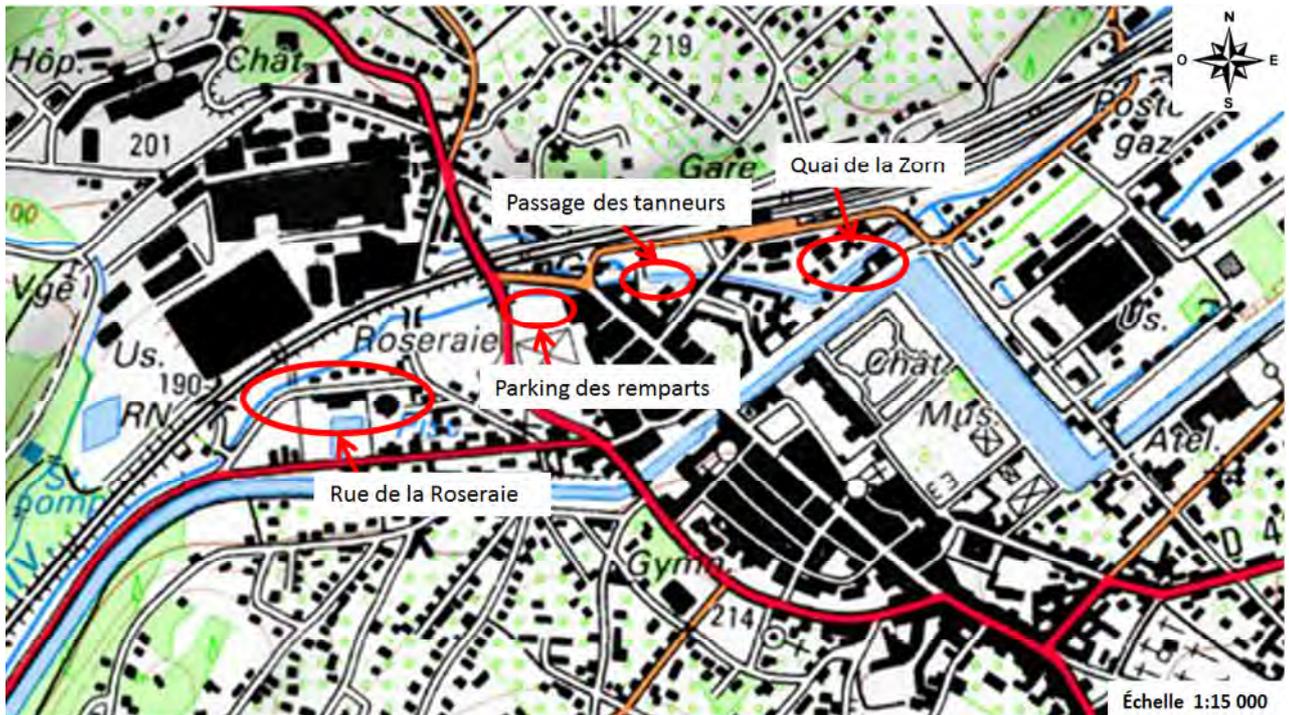


Fig. 23. Localisation de sites vulnérables aux inondations à Saverne, fond IGN 2010

Lors de la rénovation de la passerelle des vannes du vieil hôpital, les vannes ont été détruites en 2012.

3.5.4. Monswiller

Les débits de pointes sont sensiblement les mêmes qu'à Saverne. A noter que $5 \text{ m}^3/\text{s}$ passe dans le canal du Goldenberg pour une crue de période de retour trentennale.

Les secteurs les plus vulnérables aux inondations à Monswiller sont les suivants :

- Rue de la République : Le pont de la rue de la République se met en charge pour des crues de période de retour cinq ans. Lors de la crue de décembre 2001 (période de retour 5 ans à Saverne), le niveau d'eau atteignait le bas du tablier du pont. Pour les crues d'occurrences trentennales la rue de la République est inondable avec une mise en charge importante du pont.
- Grand'Rue : Lors de la crue de 1998, des débordements ont eu lieu en rive gauche en amont du pont de la Grand'Rue sans qu'il y ait de mise en charge de ce dernier.

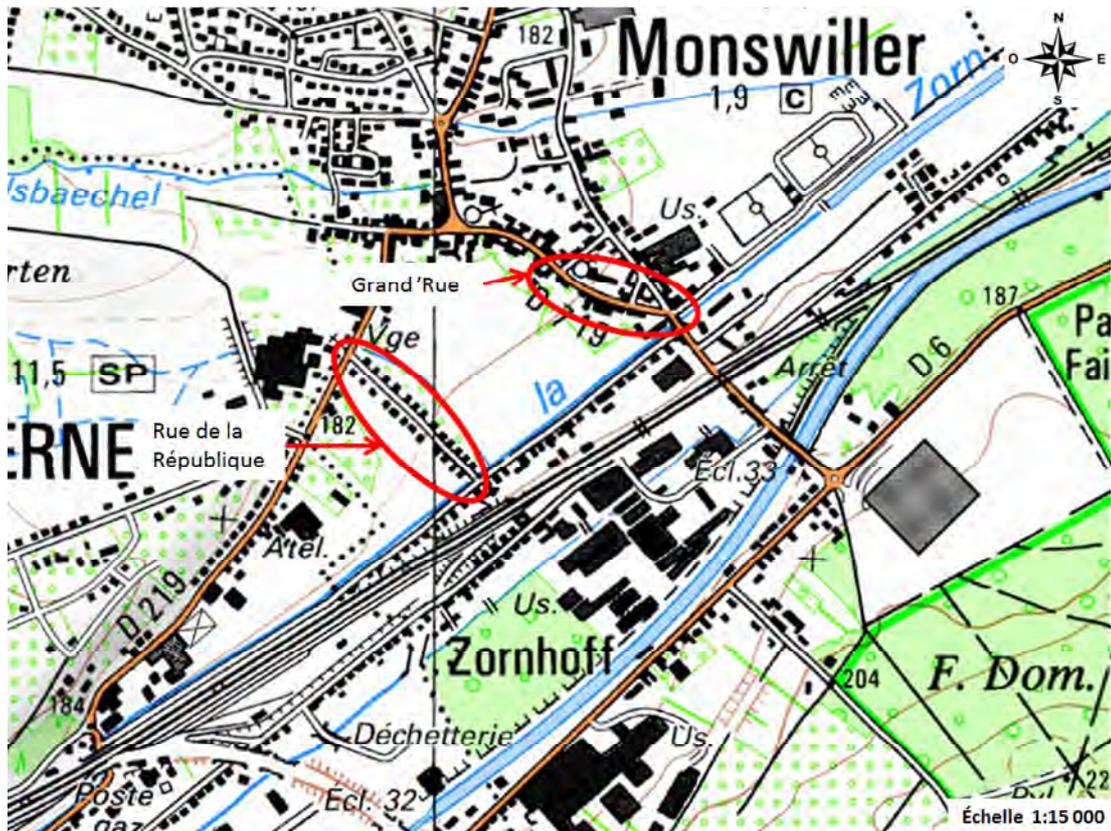


Fig. 24. Localisation de sites vulnérables aux inondations à Monswiller, fond IGN 2010

3.5.5. Steinbourg

Le débit de pointe pour une crue trentennale (telle la crue d'octobre 1998) sont les suivants : $48\text{m}^3/\text{s}$ en entrée de Steinbourg.

En 2011, un ouvrage de franchissement piscicole a été mis en place au niveau de la diffluence en amont de Steinbourg. Cette modification a été intégrée au modèle afin d'observer les différents impacts sur les lignes d'eau.

Les secteurs vulnérables aux inondations sont les suivants :

- Digue Kohler en amont de Steinbourg : Cette digue a été construite suite à la crue de 1983, cette dernière était à la limite de débordement lors de la crue de 1998 avec quelques surverses localisées en ses points bas. Cette digue est donc sous dimensionnée pour la crue trentennale.
- Rue de la gare : Un nombre important d'habitations de la rue de la gare ont été inondées par contournement aval lors de la crue de 1998.

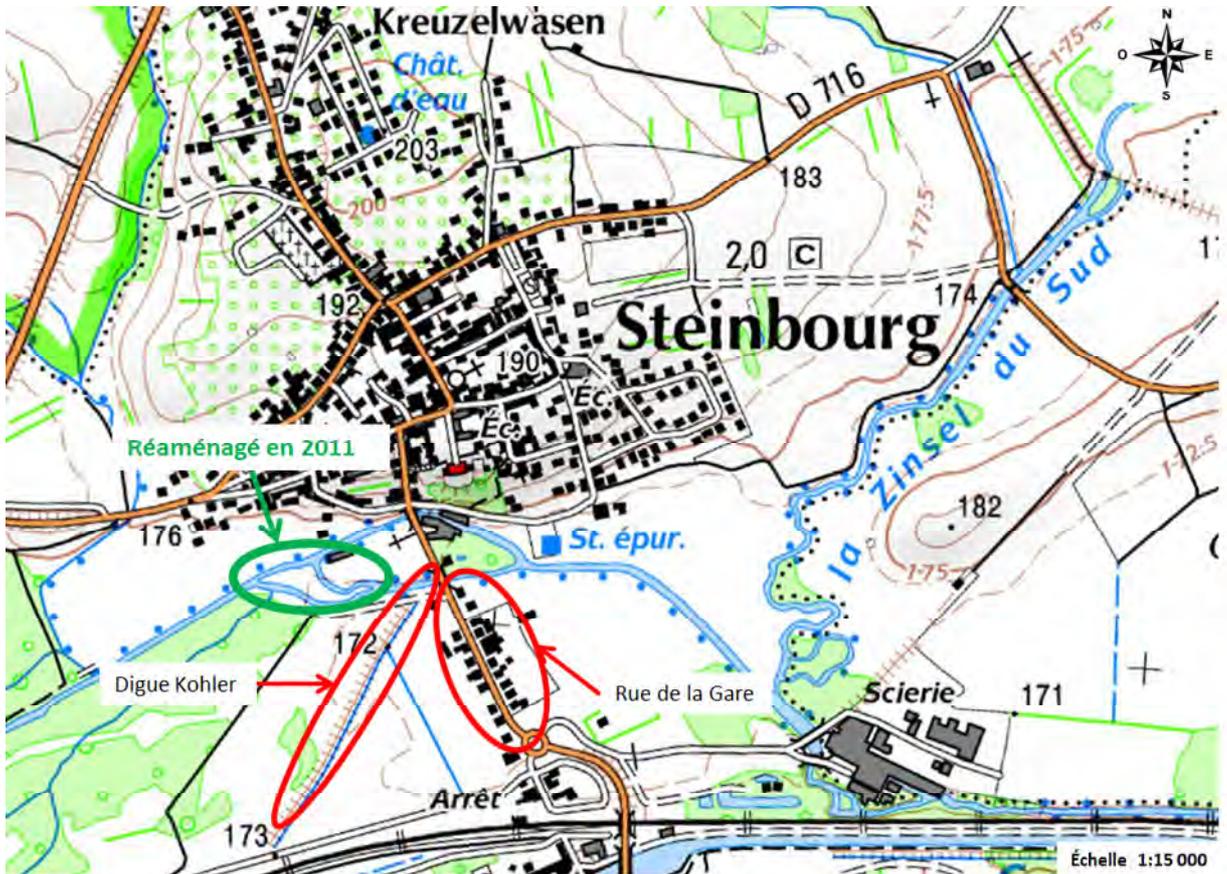


Fig. 25. Localisation de sites vulnérables aux inondations à Steinbourg fond IGN 2010

3.5.6. Dettwiller

Dettwiller, étant la première commune traversée après la confluence de la Zorn et de la Zinsel, est fortement vulnérable aux inondations. De nombreuses études ont déjà été menées sur la commune, car la présence de la ligne SNCF ainsi que la présence d'un virage lors du passage de la Zorn sous la voie SNCF ont pour conséquence d'augmenter le risque de débordement à Dettwiller.

Actuellement, les sites les plus vulnérables aux inondations sont les suivants :

- Rue de la haute montée : Cette rue est à la limite d'être inondable pour une crue trentennale, une laisse de crue est présente pour la crue de 1998.
- Rue du jeu des enfants : Cette rue dans le prolongement de la rue de la haute montée en rive gauche est aussi inondable pour une crue trentennale.
- Rue de Saverne : Ce secteur s'avère problématique car cette rue est inondée à partir des périodes de retour de 10 ans.
- Rue de la Mossel : On retrouve la partie de la rue proche du pont sur la Mossel vulnérable pour les crues de période de retour trentennale.

Dettwiller sera concerné par l'écrêtement du débit engendré par les sites de ralentissement dynamique sur la Zinsel.

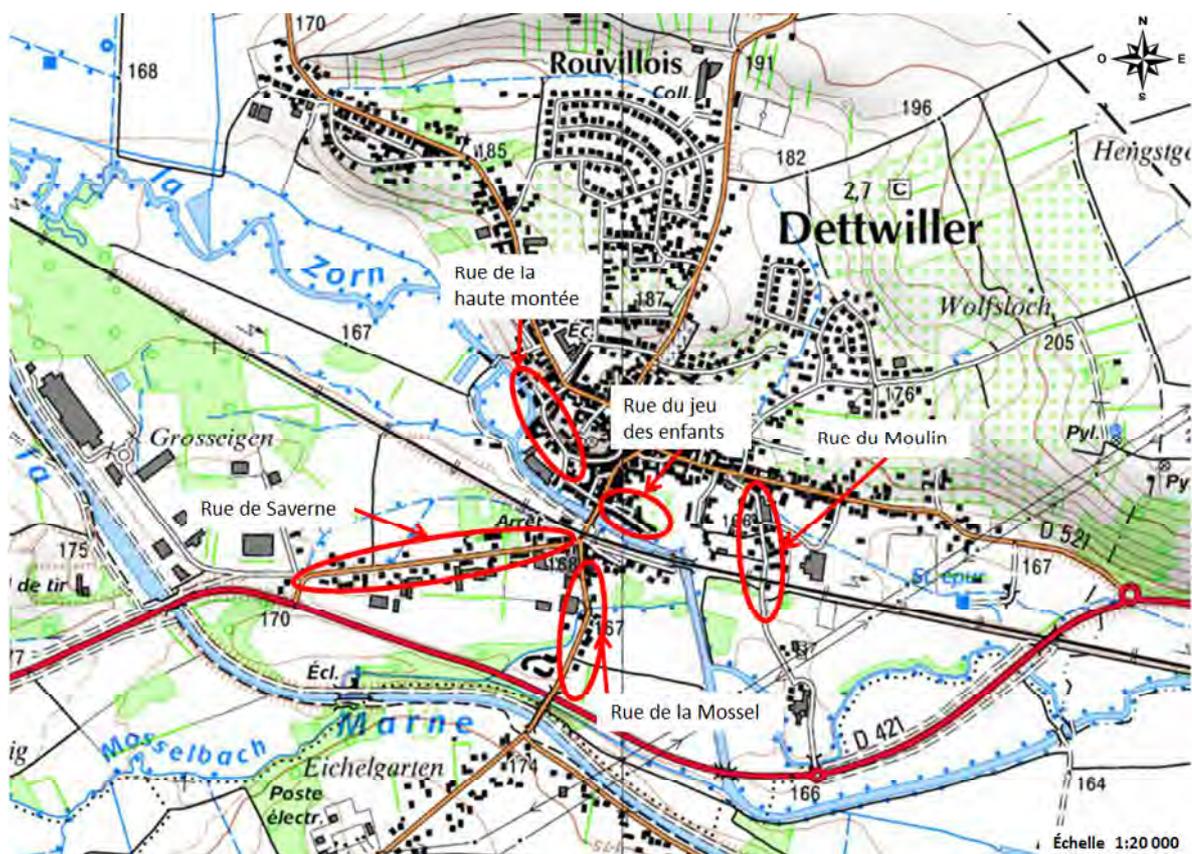


Fig. 26. Localisation de sites vulnérables aux inondations à Dettwiller, fond IGN 2010

Le phénomène hydraulique qui cause l'inondation de la rue de Saverne est un phénomène de stockage au Nord de la voie SNCF qui est provoqué par la contrainte du pont SNCF accrue par le virage prononcé de la Zorn à cet endroit. Ce stockage provoque une élévation progressive du niveau d'eau jusqu'à ce que l'eau passe par l'ouvrage de décharge sous la voie SNCF avant de venir inonder la rue de Saverne. (cf schéma ci-après)

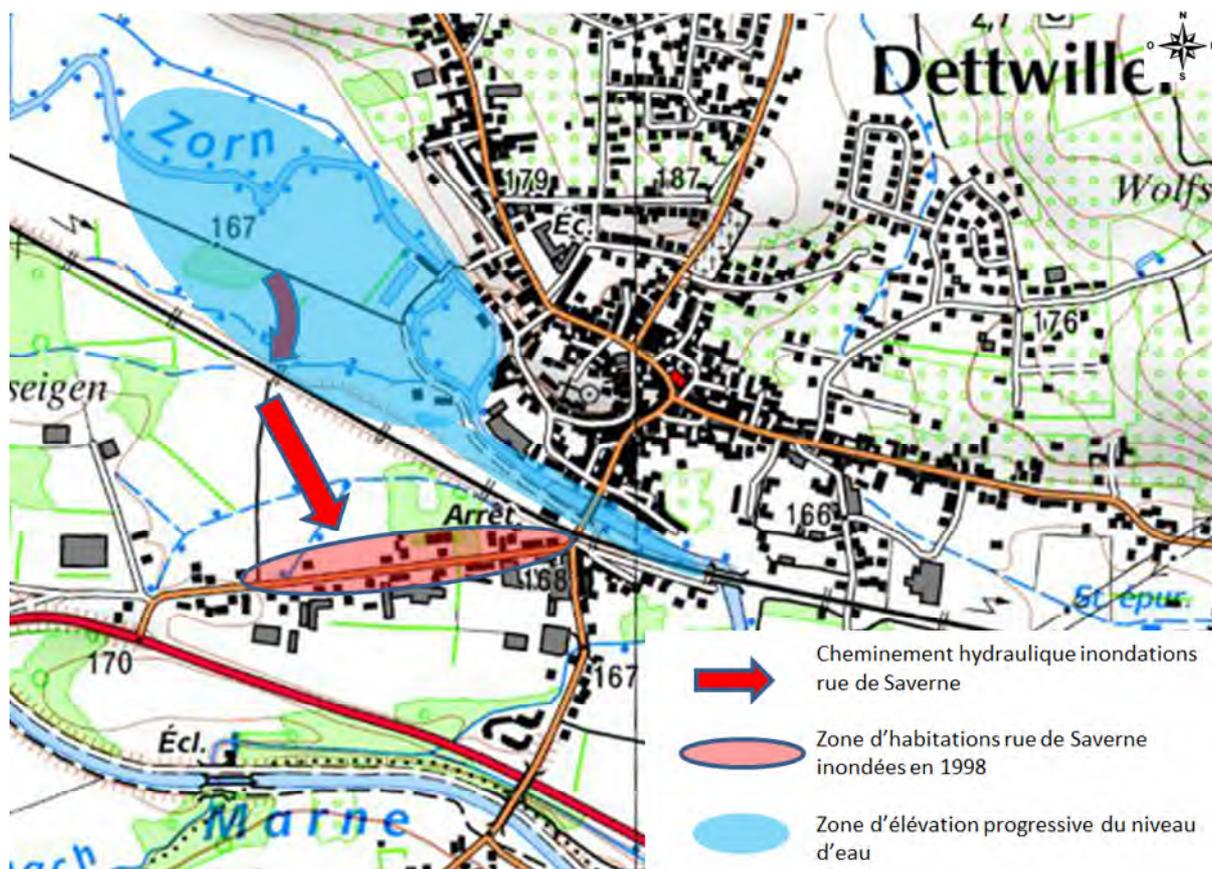


Fig. 27. Schéma d'explication du phénomène d'inondations de la rue de Saverne à Dettwiller

4. DEFINITION DES PROTECTIONS RAPPROCHEES

Suite à l'étude de faisabilité (ARTELIA, 2006), et face la réticence des riverains à la mise en place de protections rapprochées, le SIA de la Haute Zorn a réfléchi à la mise en place d'ouvrages de ralentissement dynamique des crues.

