



HAL
open science

Conception d'aménagements hydrauliques de protection contre les inondations sur le territoire de la communauté de communes Moselle & Madon (54)

Mickaël Godin

► **To cite this version:**

Mickaël Godin. Conception d'aménagements hydrauliques de protection contre les inondations sur le territoire de la communauté de communes Moselle & Madon (54). Sciences de l'ingénieur [physics]. 2012. dumas-01656151

HAL Id: dumas-01656151

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01656151v1>

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.



MEMOIRE PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE L'ENGEES

Conception d'aménagements hydrauliques de
protection contre les inondations sur le territoire de la
Communauté de Communes Moselle & Madon (54)

GODIN Mickaël

Maître de stage : **M. DEHAN Samuel**

Janvier - Juin 2012

(Confidentialité temporaire jusqu'en janvier 2013)

Remerciements

Je remercie tout d'abord l'équipe enseignante de l'ENGEES, qui m'a formé au métier d'ingénieur et m'a apporté les connaissances indispensables dans les domaines de l'eau et de son environnement.

Ensuite, je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui m'ont aidé et soutenu durant ce stage de fin d'études.

Je remercie Christophe TETE, directeur de l'agence ARTELIA Strasbourg, et Pierre-Etienne SCHNEEGANS, responsable du pôle hydraulique fluviale, pour m'avoir accordé leur confiance en me donnant l'opportunité d'intégrer une équipe d'ingénieurs et de techniciens.

Je souhaite remercier tout particulièrement mon maître de stage, Samuel DEHAN, pour sa disponibilité et ses conseils avisés.

Un grand merci à l'ensemble du personnel d'ARTELIA et aux autres stagiaires, qui m'ont permis d'exploiter pleinement ce stage de fin d'études et d'en tirer une expérience enrichissante aussi bien du point de vue professionnel que personnel.

Résumé

Conception d'aménagements hydrauliques de protection contre les inondations sur le territoire de la Communauté de Communes Moselle & Madon (54).

Le travail du stage a consisté à diagnostiquer le risque inondation du Madon et de ses affluents principaux sur le territoire de la Communauté de Communes Moselle & Madon (Meurthe-et-Moselle, 54) et à concevoir des aménagements de lutte contre ce phénomène au stade avant-projet.

L'analyse hydrologique a permis de caractériser le bassin versant du Madon en termes de réponse hydrologique et de déterminer les débits de crue caractéristiques des cours d'eau sur le secteur étudié.

Ensuite, le diagnostic hydraulique, réalisé à partir d'une simulation numérique des écoulements, a montré la capacité d'écoulement globalement insuffisante du Madon et de ses affluents (ruisseaux de l'Attenaye et du Viterne) sur le territoire étudié. La vulnérabilité des enjeux exposés s'explique également par la présence d'infrastructures en lit majeur modifiant la répartition des écoulements, par les ouvrages hydrauliques en lit mineur et par l'implantation de certaines habitations en pleine zone d'expansion de crue. Les enjeux exposés aux débordements ont été identifiés pour chaque période de retour considérée.

L'étude a abouti à un projet global d'aménagements sur le territoire étudié. Les aménagements de type protection collective (digues, ...) peuvent difficilement être implantés dans les zones urbanisées, les contraintes d'implantation et l'aléa inondation étant trop importants. Les habitations vulnérables seront protégées essentiellement par la pose de batardeaux individuels, un muret de faible longueur complétant le dispositif pour les débordements du Viterne.

Enfin, la faisabilité d'un ouvrage de ralentissement dynamique sur un site identifié initialement en amont du ruisseau de l'Attenaye a été étudiée. Mais le dimensionnement de l'ouvrage avec un modèle de transformation pluie-débit a montré la capacité de stockage insuffisante sur ce site pour une crue trentennale. Des levés topographiques permettront de vérifier la possibilité de protéger les enjeux en aval contre une crue centennale sur d'autres sites potentiels de rétention plus en amont.

Abstract

Design of protective works against floods on the territory of the Moselle & Madon Cities Community (54)

The aims of this project were to diagnose the flood risk of the Madon river and its main tributaries on the territory of the Moselle & Madon Cities Community and to design protective works against this phenomenon at preliminary sizing stage.

An hydrological study has permitted to characterize the drainage area of the Madon river in terms of hydrological response and to determinate the flood discharges of the rivers on the studied territory for three return periods : ten, thirty and one hundred years.

Then, a hydraulic diagnosis, based on a numerical simulation of flows, has demonstrated that the flow capacity of the Madon river and its tributaries (Attenaye and Viterne brooks) is not sufficient. The flood vulnerability of people and goods is also due to some infrastructures located in the major bed (modifying the flows distribution), to the hydraulic structures in the minor bed, and in some cases to their location in the middle of the flood plain. The damageable people and goods, exposed to the overflows, have been located for each return period.

A hydraulic engineering project has been designed on the whole territory. The direct protection against floods (with levees, ...) is not relevant for most of the habitations, the location requirements and the levels of flood water being too much important. Damageable people and goods will essentially be protected with flood barriers, a flood wall completing the protective works against the overflows of the Viterne Brook.

In the end, the viability of a dam for flood control on a site initially located upstream the Attenaye brook has been analyzed. However, the design of this structure showed that the storage capacity was not enough for a 30-year flood. The topographic data acquisition for other site locations upstream will permit to check the viability of protecting damageable people and goods downstream from a 100-year flood.

Sommaire

Remerciements	3
Résumé.....	5
Abstract	6
Sommaire	7
Liste des figures.....	10
Liste des tableaux.....	11
Liste des sigles et abréviations.....	12
Introduction	13
1. Contexte de l'étude.....	15
1.1. Les inondations : un risque naturel majeur	15
1.1.1. Définitions générales et typologie des inondations.....	15
1.1.2. Le risque inondation.....	16
1.2. Présentation du secteur d'étude.....	16
1.2.1. Situation géographique	16
1.2.2. Description du bassin versant du Madon.....	18
1.3. Problématique inondation sur le territoire étudié.....	19
1.3.1. Crues historiques.....	19
1.3.2. La gestion de la problématique inondation par la CCMM	19
1.3.3. Objectifs du travail de stage.....	20
2. Analyse hydrologique préalable.....	21
2.1. Calcul des débits caractéristiques de crue du Madon.....	21
2.1.1. Critique des résultats obtenus par la méthode SPEED.....	23
2.1.2. Débits caractéristiques de crue du Madon sur la zone d'étude (de Xeuilley à Pont-Saint-Vincent)...	24
2.2. Détermination d'un hydrogramme de crue type pour le Madon	25
2.2.1. Objectif et hypothèses formulées	25
2.2.2. Méthode de construction de l'hydrogramme caractéristique	25
2.2.3. Hydrogramme caractéristique obtenu	26
2.3. Analyse hydrologique du ruisseau de l'Attenaye	27
2.3.1. Traitement statistique des pluies.....	27
2.3.2. Traitement statistique des débits	28
2.4. Analyse hydrologique du ruisseau du Viterne	29
3. Modélisation numérique.....	31
3.1. L'outil de modélisation et ses limites	31

3.1.1. Type de logiciel de modélisation	31
3.1.2. Régime de simulation	32
3.1.3. Limites de la modélisation	32
3.2. Construction du modèle.....	33
3.2.1. Réalisation du maillage du modèle	33
3.2.2. Données topographiques utilisées.....	34
3.2.3. Conditions aux limites du modèle	34
3.3. Calage du modèle hydraulique.....	36
3.3.1. Objectifs du calage	36
3.3.2. Données de calage	36
3.3.3. Paramètres de calage du modèle.....	36
3.3.4. Résultats et critique du calage	37
3.4. Validation du modèle hydraulique.....	38
4. Résultats des simulations numériques et cartographie des zones inondables.....	39
5. Diagnostic hydraulique.....	41
5.1. Diagnostic hydraulique sur Xeuilley	41
5.1.1. Le Madon	41
5.1.2. L'Attenaye	42
5.2. Diagnostic hydraulique entre Xeuilley et Bainville-sur-Madon.....	44
5.3. Diagnostic hydraulique sur Bainville-sur-Madon	45
5.3.1. Le Madon	45
5.3.2. Le Viterne	48
6. Dispositifs et ouvrages de protection contre les inondations.....	51
6.1. Mise en place de batardeaux individuels.....	51
6.1.1. Méthodologie.....	51
6.1.2. Protection par batardage dans la commune de Xeuilley	51
6.1.3. Protection par batardage dans la commune de Bainville-sur-Madon	52
6.2. Mur anti-crue à Bainville-sur-Madon	52
6.2.1. Principe et justification de l'aménagement	52
6.2.2. Dimensionnement du mur anti-crue.....	53
6.2.3. Détermination du niveau de protection assuré par le mur anti-crue	54
6.2.4. Impact du mur sur les niveaux de crue	54
6.3. Ouvrage de sur-inondation en amont de Xeuilley	55
6.3.1. Principe et justification de l'aménagement	55
6.3.2. Choix du site d'implantation	57
6.3.3. Loi cote-volume.....	57
6.3.4. Modélisation hydrologique	58

6.3.5. Objectifs et méthode de dimensionnement de l'ouvrage	59
6.3.6. Méthode d'évaluation de l'écrêtement des crues de l'Attenaye.....	60
6.3.7. Résultats des simulations	60
6.3.8. Synthèse et perspectives concernant l'étude de faisabilité d'un ouvrage de ralentissement dynamique	62
Conclusion	65
Bibliographie	67
Annexe 1 : Carte de synthèse lithologique du bassin versant du Madon	70
Annexe 2 : Présentation de la méthode SPEED	71
Annexe 3 : Détermination des débits caractéristiques du Madon.....	73
Annexe 4 : Détermination des débits caractéristiques de l'Attenaye.....	81
Annexe 5 : Présentation du logiciel CARIMA	82
Annexe 6 : Topologie du modèle hydraulique	83
Annexe 7 : Hydrogramme de la crue d'octobre 2006	85
Annexe 8 : Repères de crue pour la crue d'octobre 2006 (fournis par le CETE de l'Est).....	86
Annexe 9 : Carte de synthèse du diagnostic hydraulique sur la commune de Xeuilley.....	89
Annexe 10 : Carte de synthèse du diagnostic hydraulique sur la commune de Bainville-sur-Madon.....	90
Annexe 11 : Atlas cartographique des résultats des simulations numériques	91