L'objectif de l'étude du ralentissement dynamique (ARTELIA, 2008), était de protéger l'intégralité des communes du bassin versant de la Haute Zorn. Cependant, les ouvrages écrêteurs de crue situés sur la Zorn en amont de Saverne n'avaient pas d'effet significatif sur la ligne d'eau. C'est pour cela que des protections rapprochées ont été maintenues sur les communes de Saverne, Monswiller, et Steinbourg. Les protections rapprochées à Dettwiller ont pu être revues à la baisse grâce aux ouvrages de ralentissement dynamique prévus sur la Zinsel.

Pour le dimensionnement des protections rapprochées, une revanche de 40 cm est appliquée au vu de la précision du modèle.

4.1. SAVERNE

Les protections rapprochées sur la commune de Saverne sont celles qui ont été adoptées par le syndicat suite à l'étude de faisabilité de 2010.

L'objectif est ici de vérifier avec le débit trentennal la ligne d'eau obtenue en modélisant des protections insubmersibles au droit des zones de protections rapprochées.

Les aménagements proposés comprennent aussi la suppression du pont de la Roseraie qui comporte une arche et qui contraint l'écoulement en crue.

Des murs de protection sont prévus pour protéger la rue de la Roseraie, le passage des tanneurs, ainsi que des batardeaux amovibles prévus pour le quai de la Zorn. Une digue de protection est prévue afin de limiter les débordements au droit du parking des remparts.

La suppression du pont de la Roseraie (remplacé par une passerelle piétonne) ainsi que la suppression des vannes de la passerelle du Vieil Hôpital font office de mesures compensatoires aux protections rapprochées.

Les aménagements de protections dimensionnés à la phase APS sont résumés dans le tableau suivant :

Type	Localisation	Linéaire (m)	Hauteur max (m)	Hauteur moyenne (m)
Mur	protection rue de la Roseraie	240	1,09	0,78
Digue	parking des remparts	62	1,10	0,96
Mur	amont de la Gare	140	0,70	0,30

Tabl. 10 - Dimensions des aménagements de protections rapprochées à Saverne, crue trentennale

Un dimensionnement plus fin est à envisager dans la prochaine étape de la maîtrise d'œuvre en prenant en compte les contraintes d'emprise de la digue, et les contraintes de génie civil de construction des murs.

Les aménagements proposés dimensionnés sont résumés dans l'annexe 6

Les différences de ligne d'eau entre l'état initial et l'état projet sont présentées dans le tableau suivant :

Localisation	point	Q30 (m)	Q30 protections (m)	incidence totale (m)
Amont pont Lohbach	P132	186,97	186,89	-0,08
Rue de la Roseraie	ZOR2	186,28	186,07	-0,21
Amont pont de la Roseraie	P133	186,10	185,74	-0,36
Aval pont RN4	P134	185,59	185,58	-0,01
Parking des remparts	ZOR5	185,32	185,3	-0,02
Amont pont de la Gare	P136	184,3	184,31	0,01
Quai de la Zorn	ZO5b	183,58	183,61	0,03
amont diffluence Goldenberg	P137	183,24	183,24	0,00

Tabl. 11 - Impact sur la ligne d'eau des protections rapprochées à Saverne

Nous observons que la principale cause d'abaissement de la ligne d'eau est la suppression du pont de la Roseraie. La mise en place des murs et digues entraîne uniquement un rehaussement de 1cm à 2cm de la ligne d'eau par rapport à l'état pont supprimé.

Dans un deuxième temps, il convient de comparer les lignes d'eau obtenues pour entre les modèles de 2010 et de 2015 :

Localisation	point	Q30 2010 (m)	Q30 2015 (m)	différence (m)
Amont pont Lohbach	P132	187,16	186,89	-0,27
Rue de la Roseraie	ZOR2	186,08	186,07	-0,01
Amont pont de la Roseraie	P133	185,77	185,74	-0,03
Aval pont RN4	P134	185,63	185,58	-0,05
Parking des remparts	ZOR5	185,35	185,30	-0,05
Amont pont de la Gare	P136	184,32	184,31	-0,01

Tabl. 12 - Différences résultats de modélisation à l'état aménagé entre 2010 et 2015 à Saverne

Les résultats des modélisations des protections entre les modèles sont sensiblement les mêmes. Le point P132 subit un fort abaissement dû à la présence juste en amont d'un casier dans le modèle de 2015 qui entraîne un phénomène de stockage. On retrouve l'influence des casiers CR01 et CR03 sur les autres profils mais l'ordre de grandeur est le même.

ZOR2 est le point de calcul où commence la protection en rive droite de la rue de la Roseraie. Pour le secteur aménagé à partir du pont de la Roseraie, les différences de ligne d'eau sont inférieures à 5cm, ce qui permet de valider le dimensionnement des protections à Saverne.

4.2. MONSWILLER

Les protections rapprochées sur la commune de Monswiller visent à protéger la rue de la République ainsi que la Grand'Rue.

La modélisation des protections est réalisée en déconnectant les casiers créés en lit majeur aux emplacements des digues, soit pour les liaisons casiers – casiers ou les liaisons lit mineur – casier.

Les aménagements de protections rapprochées dimensionnés au stade APS sont résumés dans l'annexe 7.

Les aménagements ont été dimensionnés au stade APS, leurs dimensions sont résumées dans le tableau suivant :

Type	Localisation	linéaire (m)	Hauteur max(m)	Hauteur moyenne (m)
Digue	amont pont république	520	1,10	0,65
Mur	aval pont république	100	0,81	0,63
Digue	aval pont de la république	140	0,61	0,50
Digue	amont grand rue	220	1,10	0,83
Mur	Rive gauche amont pont grand rue	54	0,69	0,47
Mur	Rue du stade	55	0,41	0,37
Mur	rive droite	730	0,48	0,25

Tabl. 13 - Dimensions des aménagements de protections rapprochées à Monswiller, crue trentennale

Entre l'amont de Monswiller et le pont de Grand'Rue, le lit majeur est supprimé en rive droite. L'élargissement du lit mineur a aussi été modélisé par une risberme de trois mètres de large en rive gauche sur un linéaire de 330m entre le pont de la République et le pont de Grand'Rue. Un élargissement du lit mineur est aussi prévu sur un linéaire de 140m en rive droite à l'aval du pont de la République.(cf figure suivante)

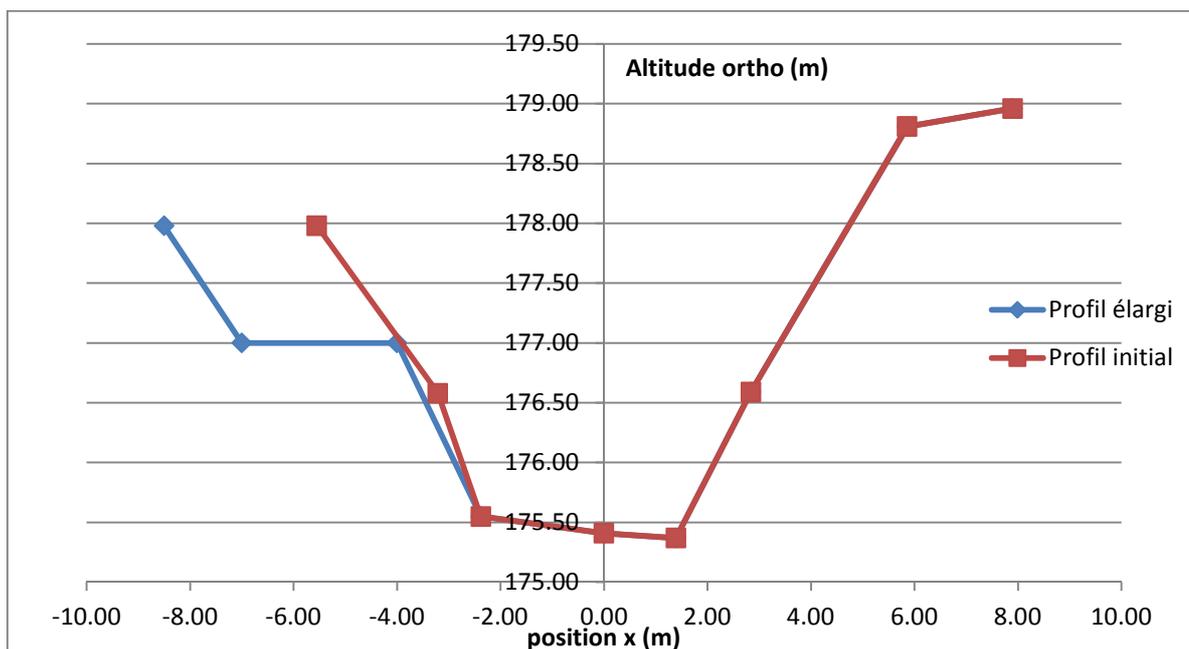


Fig. 28. Elargissement du lit mineur avec risberme en rive gauche à Monswiller, profil MO3

Les différences de ligne d'eau entre l'état initial et l'état projet sont les suivantes :

Localisation	Point	Cote Q30 (m)	Q30 aménagé (m)	Incidence (m)	Ecart : 2015 - 2010 (m)
Seuil amont Monswiller	ZOR6	180,32	180,38	0,06	0,07
Champ amont pont de la république	MO1	179,25	179,36	0,11	0,03
Amont pont de la république	P139	179,02	179,04	0,02	-0,16
Aval pont de la république	139V	178,82	178,85	0,03	-0,26
Champ aval pont de la république	MO3	178,64	178,57	-0,07	0,00
Amont pont de la Gare	P140	178,48	178,38	-0,10	0,00
Aval pont de la Gare	140V	178,24	178,15	-0,09	-0,14
Terrains de foot	141X	176,35	176,37	0,02	0,15
Amont passerelle stade	P141	176,90	176,93	0,03	-0,36

Tabl. 14 - Impact sur la ligne d'eau des protections rapprochées à Monswiller

On observe une augmentation de 11cm de la ligne d'eau en amont de la rue de la République qui s'explique par la mise en place d'une digue en rive gauche et d'un mur en rive droite qui contraint l'écoulement. Une diminution de 10 cm en amont de Grand'rue entre l'état initial et l'état projet peut s'expliquer par l'élargissement du lit mineur prévu à cet endroit.

Les écarts entre le modèle de 2010 et 2015 montrent une ligne d'eau inférieure pour le modèle de 2015, ceci s'explique par le phénomène de stockage des casiers en rive gauche qui ont tendance à abaisser le niveau d'eau du lit mineur.

4.3. STEINBOURG

Les protections rapprochées de la commune de Steinbourg visent à protéger la rue de la gare qui était inondée par retour. La présence d'une digue en amont de Steinbourg est insuffisante car sous dimensionnée pour la crue trentennale, et qui ne prend pas en compte le phénomène d'inondation par retour. (cf figure ci-après photo crue 1998 à Steinbourg)



Fig. 29. Inondation de 1998 rue de la gare à Steinbourg, photo aérienne DDAF Saverne

Les aménagements dimensionnés à Steinbourg sont résumés dans le tableau suivant :

Type	Localisation	linéaire (m)	Hauteur max(m)	Hauteur moyenne (m)
Digue	Amont rue de la gare (digue Kohler)	680	2,4	2,0
Digue	Aval rue de la Gare	280	1,5	0,65
Mur	Aval rue de la Gare	68	0,7	0,7
Digue	Parking île difffluence	60	1,4	0,83

Tabl. 15 - Dimensions des aménagements de protections rapprochées à Steinbourg, crue trentennale

Les aménagements de protections rapprochées dimensionnés au stade APS sont résumés dans l'annexe 8,

La modélisation des aménagements de protections rapprochées a été réalisée, les impacts sur la ligne d'eau sont résumés dans le tableau suivant :

Localisation	Point	Q30 initial (m)	Q30 aménagé (m)	Incidence (m)	Ecart : 2015 - 2010 (m)
Amont diffluence	P145	172,98	173,21	0,23	0,18
Amont pont de la Zorn	146w	172,89	173,18	0,29	0,16
Aval pont de la Zorn	146x	171,32	171,37	0,05	-0,06
Amont confluence avec le canal	ZOR8	171,11	171,14	0,03	-0,15
Aval confluence avec le canal	K147	171,00	171,03	0,03	-0,25
canal usinier amont usine	CL2	172,83	173,20	0,37	0,39
Canal usinier aval usine	CL5	171,15	171,28	0,13	-0,04
amont digue Kohler	CR23 (casier)	172,94	173,21	0,27	NC

Tabl. 16 - Impact sur la ligne d'eau des protections rapprochées à Steinbourg

Les protections d'endiguement entraînent une augmentation de la ligne d'eau à Steinbourg allant jusqu'à 37cm pour le canal usinier, Cette augmentation s'explique par la réhausse de la digue Kohler en amont de Steinbourg qui possède un point bas en rive droite.

Les écarts entre 2010 et 2015 montrent que ce phénomène de rehaussement de ligne d'eau avait été sous-estimé car la ligne d'eau sur le canal usinier avait été estimée 39cm en dessous de la ligne d'eau de 2015. Cette différence peut s'expliquer par le calage du modèle qui est différent mais surtout par l'utilisation des casiers qui modélisent les digues infranchissables et qui dirigent donc tout le débit vers le canal usinier.

Cependant cette rehausse de la ligne d'eau n'a pas d'impact sur des enjeux à proximité étant donné la topographie du secteur.

4.4. DETTWILLER

La modélisation des protections sur la commune de Dettwiller est faite en tenant compte du ralentissement dynamique des crues. Ainsi le débit juste en amont de Dettwiller passe de 99 m³/s à 73,1 m³/s d'après les résultats de la modélisation hydrologique de 2010.

Grâce aux ouvrages de ralentissement dynamique la protection de Dettwiller la ligne d'eau est nettement abaissée pour la crue trentennale. Des problèmes d'inondations subsistent au niveau de la rue de Saverne. Cela nécessite la construction d'une digue au nord de celle-ci. Un chenal sera créé afin de guider les écoulements vers la Mossel en cas de surverse pour une crue de période de retour supérieure à trente ans.

Les aménagements de protections rapprochées dimensionnés au stade APS sont résumés dans l'annexe 9.

Les aménagements dimensionnés sur la commune de Dettwiller sont résumés dans le tableau suivant :

Type	Localisation	linéaire (m)	Hauteur max(m)	Hauteur moyenne (m)
Digue	Nord rue de Saverne	570	1,10	0,90
Chenal	aval pont république	475	NC	NC

Tabl. 17 - Dimensions des aménagements de protections rapprochées à Dettwiller, crue trentennale

Considérant l'écrêtement du débit en amont de Dettwiller, l'impact de sur la ligne d'eau est résumé dans le tableau suivant :

Localisation	Point	Cote Q30 avec ZRDC (m)	Cote Q30 avec ZRDC et digue (m)	Incidence (m)	Ecart : 2015 - 2010 (m)
Usine électrique	P148	166,16	166,16	0,00	0,04
Ponceau SNCF Unterwehrgraben	CR33	166,18	166,18	0,00	-0,07
Nord rue de Saverne	CR35	166,13	166,14	0,01	-0,09
Sud rue de Saverne	CR37	164,88	164,88	0,00	-0,29
Amont pont rue de la gare	P149	165,49	165,49	0,00	0,17
Amont pont SNCF	Q130	165,21	165,22	0,01	0,16
Aval confluence Mossel/Zorn	30P	164,86	164,87	0,01	0,15
Moulin Marzolf	P231	164,58	164,59	0,01	0,18

Tabl. 18 - Impact sur la ligne d'eau des protections rapprochées à Dettwiller

L'impact de la digue se résume à une augmentation de 1cm de la ligne d'eau pour un casier en amont (CR33) de 1cm pour un casier en aval (CR37). Les résultats de lignes d'eau sont présentés avec l'effet de ralentissement dynamique à l'entrée de Dettwiller. Ce ralentissement permet ainsi

de limiter le débit de crue et d'éviter les débordements constatés en l'état actuel par-dessus la rue de Saverne, ce qui explique le faible impact de la digue. En l'absence de digue, le ralentissement dynamique ne permet toutefois pas d'éviter les inondations de certaines habitations de cette rue.

Signalons également qu'au global, les aménagements prévus dans le projet (ralentissement et protections) permettent un abaissement de 2 5cm à Dettwiller.

4.5. DOSENHEIM

Dossenheim se situe sur la vallée de la Zinsel en aval de sept sites de ralentissement dynamique des crues. Le débit de pointe de la crue trentennale passe de 40,3 m³/s à 24,5 m³/s en amont de Dossenheim.

Cet écrêtement de débit entraîne une baisse de la ligne d'eau présentée dans le tableau suivant :

Localisation	Point	cote Q30 (m)	cote Q30 avec zrdc (m)	incidence (m)
aval moulin Schweyer	ZIN1	181,56	181,29	-0,27
Camping Dossenheim	Z02	181,45	181,14	-0,31
amont moulin Burgraff	BUR	181,29	180,82	-0,47
Amont pont RD14	D14	180,53	179,85	-0,68
Rue de la Zinsel	Z04	180,34	179,76	-0,58
Aval Dossenheim	ZIN3	180,18	179,61	-0,57

Tabl. 19 - Impact sur la ligne d'eau du ralentissement dynamique à Dossenheim

Grâce au ralentissement dynamique, il y a un abaissement de la ligne d'eau à Dossenheim allant de -27 cm en aval du moulin Schweyer jusqu'à -68 cm au niveau du pont de la D14.

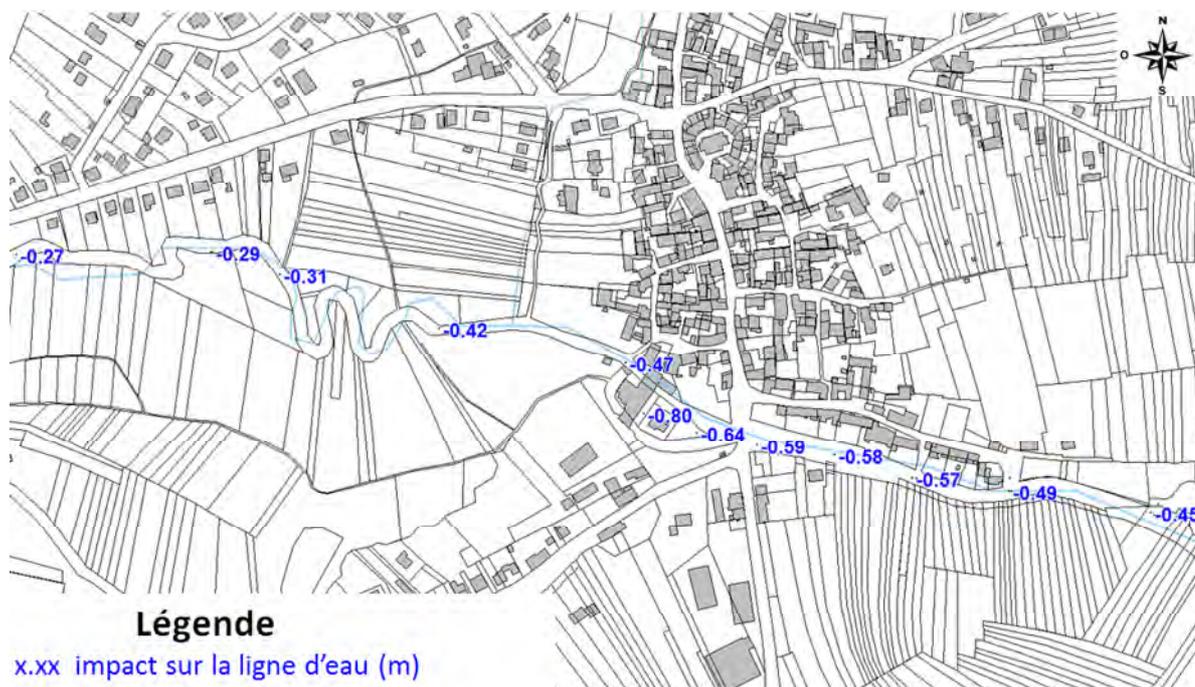


Fig. 30. Impact du ralentissement dynamique à Dossenheim

Cet abaissement permet d'éviter les débordements de la Zinsel dans Dossenheim pour une crue trentennale, ainsi il n'y a pas la nécessité de mettre en place des protections rapprochées.

4.6. HATTMATT

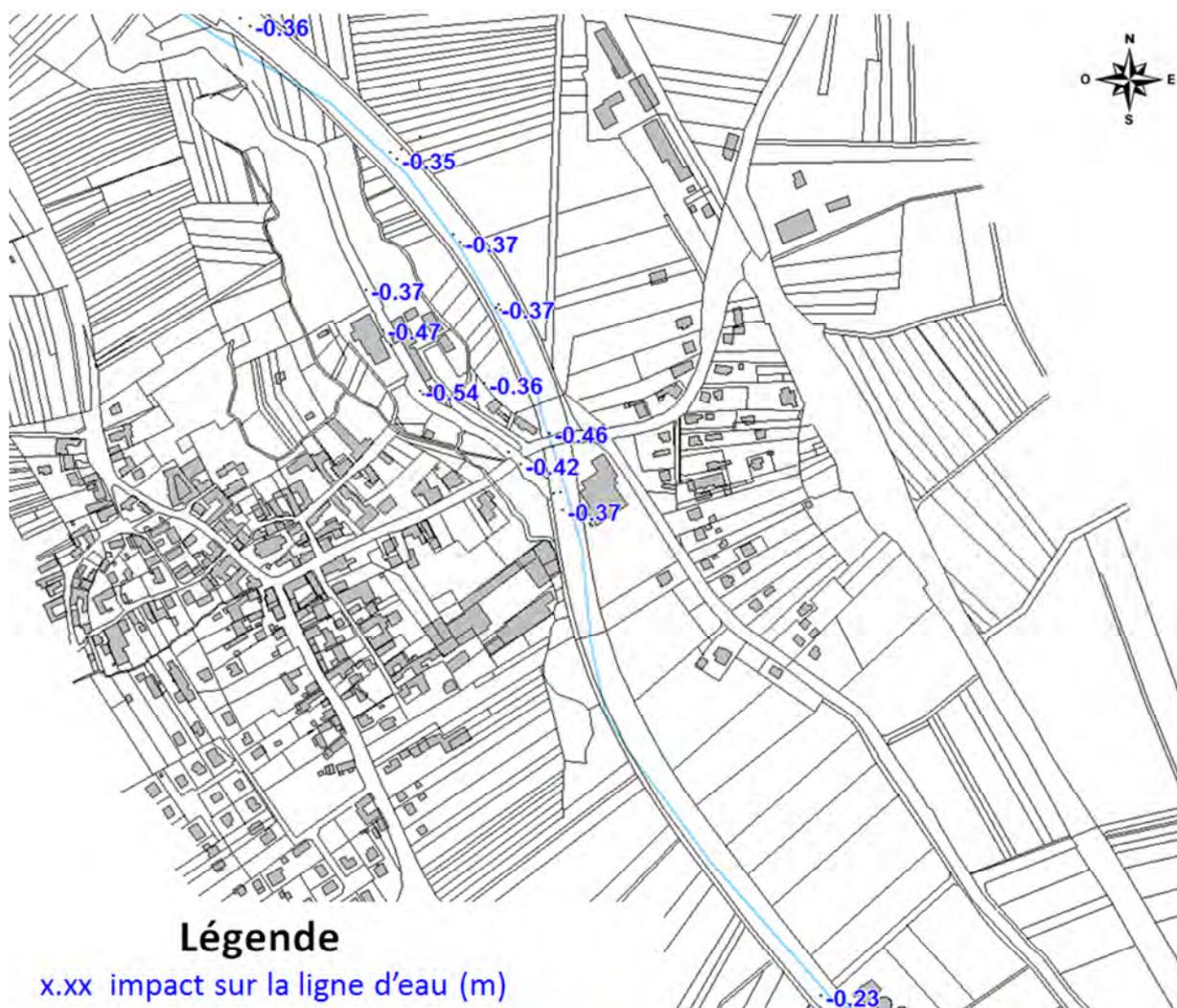
Le village d'Hattmatt se situe en aval de sept sites de ralentissement dynamique des crues. Le débit en amont d'Hattmatt passe de 55,1 m³/s à 29.8 m³/s.

L'impact sur la ligne d'eau au niveau de Hattmatt est présenté dans le tableau suivant :

Localisation	Point	cote Q30 (m)	cote Q30 avec zrdc (m)	incidence (m)
Amont Hattmatt	BES	176,70	176,33	-0,37
Amont Pont Zinsel	BES1	176,62	176,16	-0,46
Amont usine (canal)	BOU	176,70	176,33	-0,37
Amont pont canal	BOU3	176,55	176,05	-0,50
aval confluence canal Zinsel	Z08	176,40	176,03	-0,37
STEP Hattmatt	Z09	175,62	175,39	-0,23

Tabl. 20 - Impact sur la ligne d'eau du ralentissement dynamique à Hattmatt

Les barrages écrêteurs de crue situés en amont de Hattmatt entraînent un abaissement de la ligne d'eau allant jusqu'à -50 cm et -46 cm au niveau des deux ponts sur la Zinsel et le canal usinier.

**Fig. 31. Impact du ralentissement dynamique à Hattmatt**

Cette diminution importante de la ligne d'eau permet d'empêcher la Zinsel de déborder dans Hattmatt pour une crue trentennale, il n'y a donc pas la nécessité de protections rapprochées à Hattmatt.

4.7. IMPACTS DES PROTECTIONS RAPPROCHEES EN AVAL

Les aménagements de type protections rapprochées induisent potentiellement une accélération des écoulements avec le risque d'aggraver les inondations à l'aval. Dans la stratégie de protection contre les inondations du bassin versant de la Zorn, le ralentissement dynamique fait office de mesures compensatoires aux protections rapprochées. Pour vérifier l'impact en aval des protections rapprochées, un hydrogramme a été extrait 7 km en aval de Dettwiller au niveau de Wilwisheim avant les aménagements et après les aménagements.

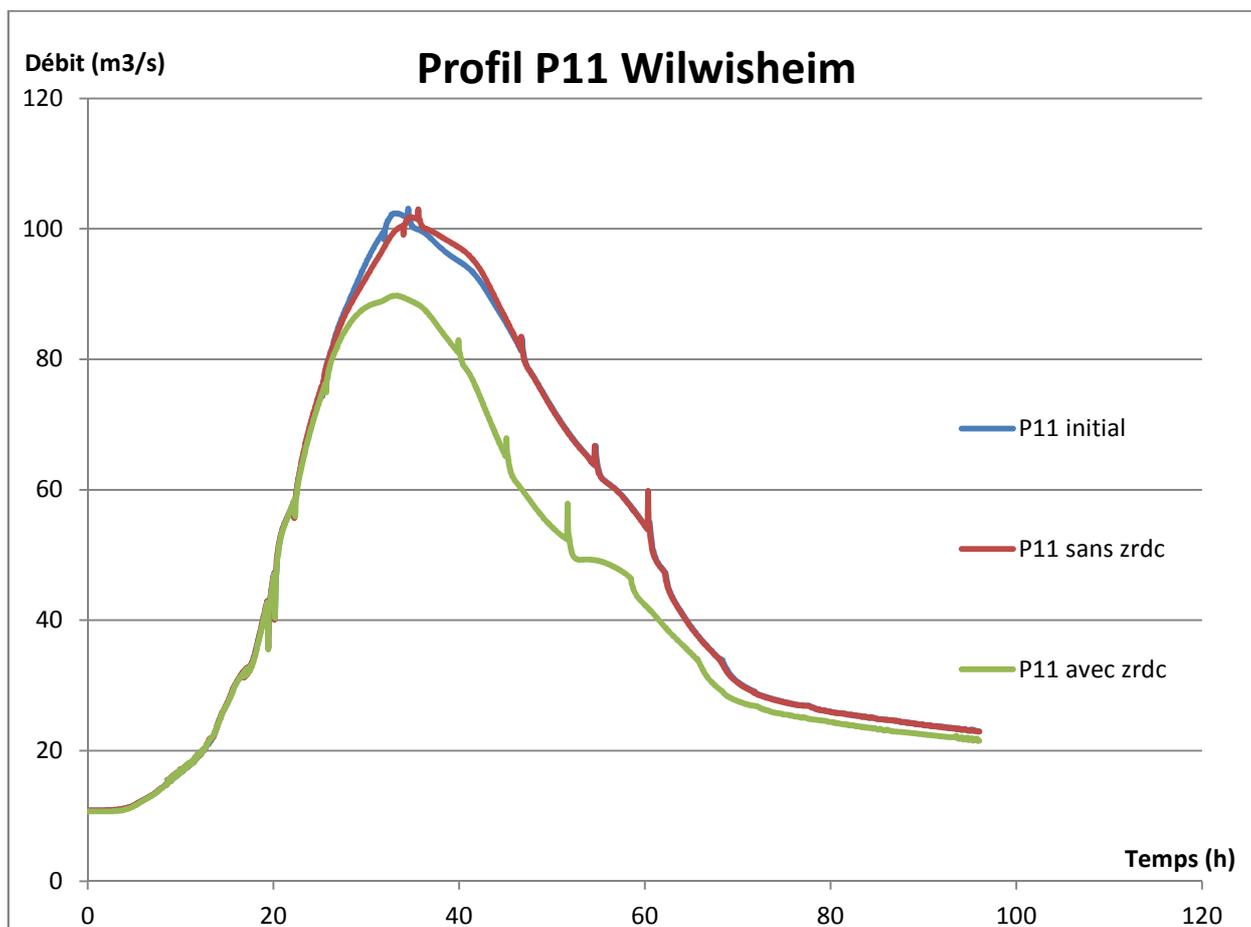


Fig. 32. Impact des protections rapprochées en aval de Dettwiller

Le test des aménagements de protections rapprochées montre que sans le ralentissement dynamique, l'effet observé est un léger décalage dans le temps de l'hydrogramme qui n'a pas de conséquences sur le débit de pointe. On remarque d'ailleurs que les protections rapprochées ont tendance à ralentir légèrement la propagation de l'hydrogramme, contrairement à ce qui attendu généralement avec les endiguements. Cet effet est lié à l'implantation des protections, qui correspondent le plus souvent à des endiguements réalisés perpendiculairement au cours d'eau et qui favorisent l'épandage et le stockage des crues en amont et ralentissent ainsi la propagation des crues vers l'aval.

Le ralentissement dynamique a été testé avec un débit sur la Zinsel écrêté afin de retrouver le débit de 73,1 m³/s en entrée de Dettwiller mais de manière simplifiée, ne tenant pas compte de la vidange des retenues à la décrue (volume simulé plus faible), l'objectif étant d'illustrer l'effet positif global du projet sur le débit de pointe. La figure précédente présente donc bien l'effet compensatoire des sites de ralentissement dynamique.

5. PROTECTION DES CRUES PAR RALENTISSEMENT DYNAMIQUE

5.1. OBJECTIFS DU RALENTISSEMENT DYNAMIQUE

Le ralentissement dynamique des crues a été fortement incité dans les années 2000 avec la mise en place des PAPI et la réflexion du risque inondation à l'échelle du bassin versant. Jusqu'alors, les protections contre les inondations du type mur ou digue, sans mesures compensatoires avait pour effet d'accélérer les écoulements, allant jusqu'à aggraver les inondations en aval.

L'objectif des ouvrages de ralentissement dynamique vise tout d'abord à ralentir les écoulements afin d'avoir une meilleure emprise sur eux et d'atteindre une régulation optimale (CEMAGREF, 2004). Ce concept passe par la construction d'ouvrages de petite taille le plus en amont possible du bassin versant, en essayant de réduire les vitesses d'écoulement et d'étaler dans le temps le volume parvenant aux rivières.

La notion de petits ouvrages désigne des volumes de retenues allant de quelques dizaines de milliers de m³ à un ou deux millions de m³. Afin d'avoir une efficacité significative sur l'écrêtement considéré, l'ordre de grandeur est le stockage allant de 1/20^{ème} et 1/5^{ème} du volume de la crue considérée selon l'efficacité recherchée. (BOUBEE, 2006)

Le concept de ralentissement dynamique s'applique bien d'avantage aux bassins versants de plaine alluviale qu'aux bassins versants en contexte de forte pente soumis à des crues très rapides.



Fig. 33. Exemple d'ouvrage de ralentissement dynamique en Autriche

Les ouvrages d'écrêtement doivent être dimensionnés pour des crues moyennes à rares avec une période de retour entre 5 ans et 100 ans. Le degré de protection du bassin versant de la Zorn étant la période de retour 30 ans, le projet se situe dans cette fourchette.