Liste des figures

Figure 1 : Carte de localisation du secteur d'étude.....	17
Figure 2 : Stations pluviométriques et limnimétriques installées sur le bassin versant du Madon.....	21
Figure 3 : Tracé de l'hydrogramme de crue type pour le Madon	27
Figure 4 : Principe de modélisation avec le logiciel CARIMA (10)	32
Figure 5 : Embâcles présents sur le pont menant à l'ancien moulin de Xeuilley (Xeuilley, 54990, Meurthe-et-Moselle, France, photographie personnelle, mars 2012 - fond cartographique IGN).....	38
Figure 6 : Localisation des enjeux exposés aux débordements du Madon à Xeuilley (fond cartographique IGN).....	42
Figure 7 : Localisation des ouvrages de franchissement sur l'Attenaye à Xeuilley (fond cartographique IGN).....	43
Figure 8 : Ruisseau de l'Attenaye vu depuis le pont de la rue Jacques Callot (Xeuilley, 54990, Meurthe-et-Moselle, France, auteur : Samuel DEHAN, février 2011)	44
Figure 9 : Localisation des ouvrages routiers entre Xeuilley et Bainville-sur-Madon (fond cartographique IGN).....	45
Figure 10 : Seuil fixe maçonné à la confluence Madon-Viterne (Bainville-sur-Madon, 54550, Meurthe-et-Moselle, France, photographie personnelle, mars 2012)	46
Figure 11 : Localisation de l'ouvrage de franchissement sous la voie ferrée à Bainville-sur-Madon (fond cartographique IGN)	47
Figure 12 : Ouvrages sous la voie ferrée (Bainville-sur-Madon, 54550, Meurthe-et-Moselle, France, photographie personnelle, mars 2012).....	47
Figure 13 : Inondation des habitations en arrière de la voie ferrée lors de la crue de 2006 (Bainville-sur-Madon, 54550, Meurthe-et-Moselle, France, photographie CCMM, 4 octobre 2006).....	48
Figure 14 : Ruisseau du Viterne en amont de la voie ferrée (Bainville-sur-Madon, 54550, Meurthe-et-Moselle, France, auteur : Pierre-Etienne SCHNEEGANS, septembre 2010)	48
Figure 15 : Carte de synthèse des mécanismes de débordement du Viterne	50
Figure 16 : Localisation du mur anti-crue en rive gauche du Viterne à Bainville-sur-Madon	53
Figure 17 : Profil en long du mur anti-crue à Bainville-sur-Madon	54
Figure 18 : Localisation du phénomène de remous du Madon dans le ruisseau de l'Attenaye (fond cartographique IGN)	55
Figure 19 : Principe de fonctionnement de barrages écrêteurs (illustration Conseil Général 72).....	56
Figure 20 : Schéma de principe de l'influence du ralentissement dynamique sur la propagation des crues (illustration ARTELIA)	56
Figure 21 : Loi cote-volume du site de ralentissement dynamique retenu initialement	58
Figure 22 : Réduction de la zone inondable à hauteur du Quartier des Cités avec un dispositif dimensionné pour la crue centennale.....	60
Figure 23 : Réduction de la zone inondable à hauteur du Quartier des Cités avec un dispositif dimensionné pour la crue trentennale.....	61
Figure 24 : Carte de localisation des sites potentiels de rétention en amont de la commune de Xeuilley (Xeuilley, 54990, Meurthe-et-Moselle, France, photographies personnelles, mars 2012)	63

Liste des tableaux

Tableau 1 : Stations pluviométriques sur le bassin versant du Madon.....	22
Tableau 2 : Stations limnimétriques sur le Madon	22
Tableau 3 : Débits caractéristiques de crue du Madon à Pulligny obtenus par la méthode SPEED	23
Tableau 4 : Débits caractéristiques de crue du Madon à Pulligny obtenus par ajustement de Gumbel	24
Tableau 5 : Débits caractéristiques de crue du Madon sur la zone d'étude	25
Tableau 6 : Débits maximaux instantanés des crues du Madon retenues pour le tracé de l'hydrogramme adimensionnel (données Banque Hydro - station de Pulligny)	26
Tableau 7 : Valeurs de pluies caractéristiques retenues pour l'étude du ruisseau de l'Attenaye	28
Tableau 8 : Stations limnimétriques installées sur les ruisseaux de la Bouvade, du Brénon et du Colon	28
Tableau 9 : Débits caractéristiques de crue de l'Attenaye à Xeuilley	28
Tableau 10 : Débit caractéristiques de crue du Viterne à Bainville-sur-Madon.....	29
Tableau 11 : Débits de pointe instantanés mesurés sur la Moselle à Pont-Saint-Vincent (station A5500610) et sur le Madon à Pulligny (station A5431010) lors de la crue d'octobre 2006 (données Banque Hydro)	35
Tableau 12 : Coefficients de Strickler moyens utilisés	37
Tableau 13 : Précision du calage	37
Tableau 14 : Hauteurs de chute en crue sur les deux seuils de l'ancien moulin de Xeuilley	42
Tableau 15 : Hauteurs de chute en crue sur le seuil à la confluence Viterne-Madon	46
Tableau 16: Nombre d'habitations et bâtiments concernés par la mise en place de batardeaux à Xeuilley	52
Tableau 17 : Nombre d'habitations et bâtiments concernés par la mise en place de batardeaux à Bainville-sur-Madon.....	52
Tableau 18 : Occupation du sol sur le bassin versant de l'Attenaye	59
Tableau 19 : Eléments de dimensionnement de l'ouvrage écrêteur sur le ruisseau de l'Attenaye.....	61

Liste des sigles et abréviations

AZI : Atlas des Zones Inondables

CCMM : Communauté de Communes Moselle & Madon

CETE : Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement

CFBR : Comité Français des Barrages et Réservoirs

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

EPTB : Etablissement Public Territorial de Bassin

PAPI : Plan d'Actions de Prévention des Inondations

SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

Introduction

Située à une vingtaine de kilomètres au Sud-Ouest de Nancy (département de la Meurthe-et-Moselle, 54), la Communauté de Communes Moselle & Madon (CCMM) souhaite se protéger contre les inondations de la Moselle, du Madon et de ses affluents principaux. Ces phénomènes naturels ont en effet gravement touché plusieurs communes de son territoire par le passé.

En 2009, le bureau d'études ARTELIA (anciennement SOGREAH) a été mandaté par la CCMM pour réaliser une étude globale de diagnostic des risques, qui a conduit à définir une stratégie globale de lutte contre les inondations à l'échelle de la structure intercommunale et en concertation avec les services techniques de la CCMM. L'amélioration des fonctionnalités physique et écologique des cours d'eau fait également partie intégrante du programme d'actions élaboré.

Puis en 2010, ARTELIA a débuté une mission de maîtrise d'œuvre complète qui consiste à concevoir les aménagements de lutte contre les inondations prévus dans le programme d'actions et à réaliser des travaux de restauration pérenne des cours d'eau concernés. De façon générale, les opérations principales prévues sont présentées ci-dessous :

Opérations concernant la Moselle :

- protection contre les inondations des habitations en rive gauche de la Moselle à Pont-Saint-Vincent par un mur anti-crue,
- mise à niveau de chemins et sécurisation des écoulements débordants de la Moselle par renforcement des zones d'échange entre les étangs du lit majeur (déversoirs de sécurité),
- définition et réalisation de travaux de restauration et d'entretien du ruisseau de la Orne (affluent de la Moselle)

Opérations concernant le Madon et ses affluents :

- protection par batardeaux individuels des habitations de Xeuilley et Bainville-sur-Madon contre les inondations du Madon et de ses affluents principaux (ruisseaux de l'Attenaye et du Viterne),
- création d'un ouvrage de ralentissement dynamique de crue en amont de Xeuilley pour protéger la commune des crues du ruisseau de l'Attenaye,
- aménagement de certains seuils fixes maçonnés sur le Madon, particulièrement dégradés,
- définition et réalisation de travaux de restauration et d'entretien du ruisseau de l'Attenaye (diagnostic déjà réalisé avant le début du stage).

Durant mon stage de fin d'études, il m'a été confié la réalisation du diagnostic hydraulique global du Madon et de ses principaux affluents et le dimensionnement au stade avant-projet des aménagements de protection contre les débordements de ces cours d'eau. Plus précisément, le travail de mon stage a consisté à réaliser les études hydrauliques visant à :

- diagnostiquer le risque inondation causé par le Madon et ses affluents principaux sur le territoire de la CCMM, de façon à définir les niveaux de crue et identifier les enjeux exposés qu'il faudra protéger par batardeaux individuels (selon l'objectif de protection retenu),
- étudier la faisabilité d'un ouvrage de ralentissement dynamique sur un site initialement identifié en amont de la commune de Xeuilley.

Les études concernant l'aménagement et le devenir des seuils sur le Madon ne seront pas présentées dans ce rapport, car des levés topographiques supplémentaires devront être réalisés pour mener une étude hydrogéomorphologique approfondie.

1. Contexte de l'étude

1.1. Les inondations : un risque naturel majeur

1.1.1. Définitions générales et typologie des inondations

Une inondation est la submersion temporaire d'une zone qui est habituellement hors d'eau.

L'inondation doit être distinguée de la crue, qui est l'élévation du niveau d'eau d'une rivière consécutivement à un épisode pluvieux ou à la fonte des neiges. Une crue ne devient une inondation qu'à partir du moment où des zones normalement hors d'eau sont submergées. Ainsi, les crues ne sont pas nécessairement responsables d'inondations et font partie du fonctionnement naturel de la rivière.

Plusieurs types d'inondations peuvent se produire, de façon plus ou moins rapides selon les caractéristiques du cours d'eau et de son bassin versant (pente, occupation du sol,...). La typologie adoptée en France depuis 1992 distingue plusieurs catégories d'inondations (1) :

Les inondations lentes en région de plaine

- Les inondations par débordement direct du cours d'eau : le cours d'eau déborde de son lit mineur et inonde le lit moyen voire le lit majeur de façon progressive. La durée de submersion peut être assez longue, ce qui augmente les dégâts occasionnés sur les différents enjeux atteints. Ce type d'inondation est le plus commun.
- Les inondations par remontée de la nappe phréatique : lorsque le sol est saturé en eau (par exemple suite à plusieurs années se caractérisant par une pluviométrie très excédentaire), la nappe phréatique se trouve à un niveau très haut et affleurant la surface du terrain naturel. Des inondations peuvent se produire et submerger des points bas ou mal drainés. Par exemple, les crues de la Somme en 2001 de façon généralisée dans le département de l'Oise étaient dues à des remontées de nappe.

Les inondations rapides et la formation de crues torrentielles

Les crues torrentielles concernent le plus souvent des bassins versants à forte pente (rivières torrentielles en milieu montagnard). Lorsqu'un épisode pluvieux de forte intensité se produit sur l'ensemble du bassin versant, les eaux ruisselées se concentrent rapidement dans le lit mineur de la rivière. L'augmentation du débit est très brutale et provoque une violente crue torrentielle. Le lit mineur peut être colmaté par la formation d'embâcles (accumulation de sédiments et de bois morts) qui forment une vague dévastatrice en cas de rupture. Le phénomène de coulées d'eaux boueuses peut également se produire, notamment en milieu rural, par le ruissellement important sur des surfaces agricoles sans couvert végétal suffisamment dense. Par leur ampleur et leur rapidité, ces phénomènes représentent les inondations les plus meurtrières et sont les plus difficiles à anticiper. La crue de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine en 1992 illustre la violence de telles crues.

Les inondations par ruissellement des eaux pluviales sur les bassins périurbains

Lors d'épisodes pluvieux particulièrement intenses (orages), le réseau d'eaux pluviales urbain peut être saturé et entrer en charge. Les eaux ne peuvent plus être évacuées et ruissellent sur les routes, causant des dégâts importants sur les habitations et infrastructures. Ce phénomène est d'autant plus conséquent que le taux d'imperméabilisation des surfaces est important en milieu urbain. Les surfaces bitumées, les parkings, les toitures des bâtiments empêchent le plus souvent l'eau de s'infiltrer. Le ruissellement surfacique généré sur les sols agricoles en amont peut également être à l'origine de coulées d'eaux boueuses. Les inondations à Nîmes en 1988 ou très récemment celles à Nancy en 2012 sont des exemples de cas d'inondations par ruissellement des eaux pluviales.

D'autres phénomènes d'inondation peuvent se produire mais de façon moins fréquente, comme les submersions marines ou encore les crues hypodermiques (non détaillées dans ce rapport).

1.1.2. Le risque inondation

Le risque inondation est l'association de deux composantes : l'aléa inondation et la vulnérabilité des surfaces inondables.

L'aléa inondation représente uniquement la manifestation du phénomène de crue par débordement du cours d'eau en dehors de son lit mineur. Il est caractérisé par sa période de retour (son occurrence) et par le débit de pointe du cours d'eau lors de l'épisode de crue (son intensité).

Mais l'aléa inondation ne représente un risque qu'à partir du moment où des enjeux sont présents sur le territoire soumis aux débordements. Les enjeux représentent l'ensemble des personnes, biens matériels, activités socio-économiques, ..., pouvant être impactés par l'aléa inondation. L'enjeu est qualifié par son importance (nombre d'éléments exposés) et par sa vulnérabilité qui exprime sa capacité à ne pas être impacté par un aléa d'une intensité donnée. Autrement dit, la vulnérabilité d'un enjeu face à un aléa donné exprime l'ampleur des conséquences de l'aléa sur l'enjeu lorsqu'il vient à se produire. La vulnérabilité des enjeux est aggravée par les aménagements de l'Homme réalisés à la fois dans le lit mineur du cours d'eau et dans la plaine inondable. Par exemple, les infrastructures linéaires dans le lit majeur (remblais ferroviaires ou routiers,...) et la modification de l'occupation du sol dans un contexte urbain modifient les vitesses et directions de propagation des écoulements débordants.

En France, le risque inondation concerne 13 300 communes dont 300 grandes agglomérations (2). Près d'un tiers des communes françaises sont concernées par ce phénomène exceptionnel. 5 millions d'habitants seraient en zone inondable (environ 8% de la population) (3). Un certain nombre d'études ont été réalisées pour estimer le coût annuel des inondations en France. Le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable annonce la valeur de 250 millions d'euros par an. Il s'agit de la première cause d'indemnisation pour les assureurs, représentant une proportion de 80 % des dommages imputables aux risques naturels. L'urbanisation croissante et le développement d'activités économiques dans le lit majeur des cours d'eau, associés à une conscience du risque souvent insuffisante, expliquent ces coûts élevés.

1.2. Présentation du secteur d'étude

1.2.1. Situation géographique

La Communauté de Communes Moselle & Madon est une structure intercommunale créée en 1965. Elle regroupe 12 communes situées au Sud-Est de Nancy, dans le département de la Meurthe-et-Moselle (54).

Ce territoire est marqué par la présence de l'eau. Il est traversé d'Est en Ouest par la Moselle, et du Sud au Nord par le Madon. Leur confluence est située dans la commune de Pont-Saint-Vincent. Ces deux cours d'eau principaux ont également d'autres affluents sur le territoire étudié, de taille plus modeste mais qui contribuent néanmoins aux débordements en crue.

Ainsi, sur l'ensemble du secteur étudié, les cours d'eau responsables d'inondations assez conséquentes par le passé sont les suivants (cf carte de situation du secteur d'étude en *figure 1*) :

- la Moselle (communes de Messein et Pont-Saint-Vincent),
- le Madon (affluent en rive gauche de la Moselle, communes de Xeulley, Bainville-sur-Madon et Pont-Saint-Vincent),
- le ruisseau de l'Attenaye (affluent en rive gauche du Madon, commune de Xeulley),
- le ruisseau du Viterne (affluent en rive gauche du Madon, commune de Bainville-sur-Madon).

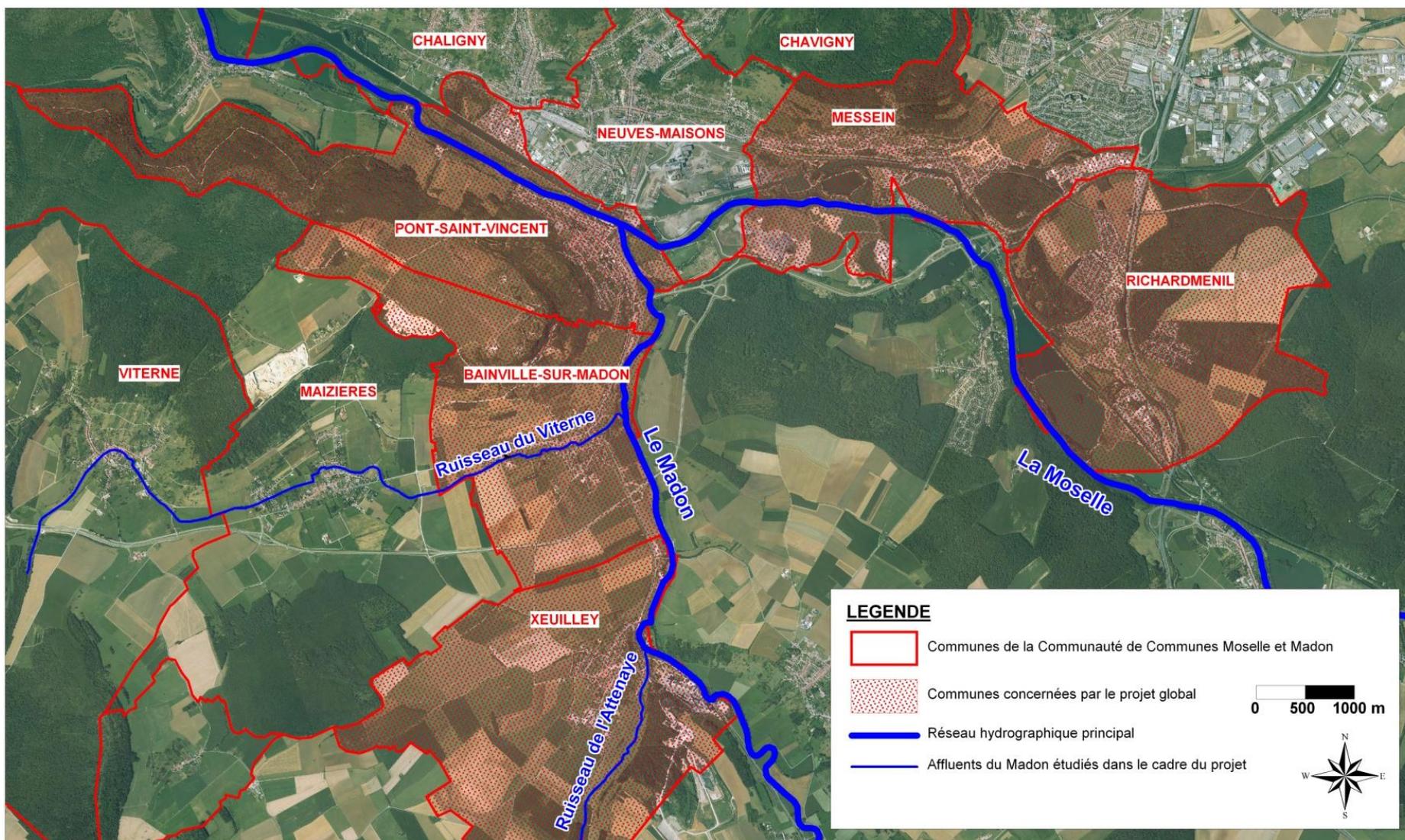


Figure 1 : Carte de localisation du secteur d'étude

Le risque inondation est plus ou moins important dans chacune des communes concernées selon les mécanismes de débordements, leur période de retour ainsi que les enjeux présents.

Durant mon stage, il m'a été confié le travail de diagnostic hydraulique et de dimensionnement d'aménagements de protection contre les inondations dans le cas du Madon et de ses affluents.

Le secteur étudié englobe un linéaire du Madon de 6,8 kilomètres, entre les communes de Xeulley et Pont-Saint-Vincent (confluence avec la Moselle). Sur ce territoire, le cours d'eau a été aménagé de façon à répondre à plusieurs contraintes et usages. Le lit majeur du Madon est marqué par les infrastructures linéaires qui ont été construites dans les communes traversées et qui modifient les écoulements naturels dans la plaine inondable.

Les deux affluents du Madon faisant l'objet de la mission de maîtrise d'œuvre (le ruisseau de l'Attenaye et le ruisseau de Viterne) présentent des similarités entre eux. Ils se caractérisent par de faibles linéaires valant respectivement 8,4 kilomètres et de 7,8 kilomètres. Traversant tous deux une zone urbanisée, leur tracé a été rectifié et le lit mineur a été recalibré à plusieurs endroits.

1.2.2. Description du bassin versant du Madon

Le Madon prend sa source au pied du Ménamont (467 m), un des sommets des Monts Faucilles (au sud du département des Vosges). Il se jette dans la Moselle à Pont-Saint-Vincent après avoir parcouru un linéaire de 96,9 kilomètres dont environ 40 km dans le département de la Meurthe-et-Moselle (données issues du Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau). Le Madon et l'ensemble de ses affluents drainent un bassin versant d'une superficie de 1033 km².

Topographie

La commune de Mirecourt représente un point de transition importante en ce qui concerne la configuration du bassin versant du Madon. En amont de Mirecourt, le réseau hydrographique est particulièrement dense et le Madon présente de nombreux affluents situés sur des bassins versants assez pentus (le bassin versant étant limité à l'Est par le relief des Vosges). A partir de la traversée de Mirecourt, la configuration du bassin versant du Madon change radicalement. Les affluents du Madon sont moins nombreux et drainent des bassins versants dont la pente est beaucoup moins marquée. Le contexte topographique se caractérise donc par des disparités spatiales assez importantes sur le bassin versant qui auront une influence sur sa réponse hydrologique.