Le fonctionnement des barrages écrêteurs de crue est résumé dans le schéma suivant :

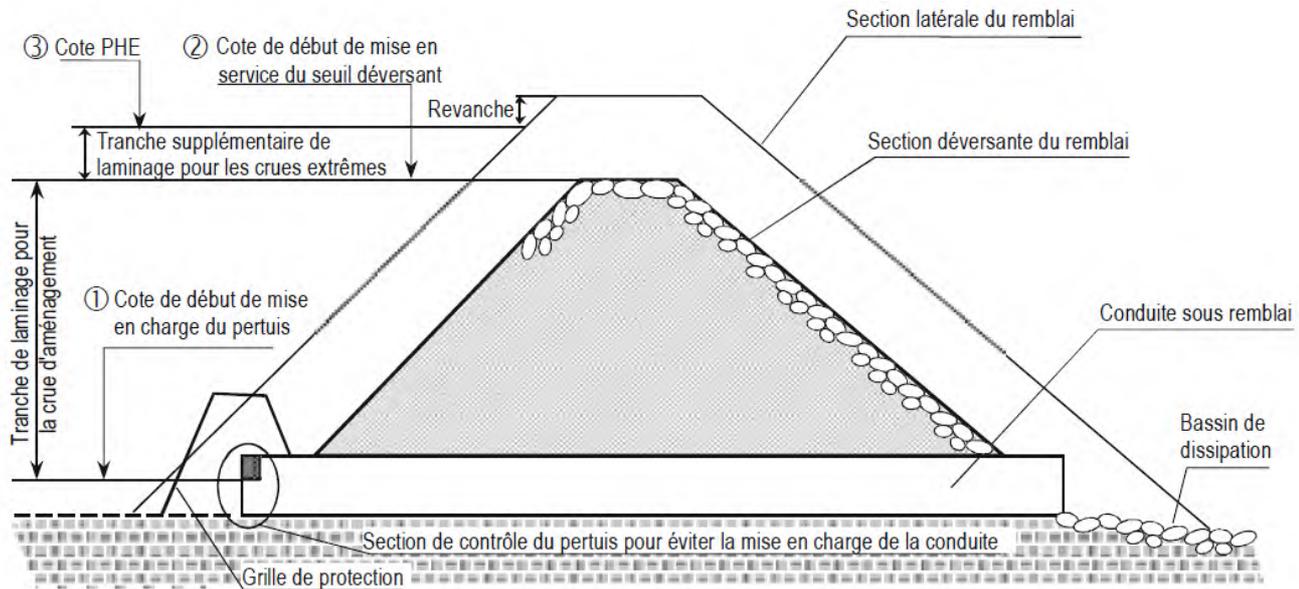


Fig. 34. Schéma d'un barrage écrêteur de crue, Guide CEMAGREF 2004

Les différentes cotes dimensionnant l'ouvrage de ralentissement sont :

- La cote de protection : correspond à la cote atteinte pour la crue de période de retour souhaitée pour la protection (30 ans pour la Zorn). Cela correspond à la mise en fonctionnement de l'évacuateur de crue.
- La cote PHE (Plus Hautes Eaux) : correspond à une crue exceptionnelle pour laquelle la stabilité de l'ouvrage n'est pas menacée.
- La hauteur de crête : correspond à la cote PHE à laquelle est ajoutée une revanche de sécurité. Cette revanche est calculée en fonction des incertitudes sur l'hydrologie, et aussi suivant une estimation du déferlement de vagues. (MERCKLE, 2014)

L'effet attendu sur les hydrogrammes est présenté sur la figure suivante :

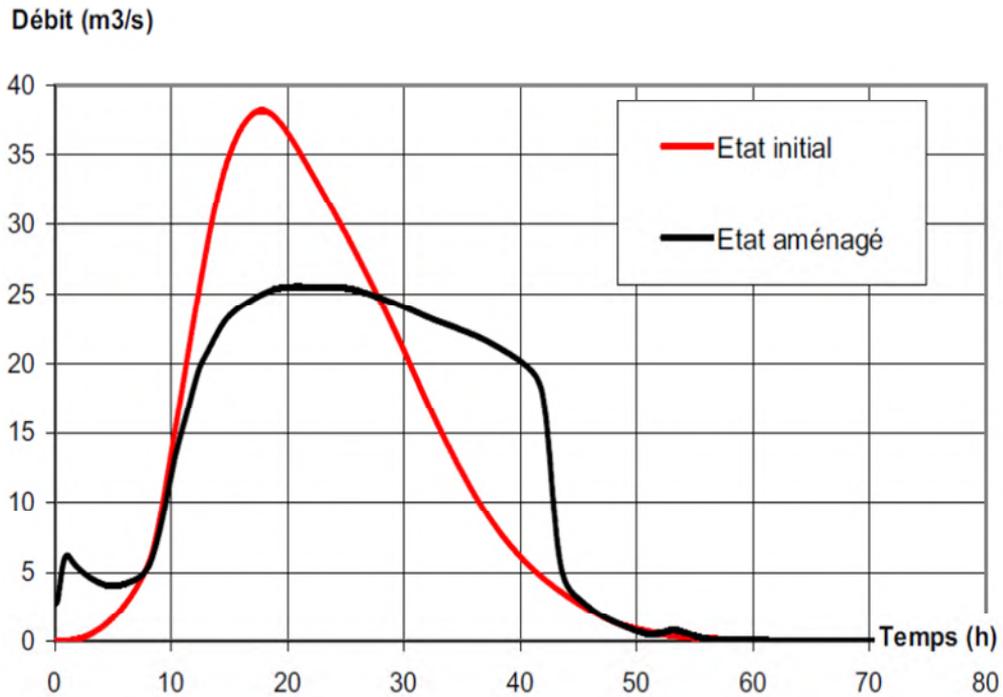


Fig. 35. Impact d'un barrage écrêteur de débit sur un hydrogramme

5.2. MODELISATION HYDROLOGIQUE DE LA ZORN

5.2.1. Présentation du logiciel Pluton

Le logiciel PLUTON est un programme développé par ARTELIA modélisant la transformation pluie-débit sur les bassins versants naturels, urbains ou semi-urbains. Le bassin versant principal est découpé en unités élémentaires : les sous-bassins. PLUTON a pour objet le calcul de l'hydrogramme de crue de chaque sous-bassin en injectant une pluie statistique ou observée. Dans un deuxième temps, les résultats peuvent être repris dans un modèle hydraulique simulant la propagation des hydrogrammes.

Les sous-bassins sont caractérisés par leur surface, le coefficient de ruissellement, la pente et la longueur du plus long chemin hydraulique. Les données d'entrée sont des hyétogrammes mesurés ou calculés, PLUTON calcul à partir de ces derniers les hydrogrammes à l'exutoire de chaque sous-bassin. (cf figure ci-après schéma de fonctionnement et annexe 10)

Les ouvrages écrêteurs de crue peuvent être modélisés en définissant une loi cote-volume ainsi que les caractéristiques de l'orifice de sortie et du déversoir de sécurité.

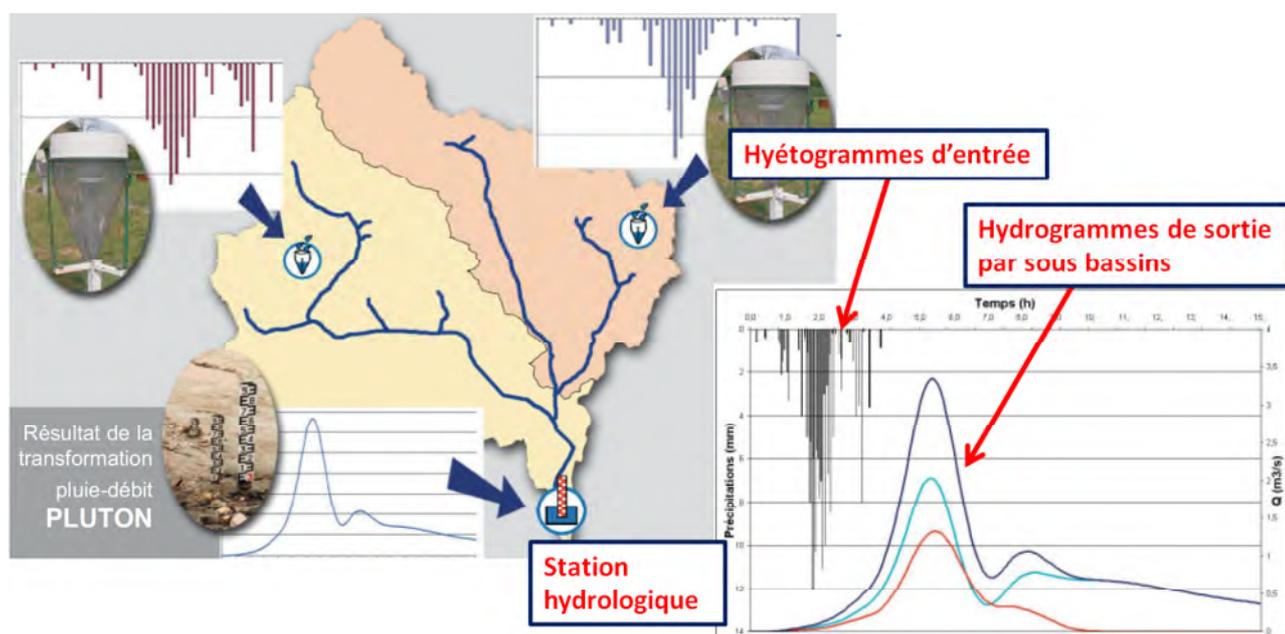


Fig. 36. Schéma de fonctionnement PLUTON

5.2.2. Le modèle Pluton de la Zorn

Le modèle PLUTON de la Zorn a été construit en 2009, il schématise les bassins versants de la Zinsel et de la Zorn entre Oberhof et Dettwiller. Le bassin versant global (Zorn et Zinsel) est composé de 23 sous-bassins versants « élémentaires » : 17 sous-bassins pour la Zinsel, et 6 sous-bassins pour la Zorn. La localisation des sous-bassins du modèle est présentée dans l'annexe 11.

Le modèle PLUTON a été calé sur les débits de la crue trentennale type 1998 issue de l'étude hydrologique de 2007 par la méthode SPEED, sur les débits à l'exutoire des sous-bassins. Un calage en termes de volume a été effectué avec l'hydrogramme mesuré lors de la crue de 1998 à la station débitométrique de Saverne.

Lors de l'étude de faisabilité de ralentissement dynamique sur la Zorn et la Zinsel de 2009, les 23 sous-bassins permettaient de représenter 23 sites écrêteurs de crue potentiels. Parmi les 23 sites potentiels, seulement 17 ont été modélisés en barrages écrêteurs de crue dans PLUTON dans le référentiel NGF orthométrique. Les sites de rétentions abandonnés présentaient soit un volume de stockage insuffisant, soit une contrainte de faisabilité trop importante.

La modélisation des sites est réalisée par l'entrée dans le logiciel de lois cotes-volumes permettant de représenter la topographie du site et ainsi le remplissage et la vidange de chaque rétention. Dans le modèle de 2009, ces lois ont été extrapolées à partir de quelques profils en travers disponibles sur chaque site.

Après l'analyse de l'efficacité individuelle et collective de chaque site, dix sites écrêteurs de crue ont été retenus avec une efficacité jugée bonne sur l'écrêtement du débit et un coût de réalisation acceptable.

Leurs caractéristiques définies en 2010 sont résumées dans le tableau suivant :

nom	Volume stocké (m ³)	cote surverse (m)	largeur pertuis (m)	hauteur pertuis (m)	Débit entrant (m ³ /s)	Débit sortant (m ³ /s)
z2	39 980	208.5	1.5	0.9	8.6	8.0
z3	30 441	202.5	1.5	1.2	10.7	10.3
z4	64 026	198.5	1.8	1.2	14.4	13.5
z5	102 571	194.5	2.5	1.1	17.4	16.3
z6	27 140	201.8	0.6	1.0	4.1	3.5
z8	109 171	191.5	2.4	1.8	21.7	20.5
z10	94 969	188.3	2.8	2.0	24.0	23.5
z14	358 703	178.7	3.5	1.4	33.7	29.8
z16	262 164	174.9	3.0	1.6	31.1	30.0
zo7	355 357	168.3	9.1	2.8	77.6	73.1
total	1 444 522					

Tabl. 21 - Caractéristiques des sites de ralentissement dynamique des crues pour une crue trentennale

Le volume stocké au cours d'une crue trentennale type 1998 est de 1 450 000 m³, le débit écrêté en amont de Dettwiller est ainsi de 73,1 m³/s. Le volume stocké correspond à 31,2% du volume trentennal sur la Zinsel (crue type 1998), et à 11,5% du volume trentennal à Dettwiller (crue type 1998)

5.2.3. Mise à jour des lois cote – surface

Afin de modéliser au mieux l'écrêtement du débit par chaque site de ralentissement dynamique, il faut avoir une connaissance fine des lois cote-surface de chaque ouvrage.

L'objectif de cette phase est de construire de nouvelles lois cote-surface avec le MNT, de les comparer avec les lois cotes-surface de 2010, puis d'affiner le dimensionnement des barrages écrêteurs de crue.

Lors de l'étude de faisabilité de 2010, les lois cotes surfaces avaient été définies à partir de levés géomètres (quelques profils en travers pour chaque site). J'ai dans un premier temps construit des lois cote-surface avec le MNT désormais disponible et l'outil vertical mapper de MAPINFO. Les lois cote-surface sont construites avec un pas d'espace de 20 cm, ce qui permet d'avoir une bonne précision sur le remplissage des ouvrages.

En prenant les cotes de stockage pour la crue trentennale définies en 2010, la comparaison en termes de volumes stockés est la suivante :

commune	nom	Volume stockage 2010 (m ³)	Volume Stockage 2015 (m ³)	Ecart relatif (%)
	z2	39 980	44 052	10%
	z3	30 441	22 623	-26%
	z4	64 026	67 198	5%
	z5	102 571	133 609	30%
	z6	27 140	30 669	13%
	z8	109 171	124 605	14%
	z10	94 969	163 910	73%
Dossenheim	total 1 :	468 298	586 665	25%
	z14	358 703	279 516	-22%
Hattmatt	total 2 :	827 001	866 181	5%
	z16	262 164	623 642	138%
	zo7	355 357	503 392	42%
Dettwiller	total 3 :	1 444 522	1 993 215	38%

Tabl. 22 - Comparaison des volumes stockés 2010 -2015 aux cotes de la crue de projet

La comparaison des volumes de stockage des sites écrêteurs de crue montre une surestimation du volume pour huit ouvrages de rétention, et une sous-estimation pour deux ouvrages.

Six ouvrages présents en amont de Dossenheim sous-estimaient en 2010 le volume stocké, la vérification des emprises avec le MNT permettra de vérifier le dimensionnement des cotes de crue de projet. Les sites de rétention ont donc d'après le MNT une capacité de stockage de 120 000 m³ en plus, ce qui conforte le choix de ne pas mettre en place de protections rapprochées à Dossenheim.

La loi de la retenue z10 située en amont de Dossenheim sous-estimait en 2010 le volume stocké dans cette dernière. La loi de stockage est présentée dans la figure suivante :

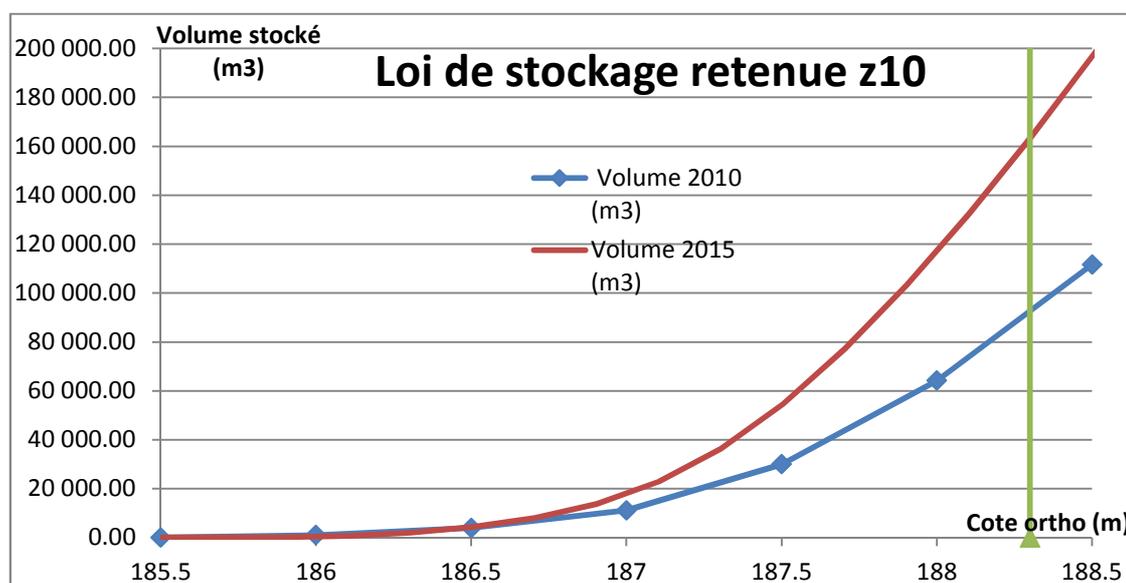
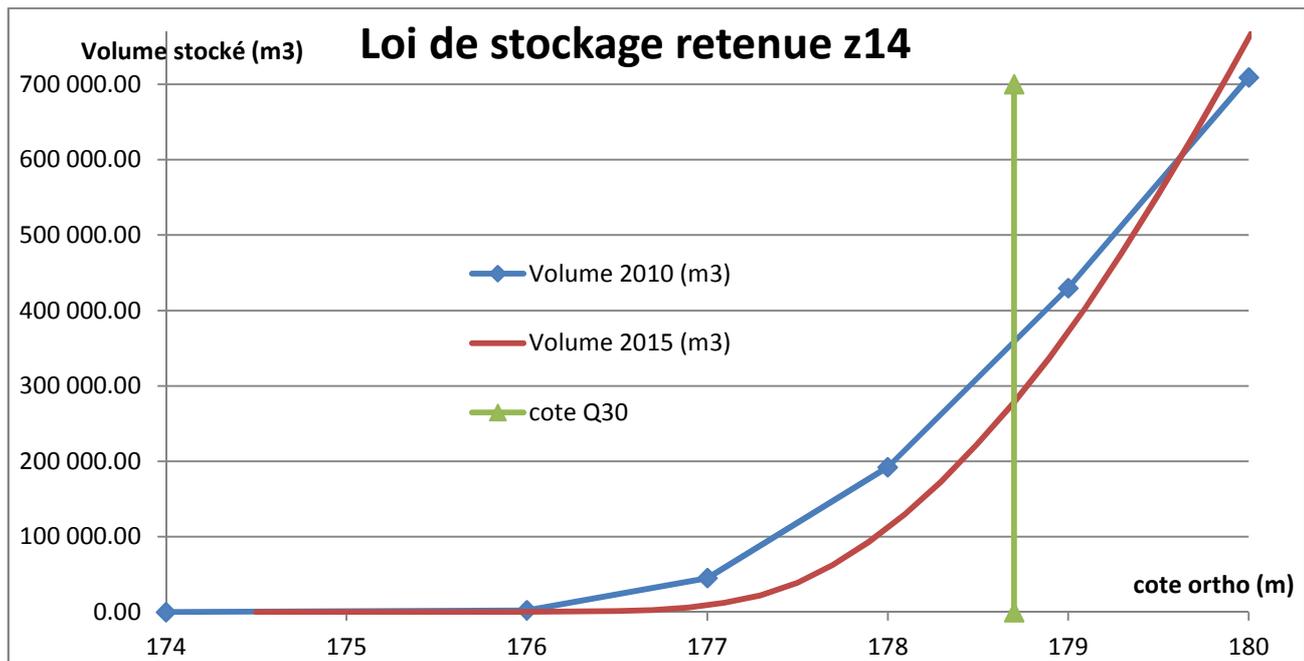


Fig. 37. Loi de stockage de la retenue z10 en amont de Dossenheim

Avec le même raisonnement, en amont de Hattmatt six ouvrages sous-estiment le volume stocké et un ouvrage le surestime. En amont de Hattmatt les sites de rétention pourraient stocker 40 000 m³ en plus avec les volumes de 2015, cela conforte aussi le choix de ne pas mettre en place de protections rapprochées à Hattmatt.

D'après les lois cote-surface établies avec le MNT, l'écart le plus prononcé est observé pour la retenue z14 située en amont de Hattmatt.

**Fig. 38. Loi de stockage de la retenue z14 en amont de Hattmatt**

Le volume total stocké en amont de Dettwiller apparaît donc sous-estimé de 550 000 m³ en 2010. Après la vérification des emprises des retenues avec le MNT, une nouvelle modélisation hydrologique permettra d'affiner les débits en sortie de chaque ouvrage, et dans un deuxième temps d'affiner leur dimensionnement.

Cependant, le volume de stockage donne une idée globale de la capacité des sites à écrêter la crue, le phénomène de crue étant transitoire il faut comparer plus spécifiquement le remplissage des ouvrages ainsi que leurs comportements en combinant le fonctionnement de chaque ouvrage. Globalement, le MNT permet ainsi de confirmer la faisabilité du projet de rétention des crues. Les ajustements à réaliser pourront consister à diminuer la hauteur des barrages de retenue voire à supprimer un site de rétention.

5.2.4. Vérification des emprises des sites de rétention

Grâce au MNT, il est possible de vérifier les emprises des sites de rétention lors du remplissage. De cette manière, si des enjeux sont impactés par les ouvrages, il faudra redimensionner la hauteur de crête et les dimensions du pertuis de ces derniers.

Le calcul est réalisé par l'outil Vertical Mapper en soustrayant la cote de crue de projet convertie en NGF IGN69 au MNT.

Les emprises des sites de ralentissement entre 2010 et 2015 sont comparées dans le tableau suivant :

nom	Surface 2010 (km ²)	Surface 2015 (km ²)	Ecart
z2	0,025	0,037	48%
z3	0,034	0,019	-44%
z4	0,077	0,060	-22%
z5	0,160	0,126	-21%
z6	0,046	0,021	-54%
z8	0,170	0,153	-10%
z10	0,183	0,159	-13%
z14	0,305	0,284	-7%
z16	0,177	0,560	215%
zo7	1,143	0,772	-32%

Tabl. 23 - Comparaison des emprises 2010 et 2015 des sites de ralentissement dynamique

Deux sites sont problématiques au niveau des emprises : l'ouvrage z2 et l'ouvrage z16.

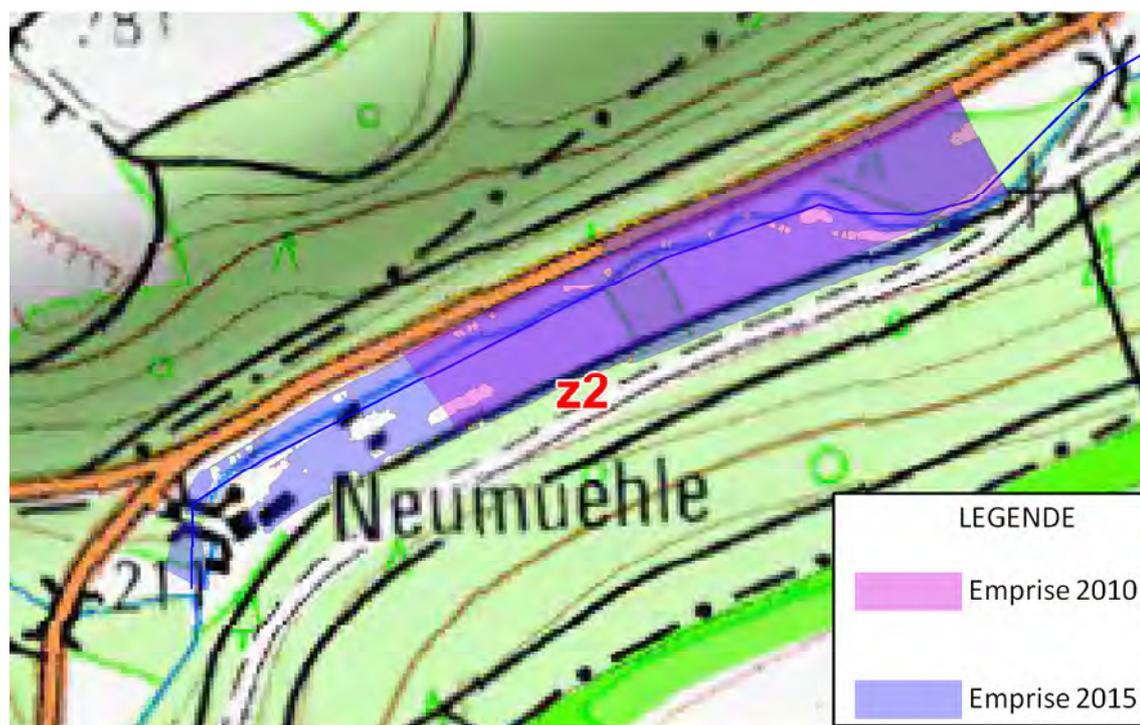


Fig. 39. Emprise de la retenue z2 sur la Zinsel calculée avec le MNT, à la cote 208,50m

L'emprise de la retenue z2 aurait un impact en amont sur trois maisons situées en amont de la retenue. Il s'agit d'après une vue aérienne de deux bâtiments, l'un de type agricole et l'autre de type habitation. Un abaissement de la cote de crue de projet de la retenue serait à envisager afin de ne pas inonder ces habitations. Une enquête de terrain permettrait en plus de connaître la limite acceptable de l'emprise de la retenue.

L'emprise z16 a été fortement sous-estimée du fait de sa modélisation initiale en deux parties (z15 et z16). La particularité de ce site écrêteur de crue est qu'il existe déjà mais que son volume de stockage n'est pas suffisant pour une crue trentennale, il a d'ailleurs surversé lors de la crue de 1998.

De plus, le site est particulier car en amont il y a la présence du pont de l'autoroute A4, et de la nouvelle LGV Paris – Strasbourg 200 m en amont de l'autoroute. Les plans RFF montrent que le pont de la LGV est très peu contraignant hydrauliquement (d'après la législation, la LGV se doit d'être transparente hydrauliquement) comparé au pont d'autoroute.

L'emprise de la retenue z16 est présentée dans la figure suivante :

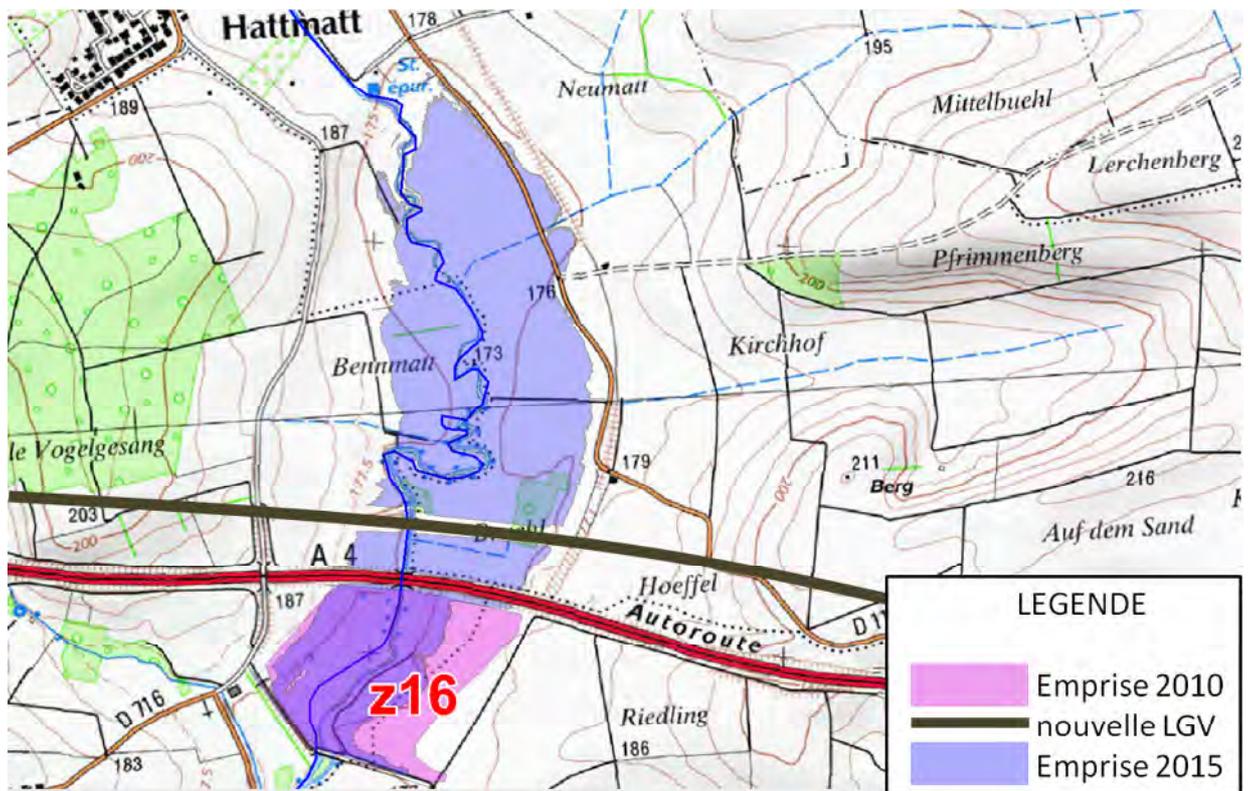


Fig. 40. Emprise de la retenue z16 (plan d'eau de Steinbourg actuel) sur la Zinsel calculée avec le MNT, à la cote 174,90m

Dans un deuxième temps, l'injection dans le modèle hydrologique Pluton des lois cote – surface mises à jour permet d'affiner les débits écrêtés par chaque ouvrage, et d'affiner le dimensionnement des sites de ralentissement.

6. ANALYSE CRITIQUE DES RESULTATS ET PERSPECTIVES

6.1. CRITIQUE DES RESULTATS DE MODELISATION

Le modèle CARIMA de la Zorn a pu être affiné avec les nouvelles données disponibles en 2015. Cependant, et comme pour tout modèle hydraulique, il reste des incertitudes qui impliquent de prendre du recul par rapport aux résultats donnés par CARIMA.

Tout d'abord, la topographie rentrée dans le modèle de la Zorn a été réalisée sur une plage de temps assez importante (entre 1996 et 2015), ce qui implique des incertitudes sur la bonne représentation de la topographie actuelle. En effet, l'hydrodynamique des cours d'eau implique des phénomènes d'érosion et de rehaussement du lit mineur qui doivent être pris en compte.

De plus le référentiel altimétrique du modèle est le système NGF orthométrique ce qui a impliqué de convertir des profils définis en IGN69 en référentiel orthométrique (cote orthométrique = cote IGN69 – 37cm). Etant donné que le modèle hydraulique a été depuis 1998 repris et affiné une dizaine de fois avec des modélisateurs différents, la probabilité d'un profil 1D mal défini existe. Cela ajoute une part d'incertitude sur les résultats du modèle qui est néanmoins difficile à quantifier.

Enfin le programme de renaturation proposé par SINBIO implique le réaménagement de certains ouvrages hydrauliques, ainsi que la mise en place de banquettes pour reméandrer le cours d'eau sur certains secteurs.

Ces aménagements n'ont pas été pris en compte dans le modèle CARIMA, ce qui introduit une incertitude supplémentaire sur les résultats du modèle à l'état projet. Cependant, ces aménagements ne sont pas de nature à avoir d'influence notable sur la ligne d'eau en crue. Les banquettes ne réduiront que très partiellement la section d'écoulement (elles sont noyées à partir de deux fois le débit moyen) tandis que les aménagements des ouvrages du lit mineur (arasements partiels notamment) n'auront que très peu d'effet sur les crues car il s'agit d'ouvrages noyés par l'aval en crue.

6.2. LA CONCOMITANCE DES CRUES DE LA ZORN ET DE LA ZINSEL

La fine analyse de l'hydrologie d'un bassin versant est essentielle afin de mettre en place des protections efficaces contre les inondations. La particularité du bassin versant de la Zorn est d'avoir en crue plus d'apports en débit provenant de la Zinsel pour des crues du type 1983 ou 1998.

Cependant, le manque de données hydrométriques sur la Zinsel rend aujourd'hui difficile son analyse des débits de crue.

Au cours des différentes études menées sur le bassin versant de la Zorn depuis le SAGEECE, différentes hypothèses ont été réalisées sur la concomitance des crues. Le modèle pluie – débit PLUTON utilisé pour l'étude de faisabilité de 2010 donne une avance de 30 minutes du pic de crue de la Zinsel sur le pic de crue de la Zorn. Toutefois, ce décalage peut varier en fonction de la spatialisation des phénomènes pluvieux.

La mise en place des ouvrages de ralentissement dynamique devra également être analysée plus finement par la suite car tous les scénarios n'ont pas été modélisés. Par exemple le scénario d'une crue de la Zorn sans crue de la Zinsel pourrait remettre en cause le dimensionnement des ouvrages à Dettwiller. Toutefois on peut remarquer que le débit centennal de la Zorn à Saverne

atteint $69 \text{ m}^3/\text{s}$, et que les aménagements à Dettwiller sont dimensionnés pour un débit de $73,1 \text{ m}^3/\text{s}$, de ce fait cela étaye le choix de mettre en place des protections rapprochées à Dettwiller.

Les ouvrages de ralentissement dynamique mis en place engendreraient un retard de 17h30 du pic de crue de la Zinsel avec une crue trentennale du type 1998. Mais le scénario « le plus défavorable » avec un cumul des pics de crue dû aux ouvrages de ralentissement dynamique devrait être étudié afin d'en évaluer les impacts.

Le peu de retour d'expérience et l'absence de données suffisantes sur la Zinsel restent les difficultés majeures à l'évaluation de la concomitance des crues. Cependant la finalisation de l'étude hydrologique d'IRSTEA permettra d'avoir des éléments nouveaux sur le phénomène de concomitance des crues.

6.3. ASPECT REGLEMENTAIRE DE LA MAITRISE D'ŒUVRE

La réalisation de la maîtrise d'œuvre du PAPI de la Haute Zorn implique un certain nombre de démarches administratives et réglementaires.

Tout d'abord, il faut prendre en compte la réglementation impactant le déroulement de la maîtrise d'œuvre.

Les ouvrages de protections rapprochées sont des murs et des digues qui doivent être soumis à déclaration ou autorisation avant leur réalisation.

La réalisation des protections rapprochées au niveau de Steinbourg implique la construction d'une digue ayant une hauteur maximale de 2,4m. Sur la commune de Monswiller, la digue en amont de la rue de la république a une hauteur maximale de 1,1m. Ces digues sont supérieures à 1m et protègent une population inférieure à 1000 habitants.

Ces digues appartiennent à la classe C selon le décret du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques, et l'arrêté du 29 février 2008 qui définissent les obligations légales des propriétaire ou exploitants de barrage et de digues.

En application des articles L214-1 à L214-6 du Code de l'Environnement relatif à la nomenclature des opérations soumises à Autorisation ou Déclaration, les travaux seront soumis à autorisation au titre de la Loi sur l'Eau. Les « Ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions tel les système d'endiguement au sens de l'article R562-13 » (article R214-1) sont soumis à autorisation.