Occupation du sol

L'occupation du sol est également un paramètre essentiel conditionnant le fonctionnement hydrologique du bassin versant en influant sur le ruissellement. Le bassin versant du Madon reste un milieu essentiellement rural et agricole. Il comporte essentiellement des paysages vallonnés formés de forêts, de prairies et de terres agricoles (cultivées ou non) recouvrant environ 80 % de sa surface. Toutefois, des secteurs assez urbanisés sont également présents, notamment à partir de la traversée de Mirecourt (partie aval du bassin versant).

Géologie

Les caractéristiques géologiques sont un élément important de caractérisation de la réponse hydrologique du bassin versant, car elles influent sur la perméabilité des sols et donc sur la part d'eau ruisselée lors d'un épisode pluvieux de forte intensité. Le bassin versant du Madon est situé sur le Plateau Lorrain. Là-encore, deux zones ayant des caractéristiques bien différentes s'opposent sur celui-ci (4). La partie amont du bassin versant repose sur les formations marno-calcaires du Trias. Celles-ci rendent les sols imperméables et favorisent des ruissellements importants et une réponse hydrologique rapide lors d'un événement pluvieux de forte intensité. Par contre, à partir de Mirecourt, le Madon s'écoule sur un bassin versant calcaire à marno-calcaire. La capacité d'infiltration des sols pourra être importante à condition que la proportion du substrat marneux ne soit pas trop forte. La carte de synthèse lithologique en *annexe 1* présente cette différence concernant la géologie entre la partie amont du bassin versant du Madon et sa partie médiane et aval.

1.3. Problématique inondation sur le territoire étudié

1.3.1. Crues historiques

Le territoire de la CCMM a été marqué par de grandes crues historiques qui restent dans les mémoires des habitants et qui rappellent la vulnérabilité de ce territoire (4).

Crue du Madon en décembre 1947

Cet épisode de crue constitue un des événements les plus marquants sur le territoire étudié. En raison de son ancienneté, les témoignages restent peu nombreux pour décrire cet événement. Cependant, l'épisode de pluie d'une intensité exceptionnelle, associé à la fonte d'une couche neigeuse formée auparavant, a abouti à des dégâts conséquents.

Crue du Madon en avril 1983

La crue de 1983 se caractérise par sa durée relativement longue (environ 6 jours). Des précipitations d'intensité moyenne mais se produisant de façon prolongée ont abouti à la saturation des sols avant l'épisode de crue. Les précipitations d'une forte intensité qui ont suivi ont abouti au débordement du cours d'eau de façon prolongée. Le débit instantané maximal à la station limnimétrique de Pulligny a été de 262 m³/s le 10 avril 1983 (source : Banque Hydro).

Crue de l'Attenaye en janvier 2004

La crue du 13 janvier 2004 du ruisseau de l'Attenaye a été très conséquente. Le Quartier des Cités au Sud de Xeuilley a été particulièrement touché par les débordements. Cet événement montre la nécessité de réaliser des aménagements de protection contre les crues non seulement pour les crues du Madon, mais également pour des affluents qui peuvent apporter des dégâts importants sur les habitations riveraines.

Crue du Madon en octobre 2006

Le dernier épisode de crue marquant du Madon est celui d'octobre 2006. **Cette crue représente la crue historique de référence à l'échelle du bassin versant du Madon.** La durée globale de l'événement est plus faible que lors de la crue de 1983 (trois à quatre jours). Sur la partie amont et médiane du bassin versant du Madon, la crue de 2006 reste la plus forte crue connue. Le débit maximal instantané mesuré à Mirecourt le 3 octobre 2006 est de 340 m³/s (données Banque Hydro), valeur dont l'occurrence est estimée à 150 ans (5). Plus en aval, le ralentissement dynamique de la crue se manifeste par une diminution du débit de pointe, la valeur mesurée à Pulligny (environ 50 km en aval de Mirecourt) le 4 octobre 2006 étant de 248 m³/s (données Banque Hydro). L'ampleur de l'événement reste néanmoins très importante, la crue ayant causé de nombreux dégâts sur les communes de Xeuilley et Bainville-sur-Madon.

Crues secondaires du Madon

D'autres épisodes de crue ont eu lieu sur le Madon, notamment en décembre 1988, janvier 1994 et novembre 1996. Ces crues sont néanmoins moins conséquentes que celles présentées précédemment.

1.3.2. La gestion de la problématique inondation par la CCMM

Une réunion de travail avec les services techniques de la CCMM le 2 avril 2012 a permis de connaître l'avancement des procédures en cours.

Pour faire face aux inondations sur son territoire, la CCMM dispose désormais de la compétence « lutte contre les inondations » (modification des statuts de la CCMM adoptée le 5 avril 2012) qui lui permet de devenir une structure capable de porter le projet de lutte contre les inondations sur son territoire. **Les démarches actuelles permettront notamment au projet d'entrer dans le cadre du Plan d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) Moselle et Madon afin de bénéficier de subventions.**

De façon générale, les PAPI sont un outil de contractualisation et de collaboration active entre les services de l'Etat et plus précisément la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (ici la DREAL Lorraine), les Etablissements Publics Territoriaux de Bassin (l'EPTB Entente Meurthe et Madon permettant le développement concerté des bassins versants de ces deux cours d'eau) et les collectivités locales (en l'occurrence la CCMM ici) (6). Ils ont pour objectif de promouvoir une gestion intégrée des risques d'inondation, au moyen d'une politique globale de prévention raisonnée par rapport à une échelle hydrogéographique cohérente (celle du bassin versant à risque). Plusieurs phases doivent permettre de respecter les critères de labellisation PAPI :

- le diagnostic du territoire conduisant à la caractérisation de l'aléa inondation,
- la définition d'une stratégie de protection adaptée au contexte local et d'un programme d'actions permettant l'amélioration de la connaissance du risque, la gestion de l'aléa inondation et la réduction de la vulnérabilité des habitations concernées sur le territoire étudié,
- l'identification d'une gouvernance locale disposant des compétences lui permettant de porter le projet dans le cadre de la démarche PAPI (CCMM).

La labellisation PAPI du projet permettra de recevoir des subventions (pouvant atteindre 80 %).

1.3.3. Objectifs du travail de stage

L'objet du travail de stage est la conception des aménagements de protection contre les inondations du Madon et de ses affluents pour les communes de Xeulley, Bainville-sur-Madon et Pont-Saint-Vincent (au stade avant-projet).

La connaissance du risque inondation sur la Moselle est très bonne. L'Atlas des Zones Inondables (AZI) de la Moselle (réalisé par ARTELIA en 2002) définit précisément l'aléa inondation à hauteur des communes de Messein et Pont-Saint-Vincent. En revanche, en ce qui concerne le Madon, les données et études existantes sont moins nombreuses. La cartographie des zones inondables du Madon aval selon l'approche hydrogéomorphologique (7) ne définit pas les hauteurs de submersion de façon précise sur les communes concernées. De même, la modélisation numérique du Madon réalisée par le Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement (CETE) de l'Est (8) n'apporte pas une connaissance suffisamment précise de l'aléa inondation. Ce manque d'information concerne essentiellement les niveaux de crue dans le lit majeur du Madon (dont la connaissance précise est essentielle du fait de la présence d'enjeux en milieu urbain) et au niveau des habitations riveraines des deux affluents du Madon étudiés ici (ruisseaux de l'Attenaye et du Viterne). En outre, seule l'occurrence de crue centennale a été traitée dans cette étude.

Ainsi, **la première phase de mon stage consiste à poursuivre les études hydrologiques et hydrauliques sur le Madon et ses principaux affluents** (le ruisseau de l'Attenaye et le ruisseau du Viterne). Ces travaux permettront de déterminer précisément l'aléa inondation (niveaux de crue et cartographie des zones inondables) et d'identifier les mécanismes de débordement et de propagation des crues.

La seconde phase est consacrée au dimensionnement des aménagements hydrauliques de protection contre les inondations du Madon et de ses affluents dans les communes de Xeulley et Bainville-sur-Madon. Les stratégies d'aménagement retenues ont été fixées dans le programme d'actions global et dépendent de la vulnérabilité des zones à protéger et des contraintes d'implantation sur site :

- protection individuelle par batardeaux amovibles des habitations situées en zone inondable dans les communes de Xeulley et Bainville-sur-Madon (stratégie de protection complétée par un mur anti-crue en rive gauche du ruisseau du Viterne à Bainville-sur-Madon),
- mise en place d'un barrage écrêteur de crues en amont de Xeulley pour protéger les habitations du Quartier des Cités contre les débordements du ruisseau de l'Attenaye.

2. Analyse hydrologique préalable

L'analyse hydrologique est une phase de préparation du travail de modélisation numérique des écoulements du Madon et de ses affluents étudiés. La première phase de cette analyse est la détermination des débits de crue du Madon entre Xeuilley et Pont-Saint-Vincent, pour les périodes de retour de 10 ans, 30 ans et 100 ans.

ARTELIA a mené en 2010 une étude hydrologique, pour le compte du Conseil Général des Vosges (88), dans le cadre de la vérification de l'impact hydraulique de la déviation de Mirecourt (par la RD166) sur la zone inondable du Madon (5). Le calcul des débits caractéristiques de crue du Madon s'appuie sur cette étude réalisée avant le début de mon stage, par analyse et actualisation des données avec les valeurs supplémentaires désormais disponibles.

Dans une seconde phase, un hydrogramme type est déterminé afin de pouvoir considérer à la fois le débit de pointe de l'hydrogramme et sa forme globale. Cet hydrogramme sera utilisé pour réaliser la modélisation numérique dans la phase de diagnostic hydraulique

2.1. Calcul des débits caractéristiques de crue du Madon

Les données issues des stations limnimétriques et pluviométriques présentes sur le bassin versant du Madon ont été exploitées dans le cadre de l'analyse hydrologique. Ces stations sont localisées sur la carte suivante :

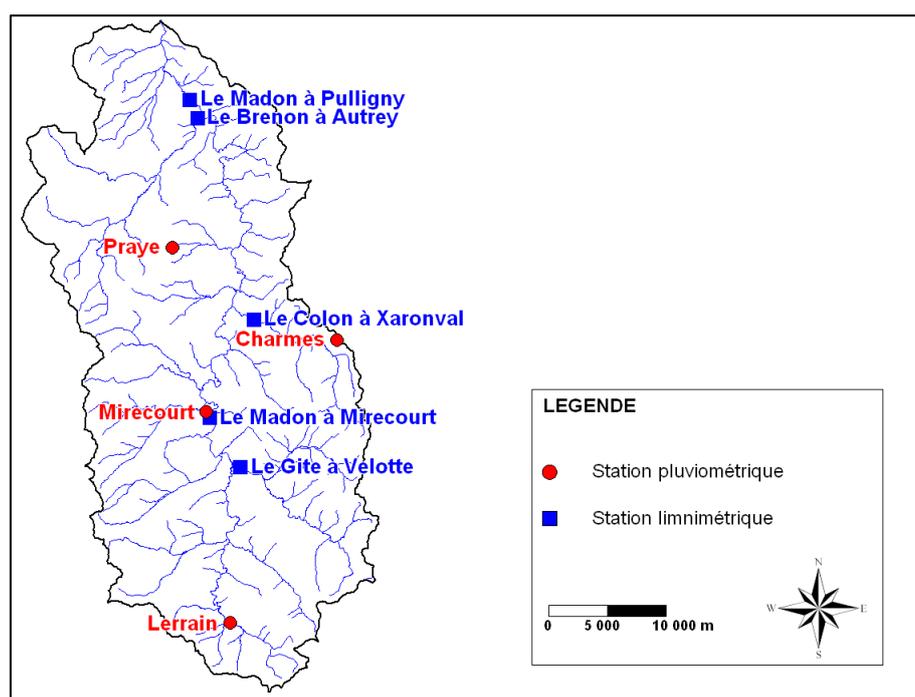


Figure 2 : Stations pluviométriques et limnimétriques installées sur le bassin versant du Madon

L'analyse hydrologique permettant le calcul des débits caractéristiques de crue repose sur l'application de la méthode SPEED (Système Probabiliste d'Etude par Evènements Discrets), mise au point par ARTELIA et validée en France par de nombreuses études sur tout le territoire.

La méthode SPEED, présentée en *annexe 2*, est une méthode probabiliste qui intègre la théorie du Gradex. Elle est basée sur deux analyses réalisées de façon successive :

- **L'analyse régionale des pluies et le traitement des maxima des pluies journalières de chaque année hydrologique,**
- **Le traitement statistique des maxima des débits instantanés mesurés pour chaque année hydrologique, au moyen d'une relation pluie-débit.**

L'expression classique du débit de crue (pour une période de retour donnée) en fonction de la superficie du bassin versant drainée sur une région donnée (pour laquelle la géologie et la pluviométrie ne varient que très peu) est la suivante :

$$Q = a S^b$$

Le coefficient b est toujours inférieur à 1 (amortissement du débit de crue en fonction de la surface) et reste généralement voisin de 0,8 en région Lorraine ; et le coefficient a est compris entre 0,25 et 1,0 (9).

En appliquant la méthode SPEED, la relation pluie-débit est obtenue graphiquement par superposition des maxima des pluies journalières et des débits réduits (Q_{re}). Les débits réduits sont l'expression en millimètres des débits de pointe de crue par cette relation :

$$Q_{re} = \frac{12 Q}{S^{0.75}}, \text{ avec } S \text{ la superficie du bassin versant intercepté en km}^2 \text{ et } Q \text{ le débit en m}^3/\text{s}$$

Avec cette formulation, l'expression probabiliste du débit de pointe de crue pour une période de retour donnée s'exprime donc sous la forme :

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

Ainsi, cette formulation est cohérente avec l'expression classique du débit de crue selon la superficie du bassin versant.

Les concepts utilisés, la méthodologie de calcul mise en œuvre, l'analyse des données utilisées et des résultats obtenus sont présentés en annexe 3. Les tableaux suivants répertorient les stations pluviométriques et limnimétriques sur le bassin versant du Madon :

Station	Code station	Altitude (m)	Nombre d'années de mesure	Début	Fin
Lerrain	88 267	320	38	1971	Ouverte
Mirecourt	88 304	265	68	1939	Ouverte
Charmes	88 090	283	42	1958	2008
Praye	54 434	307	50	1949	2008

Tableau 1 : Stations pluviométriques sur le bassin versant du Madon

Station	Code station	Altitude (m)	Superficie du bassin versant (km ²)	Nombre d'années de mesure	Début	Fin
Mirecourt	A5261010 A5261020	261	382	42	01/08/1965	ouverte
Pulligny	A5431010	225	943	46	01/01/1964	ouverte

Tableau 2 : Stations limnimétriques sur le Madon

Le calcul des débits caractéristiques de crue du Madon est réalisé à partir des données de la station limnimétrique de Pulligny. Les résultats sont les suivants :

Période de retour	2 ans	10 ans	30 ans	100 ans
Débit réduit Q_{re} (mm)	11,1	17,7	21,6	25,9
Débit du Madon à Pulligny (m^3/s) [S = 943 km^2]	157	251	307	367

Tableau 3 : Débits caractéristiques de crue du Madon à Pulligny obtenus par la méthode SPEED

2.1.1. Critique des résultats obtenus par la méthode SPEED

Compte-tenu de l'incertitude sur les valeurs de débits du Madon sur la zone d'étude (aucune station de mesure n'est installée sur le Madon entre Pulligny et Pont-Saint-Vincent), l'ajustement des débits réduits a été réalisé de façon volontairement sécuritaire.

Afin de valider les résultats obtenus par la méthode SPEED, il est possible de réaliser un ajustement de Gumbel des maxima des débits instantanés annuels. La loi de Gumbel est couramment utilisée pour réaliser des ajustements statistiques des débits de crue. En effet, il s'agit de la loi la plus adaptée pour représenter la statistique des débits de crue sous les climats tempérés.

De façon générale pour chaque ajustement de Gumbel réalisé, la méthode d'échantillonnage retenue consiste à extraire à partir de la Banque Hydro les débits maximaux instantanés de chaque année hydrologique observée. Cette méthode est la plus rapide et la plus simple à mettre en œuvre ; mais elle présente l'inconvénient de ne pas différencier les différentes crues dans le temps (typiquement les crues hivernales dues à des précipitations continues et les crues d'été dues à des phénomènes orageux). De plus, si plusieurs crues se sont produites durant une même année hydrologique, seule la crue la plus importante sera prise en compte ce qui représente une perte d'information concernant l'autre crue qui aurait pu influencer l'ajustement statistique (si sa valeur est assez élevée par rapport aux autres par exemple). Cependant, considérer les débits maximaux instantanés pour chaque saison « civile » supposerait de prendre en compte le débit d'étiage en été, ce qui n'a pas de sens dans un ajustement de Gumbel des débits de crue.

L'ajustement est donc réalisé avec les débits instantanés maximaux de chaque année hydrologique. Ces valeurs sont tout d'abord classées par ordre décroissant, afin de calculer une fréquence expérimentale pour chacune d'entre-elles. Plusieurs formules de calcul d'une fréquence expérimentale F_i existent (i est le rang de l'observation et a le nombre d'années d'observation) :

$$\text{Formule de Cunnane} : F_i = \frac{i - 0,4}{a + 0,2}$$

$$\text{Formule de Gringorten} : F_i = \frac{i - 0,44}{a + 0,12}$$

$$\text{Formule de Hazen} : F_i = \frac{i - 0,5}{a}$$

$$\text{Formule de Weibull} : F_i = \frac{i}{a + 1}$$

Ces formules ont été testées, et la formule retenue est celle de Weibull qui donne les résultats les plus contraignants (période de retour la plus faible pour un événement donné). Une fois cette fréquence expérimentale connue (fréquence au non-dépassement), il est possible de calculer la période de retour de chaque débit mesuré. Ainsi, un débit de période de retour 10 ans sera dépassé en moyenne une fois tous les 10 ans.

Enfin, il reste à réaliser un ajustement des événements considérés par une loi de probabilité (la loi de Gumbel ici pour l'étude des phénomènes de crue). Cet ajustement est réalisé en calculant la fréquence de non-dépassement en fonction de la variable réduite de Gumbel u :

$$F(u) = e^{-e^{-u}} \text{ avec } u = \frac{x-x_0}{s}$$

$$s = 0,78 \sigma \text{ avec } \sigma \text{ l'écart type des mesures}$$

$$x_0 = x - 0,577 s \text{ avec } x \text{ la moyenne des mesures}$$

Une régression linéaire est alors effectuée avec les points obtenus pour $F(u)$.

Les résultats obtenus sont les suivants :

T (années)	10	30	100
Q (m ³ /s)	231	279	330
Intervalle de confiance à 68 %	[214 ; 248]	[255 ; 302]	[298 ; 362]

Tableau 4 : Débits caractéristiques de crue du Madon à Pulligny obtenus par ajustement de Gumbel

Le débit d'occurrence centennal obtenu par cet autre ajustement est de 330 m³/s, soit environ 40 m³/s de moins que la valeur obtenue par la méthode SPEED. Cependant, l'intervalle de confiance à 68 % de cet ajustement de Gumbel est [298 m³/s ; 362 m³/s], ce qui positionne la valeur obtenue par la méthode SPEED légèrement au-dessus de la borne supérieure de cet intervalle.

Les valeurs obtenues par la méthode SPEED sont retenues pour la suite de l'étude et notamment pour la modélisation hydraulique. En particulier, le débit centennal à hauteur de Pulligny est fixé à 367 m³/s.

2.1.2. Débits caractéristiques de crue du Madon sur la zone d'étude (de Xeuilley à Pont-Saint-Vincent)

Il reste enfin à déterminer les débits caractéristiques de crue du Madon valables sur la zone d'étude (entre Xeuilley et Pont-Saint-Vincent).

Aucune station limnimétrique n'existe sur le Madon entre Pulligny et Pont-Saint-Vincent. De fait, la détermination des débits en différents points du linéaire d'étude est réalisée à partir des débits réduits caractéristiques par la formule suivante (formulation SPEED) :

$$Q = \frac{S^{0,75}}{12} Q_{re} \text{ , avec } S \text{ la superficie du bassin versant en km}^2 \text{ et } Q_{re} \text{ le débit réduit en mm}$$

Par hypothèse, pour une période de retour donnée, le débit réduit est considéré constant entre Pulligny et la confluence avec la Moselle.

Le calcul des débits caractéristiques nécessite de connaître la superficie du bassin versant à l'endroit considéré. La superficie du bassin versant du Madon à l'aval immédiat de la confluence du ruisseau de l'Attenaye est de 985 km². Elle est de 1033 km² à la confluence avec la Moselle à Pont-Saint-Vincent. Les débits caractéristiques peuvent donc être calculés à ces deux endroits.

Les apports des différents affluents du Madon entre Pulligny et Pont-Saint-Vincent seront reportés sur les ruisseaux de l'Attenaye et du Viterne. Les débits appliqués à ces deux points d'injection sont choisis de telle façon que le débit du Madon conserve la même période de retour en différents points du secteur d'étude.

Les valeurs de débits caractéristiques sont répertoriées dans ce tableau (les injections de débit en entrée du modèle hydraulique du Madon sont en caractère gras) :

Période de retour	10 ans	30 ans	100 ans
Débit réduit Q_{re} (mm)	11,1	17,7	21,6
Débit du Madon à Pulligny (m^3/s) appliqué en entrée du modèle [S = 943 km ²]	251	307	367
Injection de débit sur le ruisseau de l'Attenaye (m^3/s)	8	10	12
Débit du Madon en aval de la confluence du ruisseau de l'Attenaye (m^3/s) [S = 985 km ²]	259	317	379
Injection de débit sur le ruisseau du Viterne (m^3/s)	9	12	14
Débit du Madon à Pont-Saint-Vincent (m^3/s) [S = 1033 km ²]	268	329	393

Tableau 5 : Débits caractéristiques de crue du Madon sur la zone d'étude

2.2. Détermination d'un hydrogramme de crue type pour le Madon

2.2.1. Objectif et hypothèses formulées

La modélisation numérique du Madon nécessitera d'appliquer un hydrogramme de crue en entrée du modèle.