Une fois les digues construites, le propriétaire d'ouvrages de classe C (ici le SIA de la Haute Zorn) aura comme obligations :

- Tenue d'un dossier d'ouvrage
- Définition de consignes de surveillance et d'exploitation en temps de crue
- Visite technique approfondie (tous les 2 ans maximum)
- Rapport de surveillance (tous les 5 ans maximum)

L'entrée en vigueur du décret n°2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques a apporté récemment des modifications et des précisions à la réglementation en vigueur depuis 2007. (République Française, 2015)

Ce décret implique une nouvelle classification des ouvrages qui sera à prendre en compte pour les ouvrages de ralentissement dynamique.

Le projet global de protections contre les crues par ralentissement dynamique et par protections rapprochées implique de plus des études d'impact au titre de la Loi sur l'Eau. Dans ce cadre, le projet devra prévoir un certain nombre de mesures d'accompagnement ou compensatoires en fonction des impacts qu'il présente.

6.4. LA COMPENSATION DES AMENAGEMENTS

Comme évoqué dans le chapitre précédent, la compensation des aménagements de protections rapprochées est aussi un aspect important de la maîtrise d'œuvre. Dans le cadre du SDAGE Rhin Meuse, il s'agira de compenser les volumes soustraits à l'expansion des crues par les digues et murs. (Comité de bassin Rhin Meuse, 2015)

Nous avons vu précédemment (cf chapitre 4.7) que la mise en place de digues et de murs, malgré les pertes de surfaces d'expansion qu'ils occasionnent, n'induisaient pas d'impact notables sur les conditions de propagation des crues vers l'aval. Toutefois, la réglementation repose sur le principe que même si l'impact sur la perte de surface d'épandage n'induit pas d'effet perceptible vers l'aval, la multiplication des projets aux effets individuels non significatifs peut présenter un effet global tout à fait perceptible pour la situation en aval. Ainsi la compensation du volume soustrait à la crue est indispensable même si l'impact est minime afin de ne pas multiplier ces petits impacts qui pourraient à termes poser de réels problèmes de compensation.

Dans le cadre du projet, les mesures compensatoires prévues pour les protections rapprochées sur la Zorn sont la mise en place d'ouvrages de ralentissement dynamique sur la Zinsel. Cette compensation est largement supérieure aux phénomènes aggravant les inondations par les protections rapprochées dans le cas d'une crue de type 1998, comme nous l'avons montré dans le chapitre 4.7.

Cependant, dans le cas d'une crue unique sur la Zorn (sans la Zinsel), ce concept de mesures compensatoires sur la Zinsel pourrait être remis en cause, et une accélération des écoulements serait à évaluer.

La faible probabilité de ce scénario a néanmoins permis l'approbation du PAPI de la Haute Zorn en juillet 2013 par les services de l'état (DREAL et DDT).

CONCLUSION

Dans le cadre de la maîtrise d'œuvre de travaux de lutte contre les inondations du PAPI de la Haute Zorn, un scénario d'aménagement a été retenu : celui d'allier ralentissement dynamique des crues sur un affluent principal de la partie amont du bassin versant combinés à des ouvrages localisés (type digue ou mur) pour compléter la protection sur le cours principal pour une période de retour trentennale.

Ce mémoire de stage présente les études hydrauliques réalisées dans le cadre de l'avant-projet de la maîtrise d'œuvre qui permettent de définir les aménagements prévus et d'anticiper les démarches à entreprendre pour avoir un dimensionnement précis des ouvrages.

Après avoir présenté les spécificités du bassin versant de la Zorn et la démarche globale de protections contre les inondations initiée dès 2002, l'analyse des nouvelles données disponibles a été la première étape.

Tout d'abord l'analyse hydrologique appuyée par une nouvelle étude menée en 2015 par IRSTEA a permis de valider les hypothèses faites par ARTELIA sur la définition du débit de projet : le débit trentennal. Les deux méthodes utilisées par IRSTEA ont montrées de faibles différences sur l'estimation des débits trentennaux avec une marge de sécurité prise par ARTELIA dans l'étude préalable de 2008.

Une fois les débits de la crue de projet validés, la seconde étape de l'avant-projet de la maîtrise d'œuvre est l'actualisation du modèle hydraulique existant. Cette actualisation du modèle a permis d'intégrer le modèle numérique de terrain, des levés géomètres et de prendre en compte les modifications récentes de la topographie.

Le modèle hydraulique de la Zorn réalisé avec le logiciel CARIMA a été modifié avec la définition d'une nouvelle condition aval située 14 km en aval du secteur d'étude. L'exploitation du MNT a permis une refonte des casiers (représentant le lit majeur), qui sont désormais plus précis dans leurs lois cote-surface. Les liaisons entre casiers et entre le lit mineur et les casiers ont été aussi mises à jour.

L'actualisation du modèle a aussi permis de mettre à jour les ouvrages présents sur le bassin versant de la Zorn, ainsi que la mise à jour des profils 1D qui n'étaient pas représentatifs de la topographie du secteur.

Le modèle a ensuite été calé sur la crue d'octobre 1998 grâce à la présence de plusieurs lasses de crue. Tous les secteurs présentant des enjeux importants ou des aménagements de protections rapprochées ont été calés avec un écart de moins de 10cm.

Les aménagements de protections rapprochées qui ont été validés par le syndicat de la Haute Zorn dans l'élaboration de la stratégie globale ont été modélisés dans le modèle CARIMA. L'impact sur la ligne d'eau des protections rapprochées est semblable à celui évalué lors de l'étude de faisabilité de 2010. Une élévation de la ligne d'eau engendrée par les protections rapprochées à Steinbourg a été mise en évidence, cependant il n'y a pas d'enjeux impactés, cette élévation de niveau est donc jugée acceptable.

Les modélisations hydrauliques du ralentissement dynamique sur la vallée de la Zinsel ont validé le fait de ne pas mettre en place de protections rapprochées sur les communes de Dossenheim-sur-Zinsel et de Hattmatt.

Le ralentissement dynamique a été modélisé sur la commune de Dettwiller (commune la plus en aval du secteur d'étude) et a permis d'affiner le dimensionnement de la digue de protection prévue.

Les aménagements de protections rapprochées sont à dimensionner plus finement en prenant en compte les nouvelles modélisations ainsi que la topographie précise des sites envisagés (des levés terrestres de détail seront engagés sur chaque implantation d'ouvrages). Les nouvelles

modélisations ont confirmé l'importance de la suppression de deux ponts trop contraignants hydrauliquement (sur les communes de Saverne et Monswiller).

Jusque là, les caractéristiques des sites de ralentissement dynamique étaient renseignées avec une certaine incertitude étant donné que seuls trois ou quatre levés en travers du site constituaient les données de base pour la construction des lois cote-surface. Le modèle numérique de terrain a permis d'élaborer des lois cote-surface plus précises (intervalle de 20cm) et d'obtenir le volume de stockage disponible sur les dix sites de ralentissement dynamique. La mise à jour des lois cote-surface a permis de montrer que les sites de ralentissement dynamique avaient un potentiel de stockage de 1 990 000 m³ soit 550 000 m³ de plus que le volume initialement estimé. Les emprises des sites de rétention ont aussi été estimées, et seule une retenue semble problématique : la retenue z2 la plus en amont sur la Zinsel, où une habitation est menacée par le remplissage de la retenue. Un abaissement de la cote de projet est donc à réaliser en recalant le modèle pluie-débit.

Le modèle pluie-débit global sera à mettre à jour avec les nouvelles lois cote-surface définies avec le MNT. Cette mise à jour permettra à la fois d'ajuster le dimensionnement des ouvrages sur les dimensions du barrage et du pertuis, mais aussi dans un deuxième temps avec les débits de période de retour 100 ans et 1000 ans qui seront calculés par IRSTEA et permettront d'affiner le dimensionnement des ouvrages évacuateurs de crue.

La mission de maîtrise d'œuvre doit donc se poursuivre par le dimensionnement plus fin des protections rapprochées ainsi que des sites de ralentissement dynamique. Dans la pratique, l'aspect réglementaire aura également une influence notable dans le phasage des travaux : les études d'impact sur les sites de ralentissement devront être lancées en parallèle afin de pouvoir engager les premiers travaux sur les barrages écrêteurs de crue à l'horizon fin 2016.

En conclusion, ce stage m'a permis d'appréhender le métier d'ingénieur dans le cadre d'une maîtrise d'œuvre. Le projet de protection contre les inondations du bassin de la Haute Zorn est un projet diversifié car il associe des études hydrologiques, un modèle hydraulique ainsi qu'un modèle hydrologique pour les sites de ralentissement dynamique. J'ai aussi été confronté aux difficultés inhérentes à la modélisation que sont l'obtention et l'interprétation des données. J'ai pu voir l'importance du cheminement des étapes à valider pour obtenir des résultats de modélisation robustes. Enfin, j'ai pu voir l'importance en modélisation de l'étape d'analyse critique des résultats qui permet de prendre du recul sur les résultats obtenus.

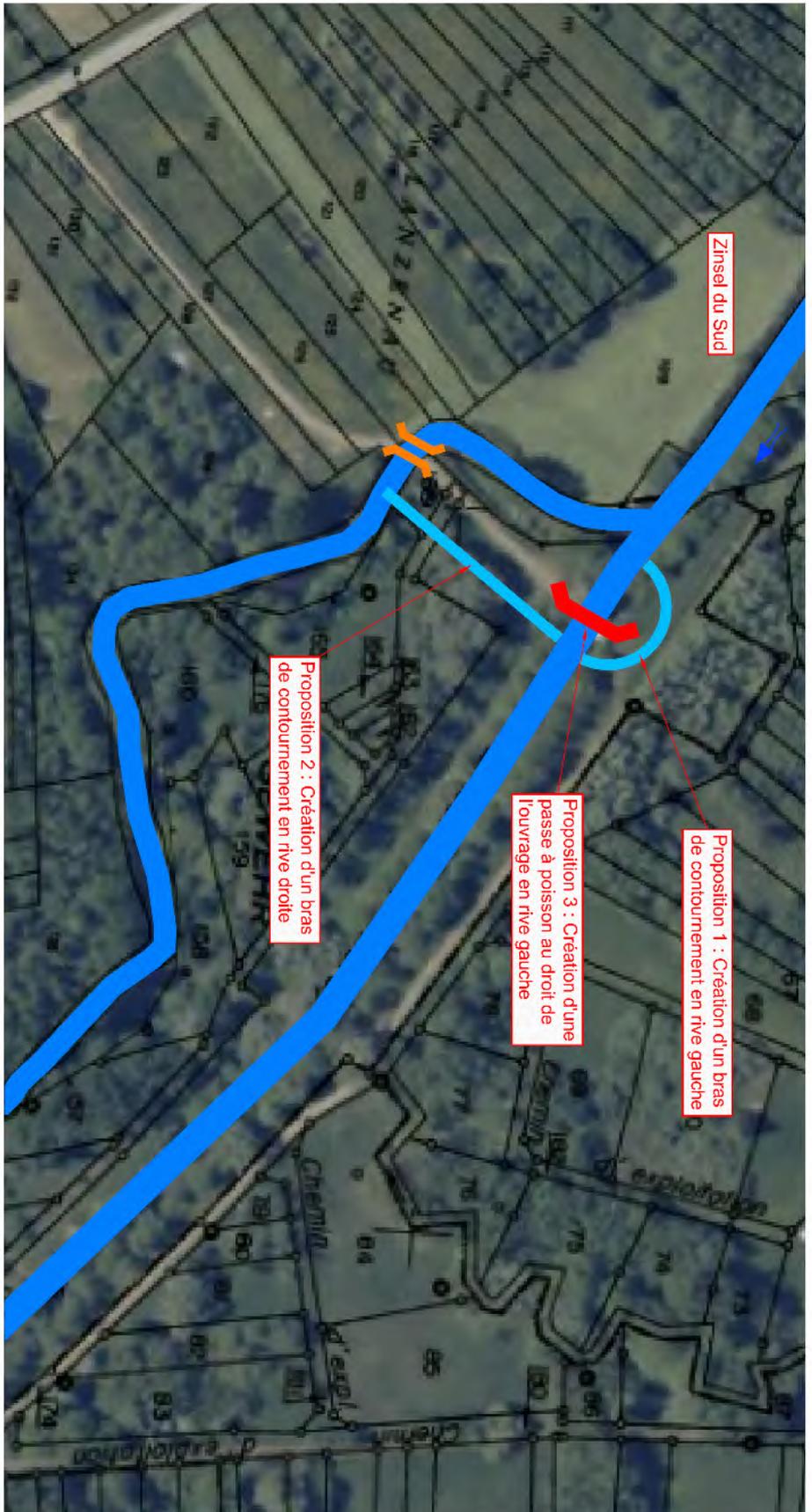
oOo

BIBLIOGRAPHIE

- Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. 2004.** *Les inondations dossier d'information.* 2004.
- ARTELIA. 2003.** *CARIMA version 4.00 Guide utilisateur.* 2003. p. 55.
- **2003.** *CARIMA version 4.00 Manuel de référence technique.* 2003. p. 63.
- **2008.** *Etude de définition d'une stratégie de lutte contre les inondations par ralentissement dynamique.* 2008. 4630622.
- **2006.** *Etude de faisabilité pour la réalisation d'ouvrages de protection contre les crues de la Zorn sur les communes de Saverne, Monswiller, Steinbourg, Dossenheim, Hattmatt, Otterswiller et Dettwiller.* 2006. 0845245.
- **2006.** *Etude de faisabilité pour la réalisation d'ouvrages de protection contre les crues de la Zorn sur les communes de Saverne, Monswiller, Steinbourg, Dossenheim, Hattmatt, Otterswiller et Dettwiller.* 2006. 0845245.
- **2010.** *Etude d'élaboration d'un programme global d'aménagements contre les inondations sur les communes du bassin versant de la Haute Zorn.* 2010. 4631294.
- **2008.** *Etude des possibilités d'amélioration des conditions d'écoulement de la Zorn sur la commune de Dettwiller.* 2008.
- **1998.** *SAGEECE du bassin versant de la Zorn et du Landgraben.* 1998.
- ARTELIA, JC CARRE. 2007.** *Etude hydrologique de définition d'une stratégie de lutte contre les inondations par ralentissement dynamique.* 2007.
- BOUBEE, Y. 2006.** *Synthèse Technique Ralentissement Dynamique des crues.* s.l. : ENGREF, 2006.
- BRIGODE, Pierre. 2013.** *Changement climatique et risque hydrologique : évaluation de la méthode SCHADEX en contexte non-stationnaire.* 2013. Thèse.
- CEMAGREF. 2004.** *Le Ralentissement Dynamique pour la prévention des inondations.* s.l. : Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2004. p. 129.
- CEMTEF. 2013.** *Les outils de modélisation hydraulique et de simulation d'exploitation du Cemtef.* s.l. : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2013.
- Comité de bassin Rhin Meuse. 2015.** *SDAGE Rhin et Meuse. eau 2015 Rhin Meuse.* [En ligne] 2015. http://www.eau2015-rhin-meuse.fr/dce/site/outils_docs_sdage.php.
- Consail Général du Bas Rhin. 2011.** *Le bassin versant de la Zorn.* 2011.
- IRSTEA. 2015.** *Comparaison de méthodes de prédétermination des débits caractéristiques de crues pour la lutte contre les inondations sur le bassin versant de la Zorn.* 2015.
- MERCKLE, Sébastien. 2014.** *cours ENGEES Barrages et Dignes.* s.l. : IRSTEA, 2014.
- République Française. 2015.** *Code de l'environnement - Article R214-1. Legifrance.* [En ligne] 2015. [Citation : 12 juin 2015.] <http://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000030594053&cidTexte=LEGITEXT000006074220&dateTexte=20150617&oldAction=rechCodeArticle&fastReqlId=2126657609&nbResultRech=1>.
- SINBIO. 2014.** *Etude diagnostic sur l'état des rivières et propositions de travaux de renaturation sur le bassin de la Haute Zorn.* 2014.
- Y., BOUBEE. 2006.** *Synthèse Technique Ralentissement Dynamique des crues.* s.l. : ENGREF, 2006.

ANNEXE 1

Exemple de propositions d'aménagement de restauration écologique sur le bassin versant de la Haute Zorn, SINBIO



Maitre d'ouvrage
**Syndicat Intercommunal d'aménagement
 du bassin versant de la Zorn**

Operation
**Etude diagnostic sur l'état des rivières
 et propositions de travaux de renaturation**

Véifié par **HF** Dessiné par **FK** Affaire **CE392**

Maitre d'oeuvre

Simbio
 SECOURS-DES
 5 rue des Tillées - 67600 MOUTERSHOLTZ
 Tél : 03 88 85 17 94 - Fax : 03 88 85 19 50
 www.simbio.fr - contact@simbio.fr

Les propositions techniques présentées demeurent la propriété intellectuelle de la société SIMBIO. Toute utilisation ou reproduction, inclue sans faucon écrit, ce SIMBIO est interdite sans la et sans autorisation.

Titre
**Restauration de la continuité écologique
 du seuil en amont de Hattmatt sur la Zinsel du Sud (OH13)**

N° **08** Phase **PROP** Echelle **1/1500**

A	12/04/2013	Projet simbio	Formet
Indice	Date	Modifications	Formet

Formet **A4**

ANNEXE 2

Présentation de la méthode SPEED

La méthode SPEED (Système Probabiliste d'Etude par Evènements Discrets) est une méthode développée par SOGREAH qui consiste à la détermination du débit de période de retour T en se basant sur des séries de données débitométriques (Banque HYDRO) et pluviométriques (Banque Pluvio de météo France). Cette méthode passe par une analyse régionale des Pluies qui suit le processus de Poisson.