Outre la valeur du débit de pointe, la forme de l'hydrogramme de crue est également un facteur important. En effet, le volume de la crue et la durée pendant laquelle le débit sera supérieur à une valeur donnée dépendra de la forme globale de l'hydrogramme. L'objectif est de construire un hydrogramme de crue type qui soit représentatif de la réponse hydrologique du bassin versant du Madon lors d'une crue.

De façon générale, la forme de l'hydrogramme dépend à la fois des facteurs « externes » (conditions climatiques, intensité et durée de la pluie) et des caractéristiques géomorphologiques du bassin versant (pente, occupation du sol, géologie,...). En particulier, le temps de concentration du bassin versant représente la durée maximale nécessaire à une goutte d'eau pour atteindre l'exutoire du bassin versant à partir d'un point sur celui-ci. Le raisonnement formulé ici consiste à distinguer la réponse du bassin versant à un événement pluvieux selon que cet événement soit courant ou exceptionnel. En effet, le temps de concentration est une variable complètement aléatoire pour des événements pluvieux courants, qui dépend à la fois des caractéristiques du bassin versant, de la période de retour de l'événement pluvieux et de l'état d'humectation antérieur des sols. Par contre, pour les phénomènes exceptionnels, le temps de concentration ne dépend plus de l'intensité de la pluie tombée compte-tenu de l'état de saturation des sols et des volumes d'eau mis en jeu. Avec cette hypothèse, il dépend donc uniquement des caractéristiques géomorphologiques du bassin versant.

2.2.2. Méthode de construction de l'hydrogramme caractéristique

Ainsi, l'hydrogramme de crue type du Madon est construit à partir des hydrogrammes des crues historiques ayant une période de retour élevée. La fidélité de la forme de l'hydrogramme type vis-à-vis de la réponse hydrologique du bassin versant augmente avec le nombre de crues considérées dans sa construction.

De plus, l'hydrogramme type résultant doit être adimensionnel afin de ne pas tenir compte de l'importance d'une crue donnée par rapport aux autres. En effet, en se basant par exemple sur l'hydrogramme associé à la crue la plus importante, la forme et le tracé de l'hydrogramme type obtenu de cette façon seraient erronés dès qu'un phénomène de crue de plus grande ampleur se produirait. Il est donc essentiel de rendre l'hydrogramme type adimensionnel.

La méthode mise en œuvre inclut les phases suivantes :

- recensement des crues les fortes sur la station hydrométrique de Pulligny,
- obtention des hydrogrammes de crue correspondants à partir des données de la Banque Hydro,

- calcul d'un hydrogramme centré et réduit par rapport à la pointe de crue pour chaque événement considéré, le débit relatif étant calculé de cette façon :

$$Q_{relatif} = \frac{Q - Q_{base}}{Q_{max} - Q_{base}}$$

- superposition de l'ensemble des hydrogrammes réduits et vérification de l'homogénéité du faisceau de courbes obtenues,
- tracé d'un hydrogramme de référence qui représente au mieux les hydrogrammes centrés réduits issus des données historiques de crues du Madon.

2.2.3. Hydrogramme caractéristique obtenu

Les crues historiques du Madon retenues sont les plus fortes crues mesurées sur la période d'exploitation de la station limnimétrique de Pulligny :

Date	Débit maximal instantané mesuré (m ³ /s)
18 novembre 1972	205
09 avril 1983	262
05 décembre 1988	272
08 janvier 1994	226
13 novembre 1996	231
09 mars 1999	230
30 décembre 2001	229
04 octobre 2006	248
08 décembre 2010	208

Tableau 6 : Débits maximaux instantanés des crues du Madon retenues pour le tracé de l'hydrogramme adimensionnel (données Banque Hydro - station de Pulligny)

Le graphique suivant présente les hydrogrammes centrés réduits obtenus. Leur superposition est satisfaisante, le faisceau de courbes restant globalement homogène. La méthode de calcul des hydrogrammes relatifs, basée sur les débits de pointe, s'applique donc bien aux événements étudiés. L'hydrogramme de référence a alors été défini par rapport à cette superposition des hydrogrammes centrés réduits des crues historiques retenues :

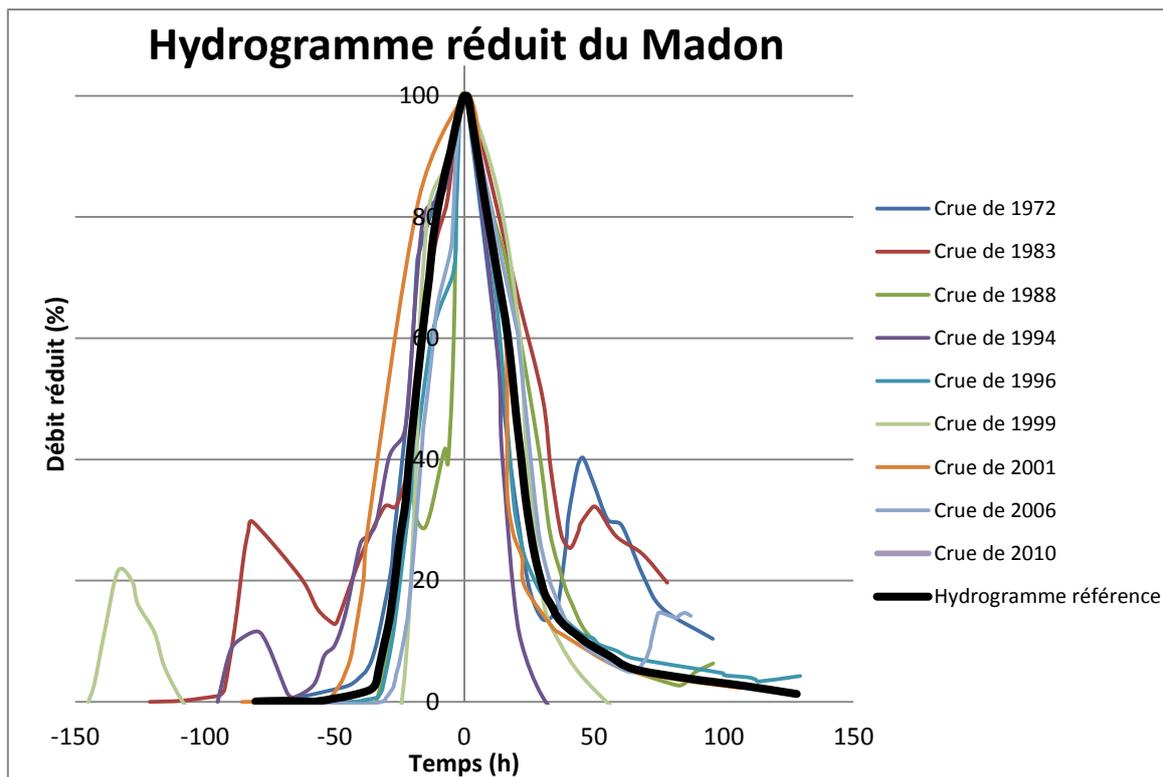


Figure 3 : Tracé de l'hydrogramme de crue type pour le Madon

Le temps de montée de l'hydrogramme type construit est de l'ordre de 35 heures. Son temps de descente est quant à lui d'environ 40 heures. La durée de dépassement de 30% du débit de pointe est de deux jours environ. Globalement, il a une forme similaire à l'hydrogramme de la crue de 2006, avec un temps de montée légèrement plus long et un volume légèrement supérieur.

2.3. Analyse hydrologique du ruisseau de l'Attenaye

2.3.1. Traitement statistique des pluies

Pour réaliser l'étude hydrologique dans le cas du Madon, les données des stations pluviométriques disponibles sur son bassin versant ont été analysées (stations de Lerrain, Mirecourt, Charmes et Praye). La *figure 2* permet de localiser ces stations sur le bassin versant du Madon.

Les valeurs de pluies caractéristiques seront nécessaires pour réaliser l'étude de faisabilité d'un bassin de rétention sur le ruisseau de l'Attenaye en amont de Xeuilley. Les stations de Lerrain et de Mirecourt sont trop éloignées par rapport au bassin versant du ruisseau pour pouvoir utiliser leurs données (variation spatiale des pluies). De même, bien qu'elle soit moins éloignée que les deux précédentes, la station de Charmes est située plus en altitude et en position plus excentrée par rapport au bassin versant du ruisseau de l'Attenaye. Les données de ces trois stations ne sont donc pas appropriées pour traiter les pluies sur ce bassin versant, l'intensité des pluies pouvant être assez différente en amont de la zone étudiée ou plus haut en altitude.

Ainsi, seules les données de la station pluviométrique de Praye ont été retenues pour cette analyse. L'ajustement statistique de Gumbel des pluies journalières maximales annuelles pour cette station a abouti aux résultats suivants (cf *annexe 3*) :

	P10 (mm)	P30 (mm)	P100 (mm)
Station pluviométrique de Praye	53	63	75

Tableau 7 : Valeurs de pluies caractéristiques retenues pour l'étude du ruisseau de l'Attenaye

2.3.2. Traitement statistique des débits

Les débits caractéristiques de crue du ruisseau de l'Attenaye seront utilisés lors du diagnostic hydraulique (estimation de la capacité d'écoulement du ruisseau en termes de période de retour) et pour le dimensionnement de l'ouvrage de ralentissement dynamique. Cependant, ils ne peuvent pas être déterminés de façon directe, puisqu'aucune station limnimétrique n'est installée sur le ruisseau de l'Attenaye.

Pour estimer ses débits caractéristiques, la méthode retenue consiste à effectuer une analogie avec les bassins versants des ruisseaux voisins de la Bouvade, du Brénon et du Colon. Cette comparaison se justifie par les caractéristiques analogues de leur bassin versant respectif en termes de climatologie, de pédologie, de géologie et d'occupation du sol.

Chacun de ces cours d'eau est équipé d'une station limnimétrique :

Station	Code station	Altitude (m)	Superficie du bassin versant (km ²)	Nombre d'années de mesure	Début	Fin
La Bouvade à Bicqueley	A5622010	215	71	23	16/05/1979	13/02/2008
Le Brénon à Autrey	A5422010	230	139	36	06/08/1969	13/06/2007
Le Colon à Xaronval	A5303010	260	62	22	01/02/1979	01/07/2008

Tableau 8 : Stations limnimétriques installées sur les ruisseaux de la Bouvade, du Brénon et du Colon

Les débits instantanés maximum de chaque année hydrologique ont été ajustés statistiquement par la loi de Gumbel (données issues de la Banque Hydro). L'ajustement des débits est satisfaisant pour le Brénon, mais l'alignement des points est insuffisant pour la Bouvade et le Colon (les figures de l'analyse hydrologique sont présentées en *annexe 4*). De ce fait, seuls les résultats issus du traitement statistique des débits du Brénon ont été considérés pour déterminer les débits caractéristiques de l'Attenaye.