L'ajustement des pluies journalières observées se fait donc sur graphique de Gumbel par une droite définie par :

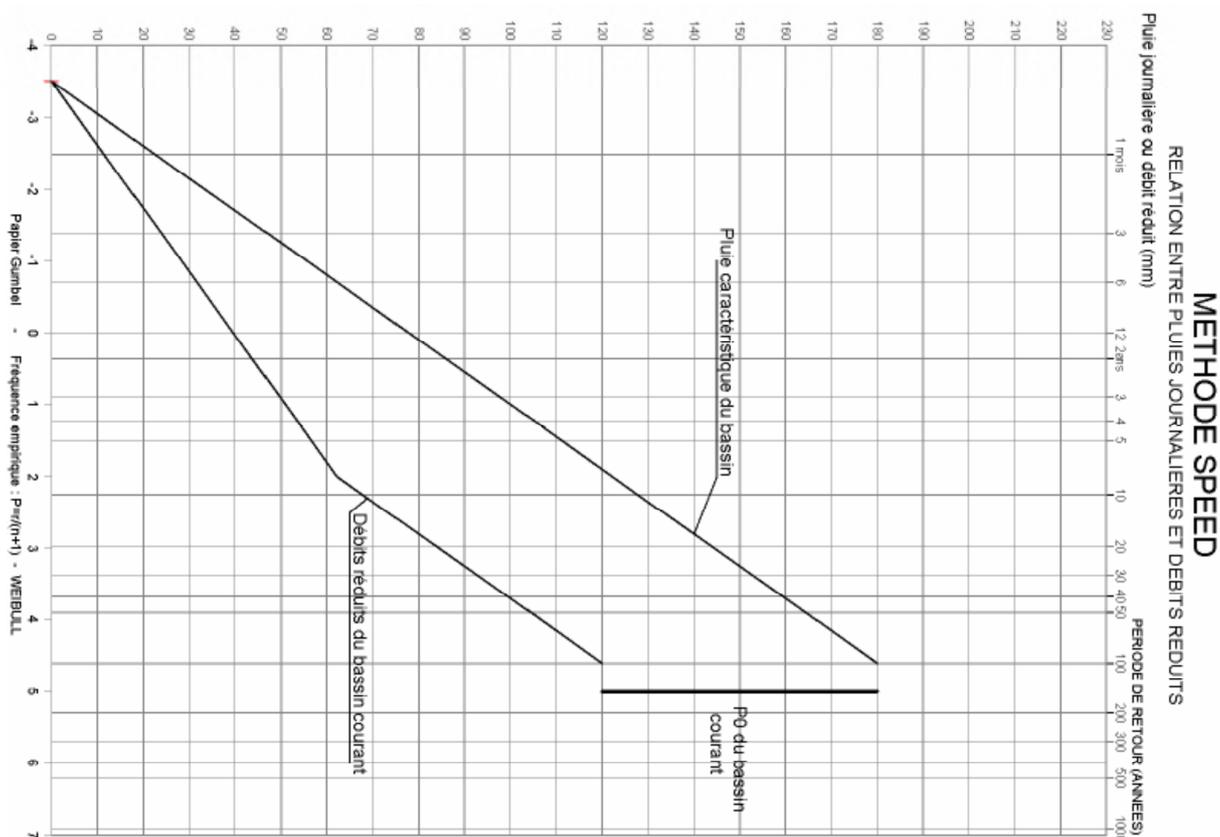
- Y_0 : le pivot de distribution, la valeur de la variable de Gumbel pour laquelle la droite de Gumbel coupe l'axe $P_j=0$.
- La moyenne P_{Jm} , caractéristique du régime de pluie du secteur d'étude. La moyenne est associée à une variable de Gumbel de 0,5772 (variable d'Euler) démontrée mathématiquement.

Pour évaluer les débits des crues rares, la pente de la droite de Gumbel est le Gradex, avec la sélection d'une période de retour T_0 à partir de laquelle le sol est saturé et chaque goutte de pluie ruisselle pour une période de retour supérieure à T_0 .

La régionalisation de la méthode a permis d'identifier deux pivots majeurs pour les phénomènes cycloniques :

- -3,3 à 3,5 pour les phénomènes océaniques
- -2,5 pour les phénomènes cévennols

Exemple d'ajustement statistique par la méthode SPEED :



Il s'en suit la relation **pluie-débit** suivante :

$$Q_T = S_{0.75} / 12 (P_T - P_0) \quad \text{si } T > T_0$$

$$Q_T = S_{0.75} / 12 (C_0 P_T) \quad \text{si } T < T_0$$

Avec :

QT = débit de pointe de crue de période de retour T (années),
PT = précipitation journalière ponctuelle de même période T, .
S = superficie du bassin versant, en km²,
P0 = seuil probabiliste de ruissellement, en mm,
T0 = période de retour limite de la théorie du Gradex,
C0 = coefficient de proportionnalité des faibles crues aux pluies.

Ces formules servent à visualiser la relation pluie-crue à partir des séries de mesures sur une rivière. En disposant sur un même graphique de Gumbel les précipitations journalières observées et les débits de pointe de crue (ou Q_{re} en mm), il est possible de calculer les paramètres P_0 , T_0 et C_0 .

Avec :

$$Q_{re} = 12 \frac{Q}{S^{0.75}}$$

On constate donc que les faibles crues s'alignent proportionnellement par rapport à la droite des pluies (multipliée par le coefficient C_0). Une cassure nette se forme au niveau de T_0 , période de retour à partir de laquelle les droites des pluies et des débits sont parallèles.

En France, P_0 varie autour de 60mm mais dans certains cas T_0 peut être nettement supérieur à 100 ans, ce qui implique qu'il n'y ait pas de cassure visible sur les données disponibles.

L'intérêt de la méthode réside dans la régionalisation des pluies qui permet de fixer le pivot et de réduire l'incertitude sur les ajustements. De plus, la considération d'une cassure pour la prise en compte de la saturation du sol permet une meilleure estimation des pluies rares sur le bassin versant.

ANNEXE 3

Principe de calage de la méthode SHYREG, IRSTEA

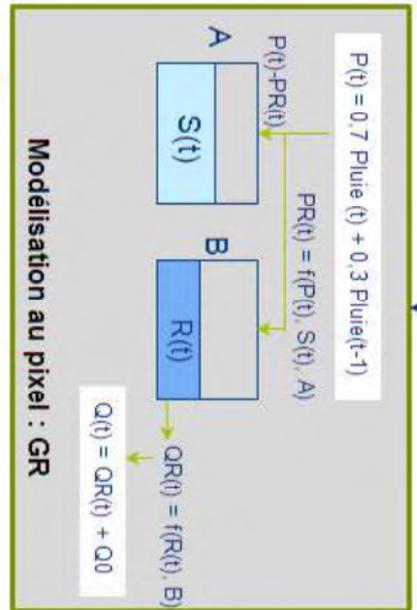
Etape 1 : Simulations au pixel

Paramètres hydrologiques imposés :

- A : fonction de l'hydrogéologie
- B : 50 mm en été et 100 mm en hiver
- R : initialisé à 30% de B
- Q0 : issu de la méthode LOIEAU
- S : initialisé entre 0 et 100% de A
- ou S0/A entre 0 et 1

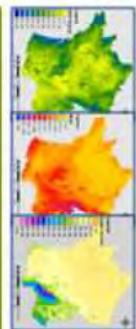


Grilles des débits spécifiques pour différentes valeurs de S0/A : q(d, T, S0/A)



Modélisation au pixel : GR

Paramètres régionalisés du générateur de pluie



Simulateur de pluie : Pluie (t)

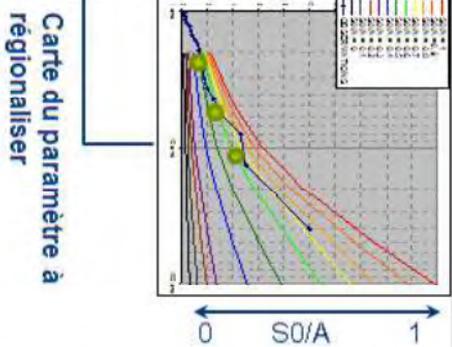
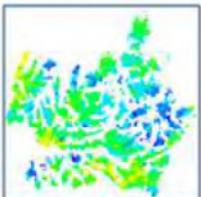
Etape 2 : Calcul aux exutoires

- a) Accumulation sur les bassins
- b) Abattement en fonction de la surface et de la durée (FTS)



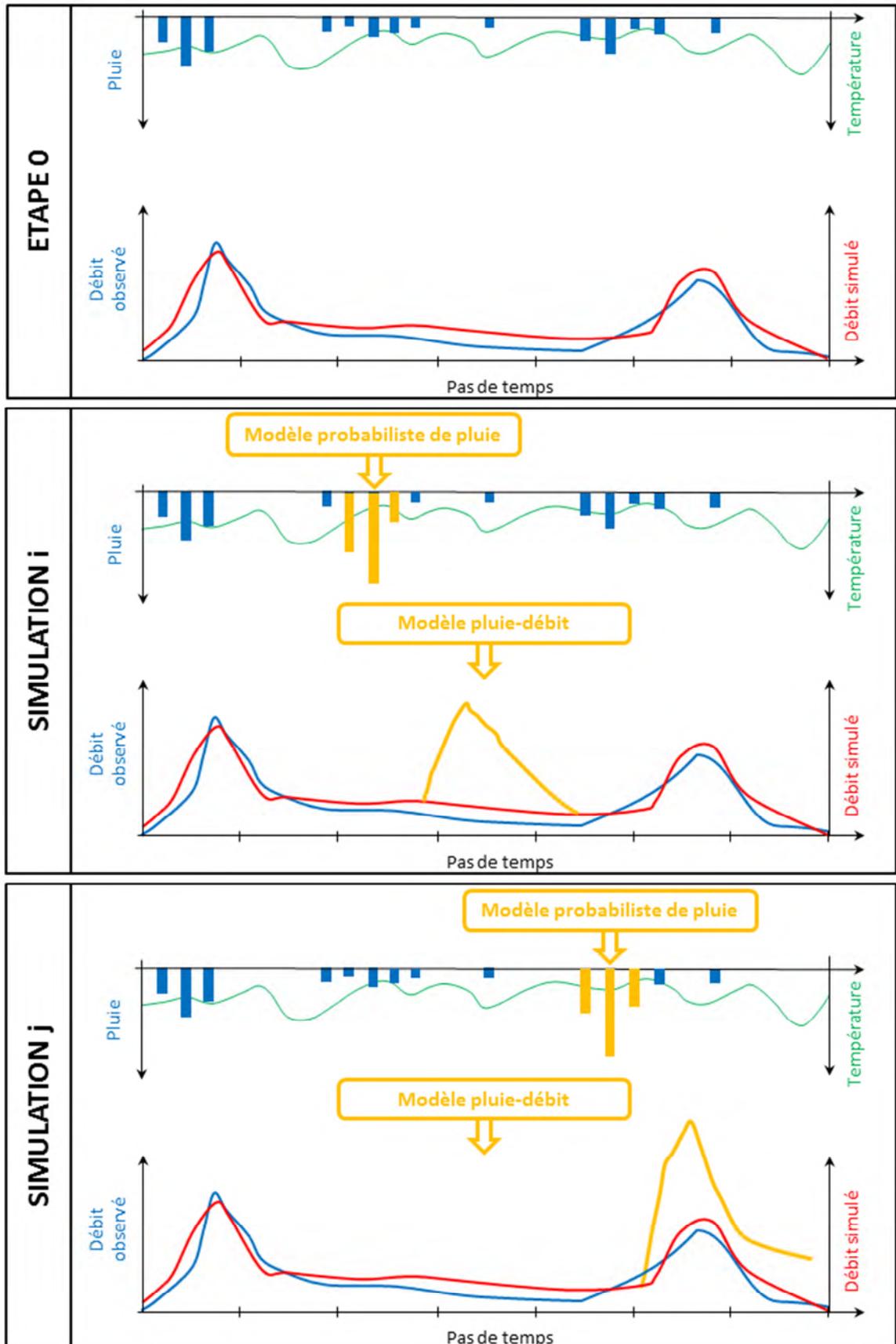
$$Q(d, T, S0/A) = \left[\frac{\sum_{i=1}^n q_i(d, T, S0/A)}{n} \right] \cdot \frac{1 + \beta}{1 + \gamma \cdot S^{0.5 \cdot \alpha} \cdot (1 - S^{\alpha})} \cdot S$$

- c) Optimisation de S0/A sur les quantiles « courants » (T < 10ans)



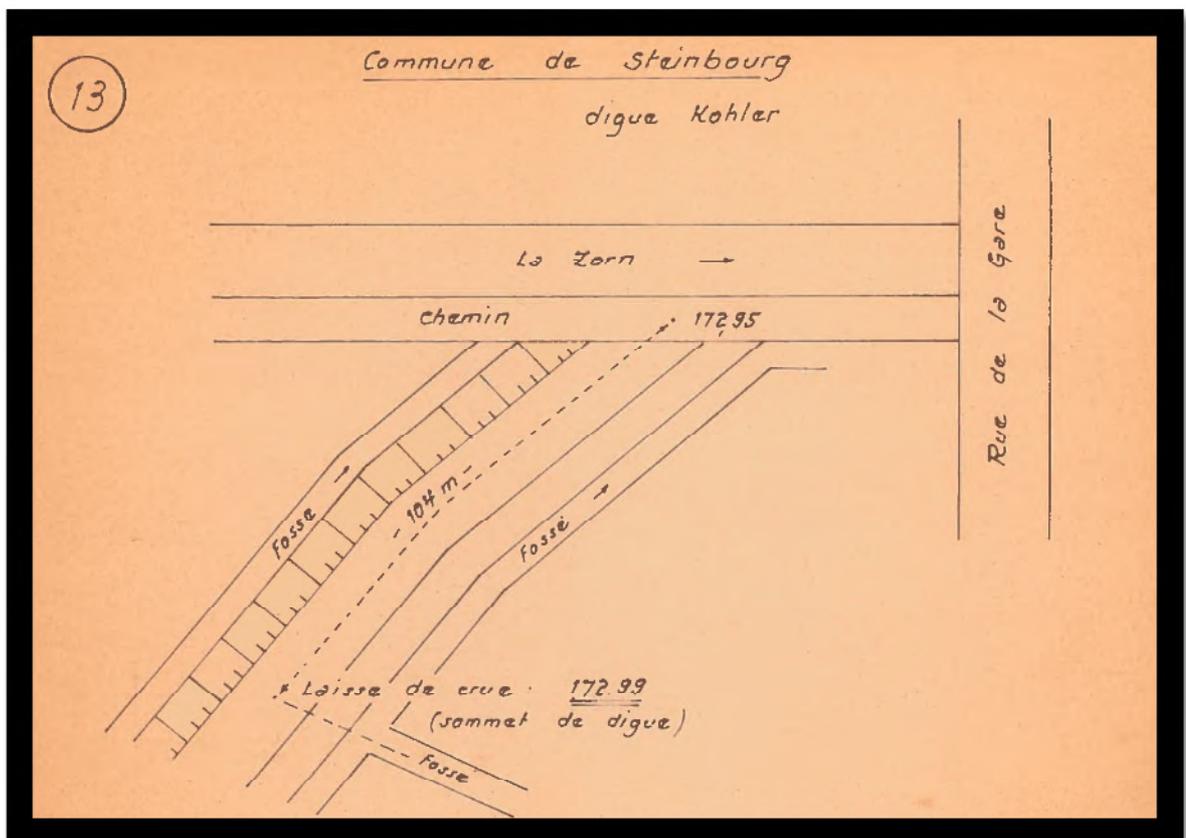
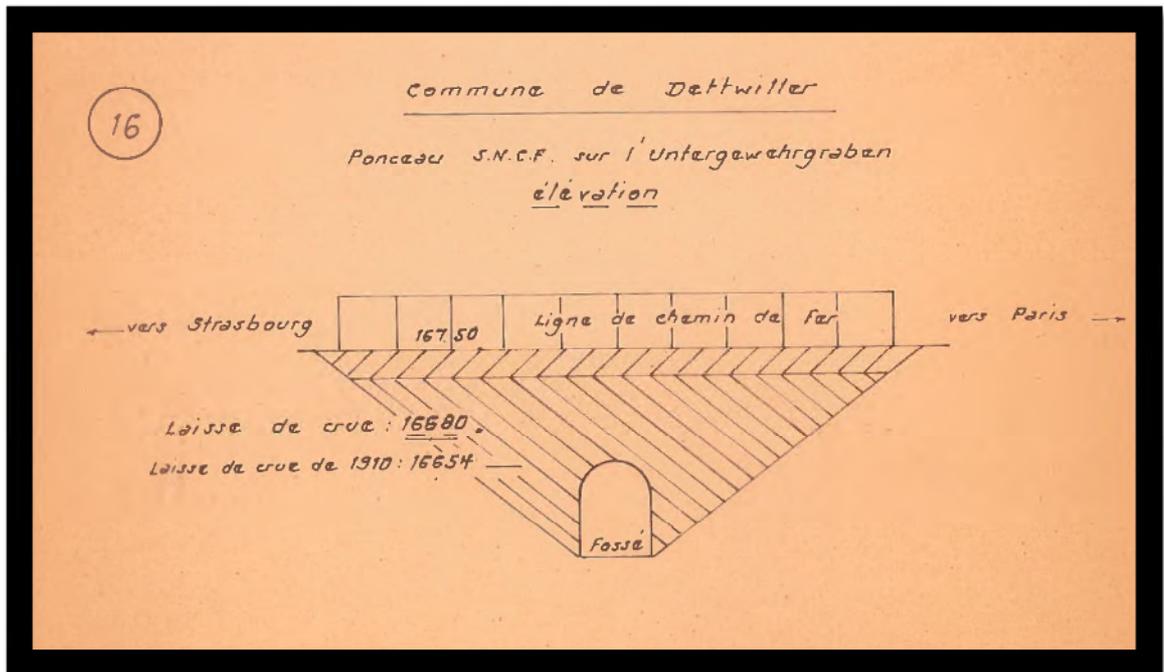
ANNEXE 4

Présentation du processus de simulation de crues de la méthode SCHADEX, IRSTEA



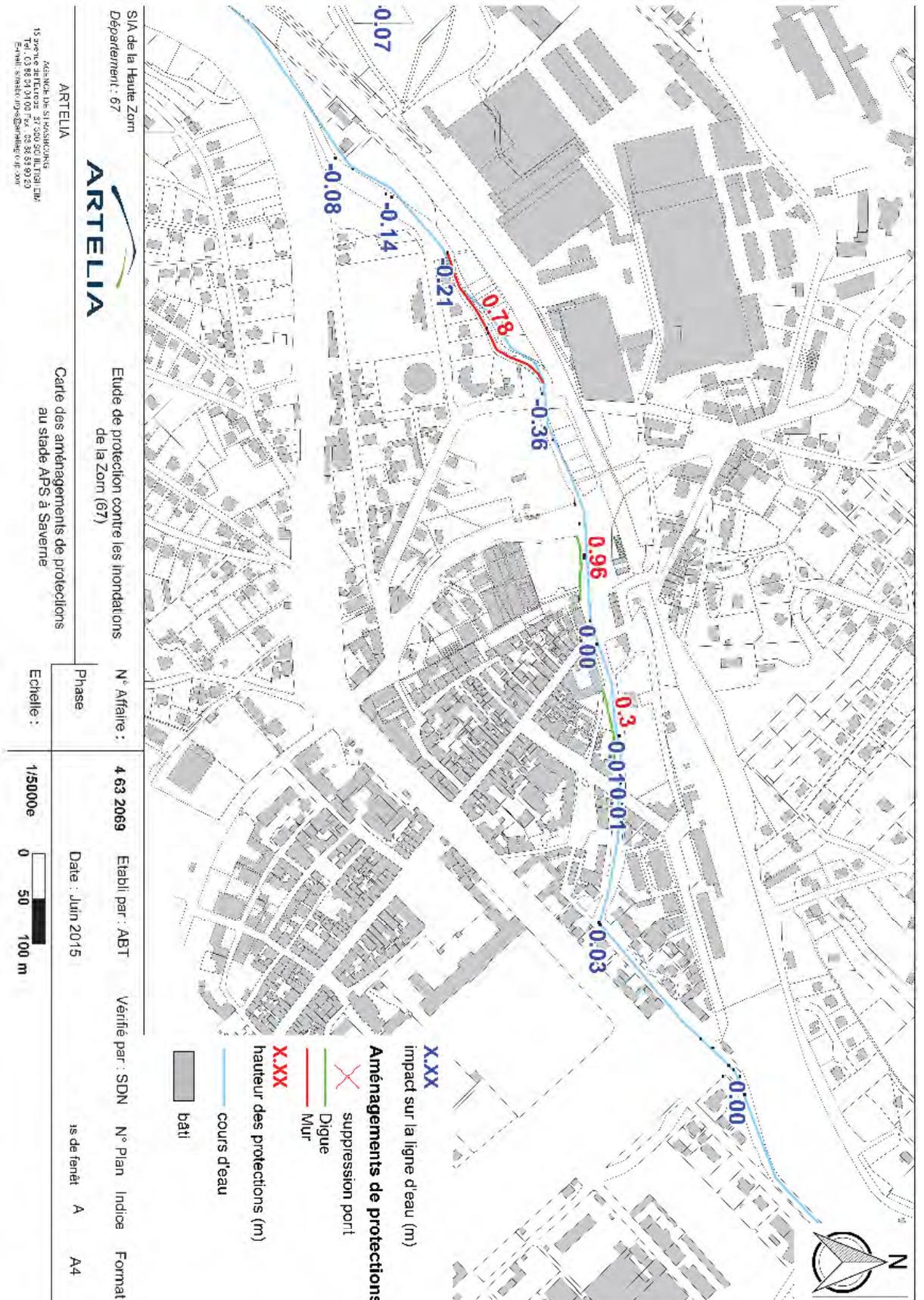
ANNEXE 5

Exemples de laisses de crue, crue d'octobre 1998



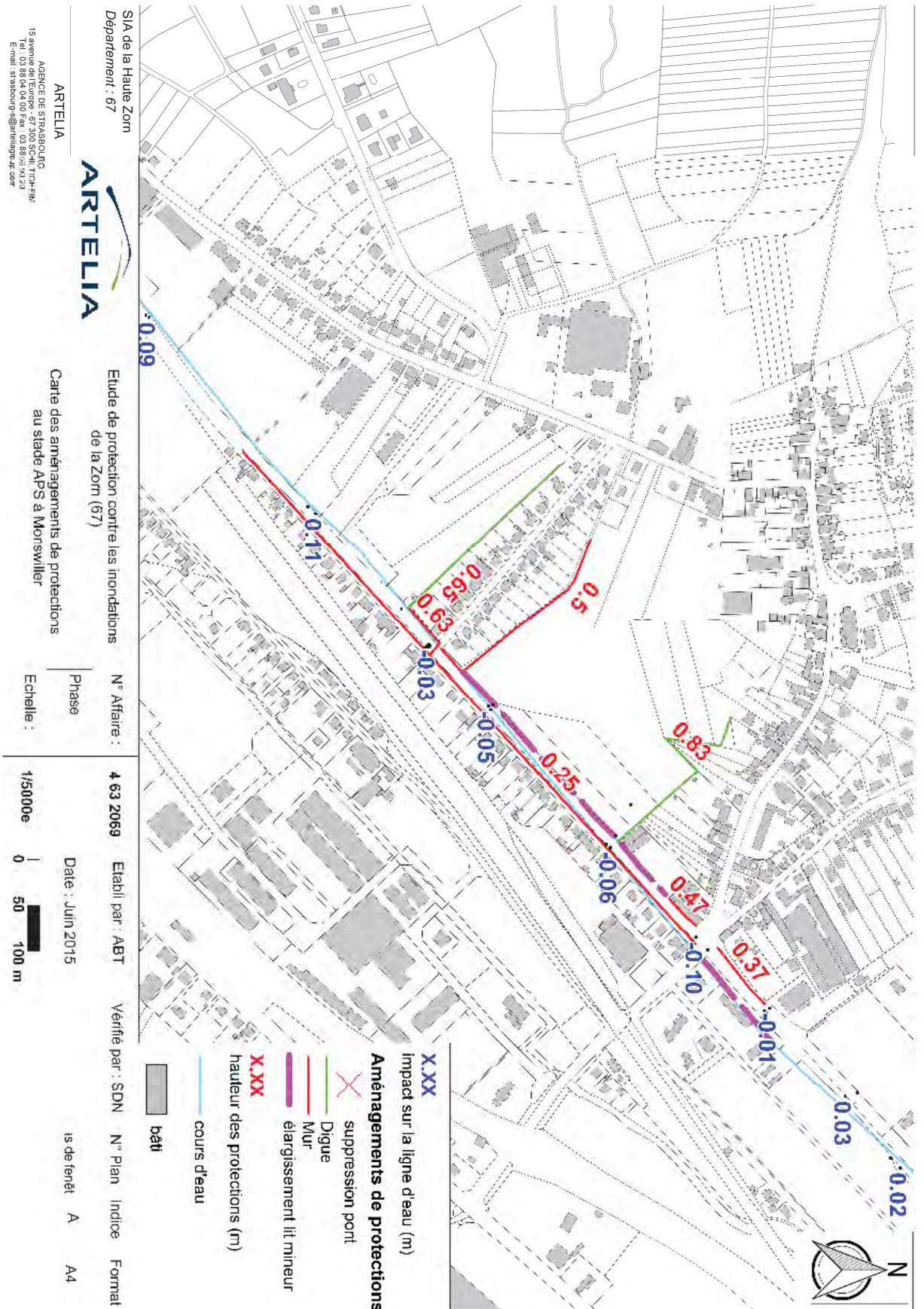
ANNEXE 6

Plan d'aménagements de protections rapprochées à Saverne dimensionnés au stade APS



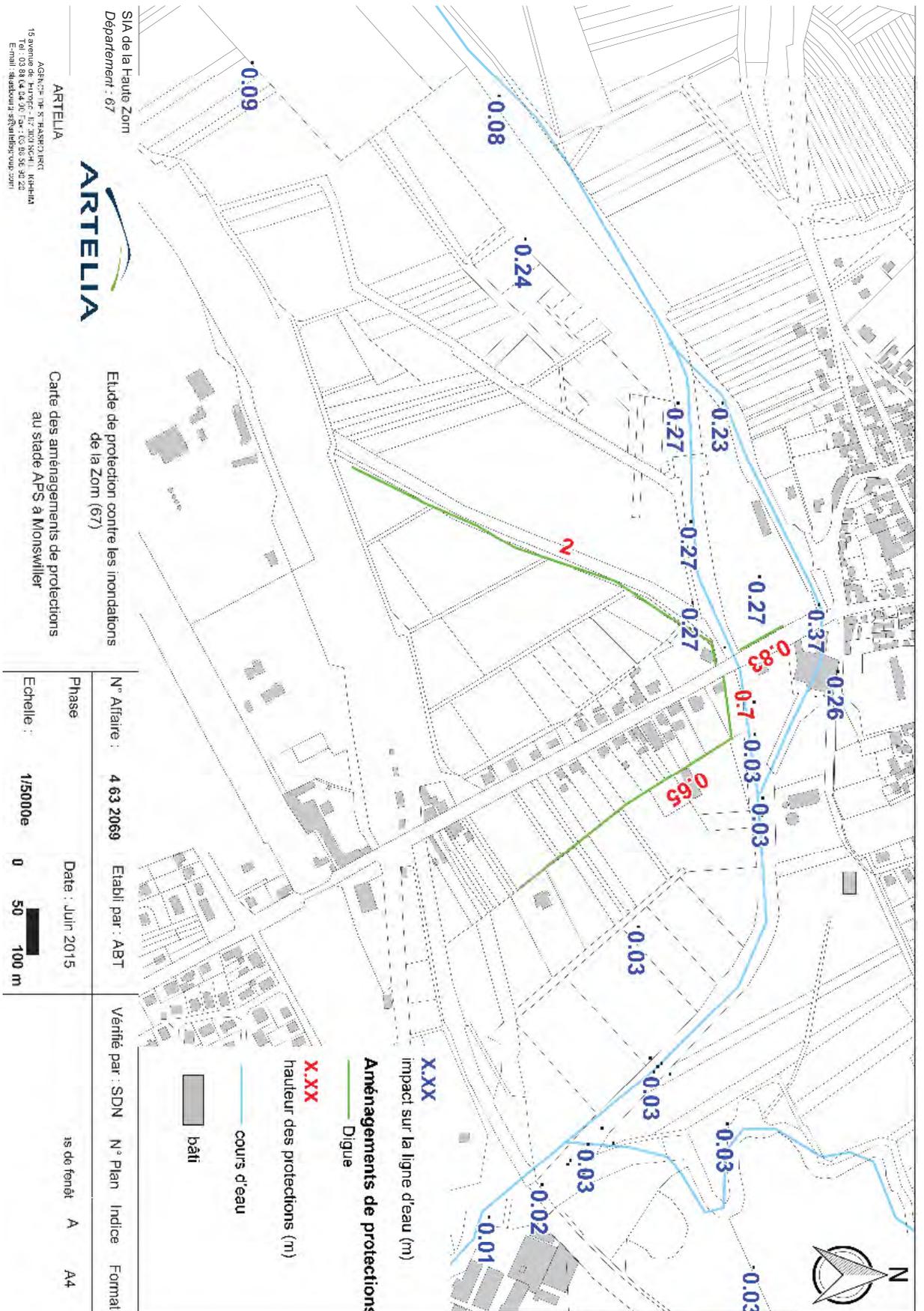
ANNEXE 7

Plan d'aménagements de protections rapprochées à Monswiller dimensionnés au stade APS



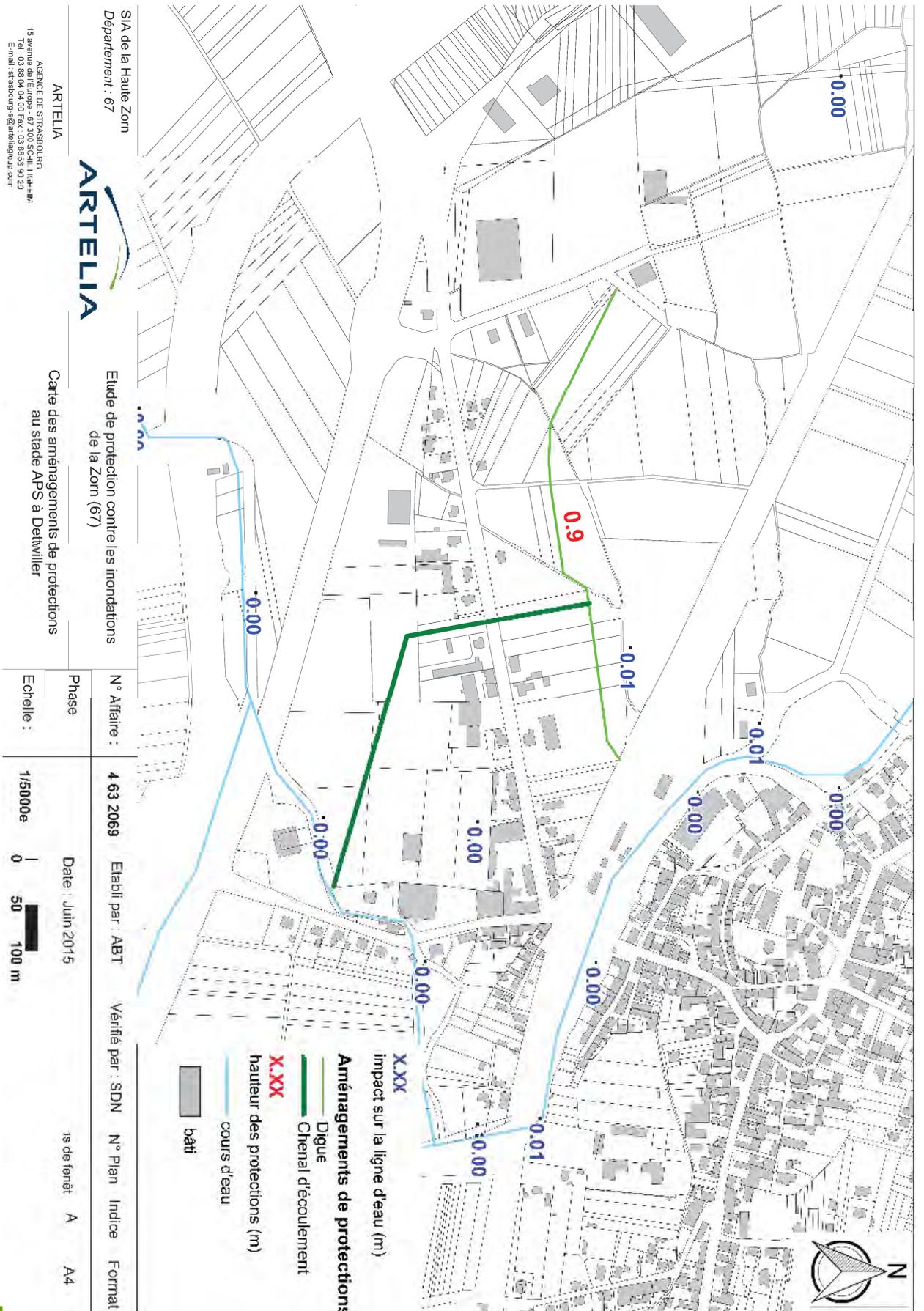
ANNEXE 8

Plan d'aménagements de protections rapprochées à Steinbourg dimensionnés au stade APS



ANNEXE 9

Plan d'aménagements de protections rapprochées à Dettwiller dimensionnés au stade APS



ANNEXE 10

Présentation du modèle Pluie – débit PLUTON

PLUTON est un programme développé par ARTELIA permettant la modélisation de la transformation pluie ruissellement en hydrologie. Pour les besoins de la modélisation hydrologique, le bassin versant à étudier est découpé en unités élémentaires : les sous-bassins. PLUTON a pour objet le calcul de l'hydrogramme de crue de chaque sous-bassin en injectant une pluie statistique ou observée. Dans un deuxième temps, les résultats peuvent être repris dans un modèle hydraulique simulant la propagation des hydrogrammes.

PLUTON est destiné à calculer différents hydrogrammes de crue :

- De sous-bassins urbains, semis-urbains, ou ruraux.
- Pour des événements pluvieux ne dépassant pas quelques heures.
- Pour des sous-bassins de 10 à 1000 ha, le cumul de sous-bassins permettant ensuite la modélisation de bassins versants sans limite de taille.

Plusieurs possibilités sont possibles pour le calcul du hétérogramme :

- Pluie de temps de retour déterminée (lois de Montana).
- Pluie réelle mesurée en un ou plusieurs postes de la zone d'étude

Plusieurs méthodes de calcul de l'hydrogramme de crue sont disponibles et classées selon le type de sous-bassin.

Les méthodes classiquement utilisées sont les suivantes :

- Méthodes de Caquot
- Modèle de transfert « Muskingum » ou « Réservoir Linéaire ».
- Formule rationnelle.
- Formules de synthèse régionale.

PLUTON permet des opérations diverses représentant au mieux la réalité du bassin versant étudié :

- Combinaison de sous-bassins, afin de modéliser le réseau complet d'un cours d'eau et de ses affluents
- écrêtement par un ouvrage (barrage avec ou sans régulation)
- utilisation complémentaire d'un module externe (exemple : modélisation des consignes de gestion d'un barrage)

ANNEXE 11

Présentation du modèle PLUTON de la Zorn