Pour une période de retour donnée, les débits caractéristiques de crue sont comparés entre les deux bassins versants par l'intermédiaire de la formule de Myer :

$$Q_{Attenaye} = \left(\frac{S_{BV Attenaye}}{S_{BV Brénon}} \right)^{0.75} \times Q_{Brénon}$$

Les valeurs obtenues sont les suivantes :

	Q2 (m ³ /s)	Q5 (m ³ /s)	Q10 (m ³ /s)	Q30 (m ³ /s)	Q100 (m ³ /s)
Le Brénon à Autrey [S = 139 km ²]	32	45	53	66	79
L'Attenaye à Xeuilley [S = 32 km ²]	11	15	18	22	26

Tableau 9 : Débits caractéristiques de crue de l'Attenaye à Xeuilley

2.4. Analyse hydrologique du ruisseau du Viterne

L'objectif est de calculer les débits caractéristiques du ruisseau du Viterne à Bainville-sur-Madon pour traduire par la suite sa capacité d'écoulement en termes de période de retour. De la même façon que pour l'Attenaye, aucune station de mesure n'est installée sur ce cours d'eau de taille modeste.

Les débits caractéristiques du ruisseau du Viterne sont obtenus en faisant l'hypothèse de l'égalité des débits réduits des ruisseaux de l'Attenaye et du Viterne. En effet, les deux bassins versants sont similaires en termes de superficie, d'occupation du sol, de géologie et surtout de pluviométrie. Leur réponse hydrologique sera donc vraisemblablement analogue.

Ainsi, le calcul des débits du Viterne aboutit à ces résultats :

Période de retour		2 ans	5 ans	10 ans	30 ans	100 ans
L'Attenaye à Xeuilley	Débit (m ³ /s)	11	15	18	22	26
	Débit réduit (mm)	10	13	16	20	23
Le Viterne à Bainville-sur-Madon	Débit (m ³ /s)	10	13	15	19	22

Tableau 10 : Débit caractéristiques de crue du Viterne à Bainville-sur-Madon

3. Modélisation numérique

L'analyse hydrologique présentée précédemment a permis de déterminer les débits caractéristiques de crue du Madon et de ses affluents étudiés, ainsi qu'un hydrogramme de crue type pour le Madon.

La partie suivante consiste à réaliser une modélisation hydraulique afin de quantifier et analyser les niveaux exceptionnels de crue, en prenant en compte les éléments de diagnostic hydrologique décrits au préalable.

Le modèle hydraulique du Madon a été conçu en intégralité dans le cadre de cette étude, en utilisant le logiciel CARIMA (CALcul de Rivières MAillées). Le modèle hydraulique de la Moselle avait quant à lui été réalisé en 2002 par ARTELIA (avec le même outil de modélisation) dans le cadre de l'élaboration de l'AZI de la Moselle. Les conclusions de cette étude ont pu être utilisées ici.

A partir de l'outil de calcul CARIMA, les simulations numériques permettent :

- de préciser les capacités d'écoulement du Madon et de ses affluents sur les secteurs à enjeux étudiés,
- d'identifier les obstacles à l'écoulement et l'influence de certains ouvrages sur les directions d'écoulement et les hauteurs d'eau lors d'un épisode de crue,
- de délimiter le contour des zones inondables.

3.1. L'outil de modélisation et ses limites

3.1.1. Type de logiciel de modélisation

Le choix de l'outil de modélisation est essentiel : les résultats et les limitations du logiciel doivent être adaptés aux caractéristiques du tronçon de rivière à modéliser et aux objectifs souhaités ; et la précision des résultats fournis doit correspondre à celles des données de calage utilisées (3).

Pour réaliser cette étude hydraulique, l'outil utilisé est le logiciel CARIMA (CALcul de Rivières MAillées), dont la présentation figure en *annexe 5*. Ce logiciel, développé par ARTELIA, est un système de modélisation des écoulements permanents ou transitoires à surface libre, dans le cas de régimes fluviaux (rivières et zones inondables) et des réseaux d'irrigation. L'outil est capable de traiter deux régimes de base des écoulements fluviaux (10) (11) :

- l'écoulement unidimensionnel (1-D) suivant le ou les lits mineurs du cours d'eau, représenté par les équations complètes de Barré de Saint-Venant tenant compte de l'inertie,
- l'écoulement complexe dans le champ d'inondation, qui est représenté par une modélisation pseudo 2-D « à casiers » et par des équations simplifiées de l'écoulement ne tenant pas compte de l'inertie.

Le logiciel permet également de modéliser les écoulements au droit de tout type d'ouvrage hydraulique ou de singularité (ponts, seuils, remblais, ouvrages en charge,...).

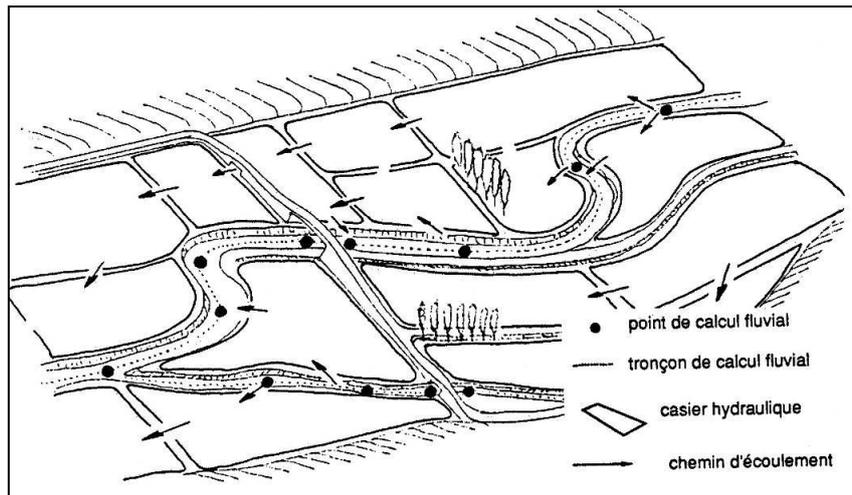


Figure 4 : Principe de modélisation avec le logiciel CARIMA (10)

Dans les zones urbanisées du secteur étudié (Xeulilly et Bainville-sur-Madon), la complexité des écoulements dans le champ d'inondation doit être prise en compte dans la modélisation. En effet, lors des crues du Madon ou de ses affluents, les écoulements dans le lit majeur n'ont pas un axe privilégié unique. Ils dépendent notamment de la topographie et des aménagements réalisés dans le lit majeur : les routes et la voie ferrée construites sur remblais entrecroisent le lit majeur et délimitent des zones de stockage dans les zones urbaines. Les ouvrages hydrauliques mis en place entre la rivière et sa plaine alluviale (passages busés sous la voie ferrée, possibilité de remous hydrauliques,...) conditionnent également les écoulements. Cette diversité de conditions d'écoulement dans le lit majeur peut se traduire par exemple par l'apparition de poches de stockage d'eau en période de crue, ou encore par des écoulements localement de l'aval vers l'amont.

Ainsi, l'outil de modélisation CARIMA répond aux besoins spécifiques de modélisation du secteur étudié. Il permet la modélisation des zones où le champ d'inondation est hétérogène par une série de casiers qui communiquent entre eux et avec le lit mineur. Les secteurs urbains à proximité directe avec le lit mineur du Madon, notamment à Xeulilly et Bainville-sur-Madon, ont été modélisés de cette façon afin de pouvoir évaluer finement l'aléa inondation dans ces zones à enjeux humains ou matériels. Chaque casier représente une zone de stockage qui se remplit ou se vidange. Les écoulements dans le lit mineur ainsi que les échanges entre casiers ou entre un casier et le cours d'eau sont régis par une loi de résistance (prise en compte des pertes de charge par frottements) ou par une loi spécifique à un ouvrage (orifice,...). Les échanges entre le Madon et ses affluents ont également été pris en compte dans la modélisation.

3.1.2. Régime de simulation

Les simulations sont effectuées en régime transitoire (débit variable dans le temps), en utilisant l'hydrogramme de crue type déterminé lors de l'étude hydrologique préalable. De cette façon, le phénomène d'écroulement de l'hydrogramme sera pris en compte, par la sollicitation du lit majeur représenté notamment par les casiers.

3.1.3. Limites de la modélisation

La modélisation des écoulements dans le lit mineur d'un cours d'eau est basée sur les équations de Barré-de-Saint-Venant. Plusieurs hypothèses sont à la base de cette schématisation des écoulements réels (12) :

- Le fluide est supposé parfait et incompressible, avec sa masse volumique considérée constante.
- Les écoulements sont considérés comme unidirectionnels et rectilignes. Le principe d'écoulements plans suppose que, dans une section en travers donnée du cours d'eau, la vitesse est uniforme et les vecteurs vitesse sont perpendiculaires à cette même section. Les vitesses sont donc moyennées sur la section mouillée.

- La répartition de pression est hydrostatique sur une verticale, et l'accélération verticale est négligeable.
- Le rayon de courbure des lignes de courant est négligeable devant le linéaire du tronçon considéré.
- Les pertes de charge par frottements et les effets de la turbulence ne diffèrent pas par rapport au régime permanent.

De plus, la précision des résultats annoncés sur les niveaux absolus des crues simulées dépend :

- de la représentativité des coefficients empiriques représentant la complexité des écoulements multidirectionnels,
- de l'imprécision inhérente à la topographie,
- du calage du modèle étroitement lié à l'incertitude du relevé des laisses de crues connues, mais dont la validité est encore conditionnée par :
 - la finesse de l'analyse hydrologique,
 - la connaissance précise des hydrogrammes des crues de calage (notamment au droit des laisses de crue),
 - la représentativité des laisses de crue par rapport aux conditions particulières d'écoulement au moment de la crue (augmentation importante du niveau de crue en amont d'un ouvrage due à la présence d'embâcles, ...),
- de l'imprécision inhérente à l'extrapolation depuis les crues de calage vers les crues caractéristiques.

En outre, les conditions d'écoulement particulières au droit de certains ouvrages (seuils,...) aboutissent à des résultats de calcul difficilement appréciables en tant que tels.

De fait, la précision des résultats annoncés sur les niveaux de crues absolus peut être estimée à 30 cm près.

3.2. Construction du modèle

3.2.1. Réalisation du maillage du modèle

La première étape est la réalisation du maillage du modèle hydraulique.

Le lit mineur est représenté par des points de calcul qui correspondent chacun à un profil en travers dont la géométrie a été levée. Ces points sont reliés par des tronçons de calcul unidimensionnels, pouvant s'interconnecter dans le cas de confluences et diffluences. A chaque point de calcul en lit mineur correspond donc une section d'écoulement renseignée par le coefficient de rugosité (coefficient de Strickler).

Le maillage du lit majeur a quant à lui été créé selon l'occupation du sol et notamment selon les enjeux présents dans la plaine inondable. Les écoulements dans le lit majeur sont décrits par le prolongement des profils en travers du lit mineur prolongés sur chaque rive si les écoulements de la rivière présentent un axe

d'écoulement unique y compris dans le lit majeur (champ d'inondation). Le coefficient de rugosité correspondant est appliqué, en distinguant les lits mineur et majeur. En revanche, les zones urbanisées où existent des enjeux humains et matériels et où le lit majeur est très hétérogène (répartition des écoulements modifiée par des ouvrages et infrastructures) ont été modélisées par un maillage à l'aide de casiers. Chaque casier comporte un centre de casier qui sert de point de calcul et qui est connecté au lit mineur du cours d'eau ou à un autre casier à l'aide d'une liaison paramétrée par une section d'écoulement caractéristique (profil en travers) et par un coefficient de Strickler. Le casier est décrit par une loi cote-superficie.

Enfin, les dimensions des différents ouvrages d'art (ponts, seuils, ouvrages de décharge sous remblais) ont été intégrées afin de prendre en compte l'incidence de ces constructions sur les écoulements et les lignes d'eau. Des profils en travers placés immédiatement en amont et en aval de l'ouvrage permettent sa description.

Le modèle global comporte un peu plus de 100 points de calcul dont 15 casiers en lit majeur.

Les cartes en *annexe 6* présentent la topologie du modèle.

3.2.2. Données topographiques utilisées

Les données topographiques utilisées sont nombreuses. Un semis de points par photogrammétrie décrit la topographie du lit majeur. Des levés de profils en travers du lit mineur des cours d'eau (prolongés en lit majeur) permettent de décrire leur géométrie. Les ponts, seuils et autres ouvrages de franchissement présents sur les cours d'eau ont également été levés, des profils en travers encadrent l'ouvrage en amont et en aval immédiat. Enfin, la voie ferrée a été levée dans sa traversée de secteurs à enjeux afin de modéliser finement les déversements dans les casiers par-dessus le remblai ferroviaire. Les profils en long des autres infrastructures linéaires construits sur remblai (routes, chemins) ont également été définis, là-encore dans le but d'affiner la topographie en tenant compte des obstacles dirigeant les écoulements en lit majeur.

Une visite de terrain m'a également permis d'approfondir ma connaissance de la topographie du secteur étudié.

3.2.3. Conditions aux limites du modèle

- **A l'amont du modèle**

Les conditions amont du modèle sont des conditions de débit. Trois hydrogrammes sont appliqués en entrée du modèle.

Sur le Madon, le débit de pointe calculé à hauteur de Pulligny est appliqué en amont du modèle. L'analyse hydrologique préalable a permis de déterminer les débits de pointe et un hydrogramme de crue type pour le Madon à Pulligny.

Entre Pulligny et Pont-Saint-Vincent, les apports de débit des différents affluents doivent être pris en compte dans la modélisation. Ils ont été reportés sur les ruisseaux de l'Attenaye à Xeuilley et du Viterne à Bainville-sur-Madon. Les débits appliqués à ces deux points d'injection sont choisis de telle façon que le débit du Madon conserve la même période de retour en tout point du secteur d'étude (*voir le tableau 5 en partie 1*).

- **A l'aval du modèle**

La condition aval du modèle est une condition de niveau. L'aval du modèle représente la confluence entre la Moselle et le Madon à Pont-Saint-Vincent. S'agissant d'un paramètre essentiel dans le cas d'une modélisation en régime fluvial, il s'agit d'appliquer une condition aval réaliste en termes de probabilité d'une concomitance des crues des deux rivières. Le scénario d'inondation le plus contraignant serait une concomitance des crues des deux cours d'eau.

Pour étudier davantage cette probabilité de concomitance des crues, la crue de 2006 a été étudiée. Les valeurs de débits instantanés mesurées sur les deux cours d'eau sont les suivantes (source Banque Hydro) :

La Moselle à Pont-Saint-Vincent (station A5500610)			Le Madon à Pulligny (station A5431010)		
Date	Heure	Débit instantané (m ³ /s)	Date	Heure	Débit instantané (m ³ /s)
04/10/2006	03:06:00	785	03/10/2006	20:48:00	150
04/10/2006	06:36:00	973	03/10/2006	22:30:00	166
04/10/2006	07:18:00	983	04/10/2006	03:24:00	187
04/10/2006	08:06:00	1100	04/10/2006	04:18:00	198
04/10/2006	09:36:00	1190	04/10/2006	05:42:00	227
04/10/2006	11:06:00	1240	04/10/2006	08:42:00	248
04/10/2006	12:06:00	1250	04/10/2006	12:18:00	236
04/10/2006	20:36:00	1060	04/10/2006	14:24:00	226
05/10/2006	04:06:00	781	04/10/2006	19:42:00	201
05/10/2006	05:36:00	726	04/10/2006	21:42:00	189
05/10/2006	09:06:00	598	05/10/2006	05:06:00	155
05/10/2006	10:06:00	565	05/10/2006	05:42:00	149

Tableau 11 : Débits de pointe instantanés mesurés sur la Moselle à Pont-Saint-Vincent (station A5500610) et sur le Madon à Pulligny (station A5431010) lors de la crue d'octobre 2006 (données Banque Hydro)

La station de Pulligny étant assez éloignée de Pont-Saint-Vincent, le modèle hydraulique du Madon a été utilisé pour estimer le temps de propagation de l'onde de crue entre ces deux communes. Il est d'environ sept heures.

Le pic de crue du Madon a eu lieu le 4 octobre 2006 vers 9 h à Pulligny ; il a donc atteint Pont-Saint-Vincent environ sept heures plus tard soit aux alentours de 16 h.

Le pic de crue de la Moselle est quant à lui arrivé à Pont-Saint-Vincent vers 12 h, soit environ quatre heures plus tôt que le Madon. Le débit instantané maximal mesuré est de 1250 m³/s. L'analyse hydrologique de la Moselle, réalisée en 2002 dans le cadre de l'élaboration de l'AZI (13) fait mention des débits de référence suivants : environ 930 m³/s en amont de la confluence avec le Madon et environ 1200 m³/s en aval de la confluence. La crue de référence de la Moselle (plus forte crue connue, de période de retour variable d'amont en aval mais supérieure à 100 ans) est la crue historique de 1947. Ainsi, le débit de pointe de la Moselle lors de la crue de 2006 a une période de retour supérieure à 100 ans.

Cependant, au moment de l'arrivée du pic de crue du Madon au niveau de la confluence avec la Moselle (vers 16 h), la Moselle était en récession, à un débit d'environ 1100 m³/s soit environ 88% de son débit de pointe. **Il y a donc pratiquement eu concomitance des crues de la Moselle et du Madon lors de l'épisode de crue d'octobre 2006.** Ainsi, la concomitance des crues de la Moselle et du Madon est un phénomène possible.

Ainsi, compte-tenu des valeurs de débits de référence au niveau de la confluence entre la Moselle et le Madon (environ 930 m³/s en amont et 1200 m³/s en aval), la concomitance de deux crues centennales générerait un événement de période de retour supérieure à 100 ans en aval de la confluence.

Néanmoins, considérant les incertitudes liées à l'hydrologie du Madon à la confluence avec la Moselle, il est essentiel de choisir des conditions sécuritaires. La configuration la plus défavorable a été considérée dans la modélisation de la crue centennale, à savoir une concomitance des crues de la Moselle (crue de référence utilisée pour l'AZI) et du Madon (crue centennale modélisée). **La condition aval du modèle du Madon pour la crue centennale est donc la cote correspondant à la crue de référence de la Moselle au niveau de la confluence, soit une cote de 221,54 m selon l'AZI de la Moselle.** (13)

Toujours en considérant les cotes correspondantes de l'AZI de la Moselle à la confluence entre la Moselle et le Madon, la condition aval du modèle est de 221,25 m pour la crue trentennale, et de 220,93 m dans le cas de la crue décennale.

3.3. Calage du modèle hydraulique

3.3.1. Objectifs du calage

Le modèle hydraulique doit représenter fidèlement la réalité des écoulements. L'objectif de la phase de calage est donc d'adapter certains paramètres de la modélisation de telle sorte à ce que les résultats des simulations coïncident au mieux avec des données historiques réelles.

3.3.2. Données de calage

Le modèle hydraulique des écoulements du Madon a été calé par rapport à la crue de 2006. Cette crue a occasionné des dommages conséquents sur le territoire de la CCMM, les débordements ayant atteint de nombreuses habitations. Il s'agit de la crue majeure la plus récente sur ce territoire. Cela permet de limiter le risque que les conditions d'écoulements aient changé du fait des aménagements réalisés depuis fin 2006 (entre la crue utilisée pour le calage et la modélisation avec les données topographiques en situation actuelle).

Les données utilisées pour caler le modèle hydraulique du Madon sont :

- ***L'hydrogramme de la crue de 2006, récupéré à partir de la Banque Hydro (présenté en annexe 7)***
- ***Les laisses de la crue du 4 octobre 2006***

Elles correspondent aux niveaux d'eau qui ont été repérés et nivelés suite à l'événement de crue. Ces données proviennent de la base de données des repères de crues fournie par le CETE de l'Est (cf fiches de crue en *annexe 8*). Neuf repères de crue sont exploitables pour caler le modèle. Le fait qu'il s'agisse de l'épisode de crue du Madon le plus récent diminue la probabilité que la géométrie du lit mineur du cours d'eau et l'occupation globale des sols en lit majeur aient évolué significativement entre la situation valable lors de la crue utilisée pour le calage et la situation actuelle.

- ***La condition aux limites en aval, au niveau de la confluence avec la Moselle***

La crue de la Moselle à Pont-Saint-Vincent en octobre 2006 a été une crue au moins centennale selon les études réalisées antérieurement par ARTELIA (13), avec un débit instantané maximal de $1250 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'aval de la confluence avec le Madon. Le modèle hydraulique de la Moselle (AZI) fournit une cote de 221,54 m pour la crue de référence au niveau de la confluence du Madon avec la Moselle (13). La Moselle étant en récession au moment du pic de crue du Madon lors de la crue d'octobre 2006 (environ $1100 \text{ m}^3/\text{s}$, la valeur de 221,50 m a donc été appliquée en condition aval du modèle du Madon pour le caler avec les données de la crue de 2006.

3.3.3. Paramètres de calage du modèle

Les coefficients de rugosité (coefficients de Strickler) ainsi que de perte de charge ont été utilisés pour caler le modèle. Le calage est effectué par tâtonnements, en comparant les hauteurs d'eau obtenues après simulation par le logiciel avec les hauteurs d'eau réellement mesurées (laisses de crue utilisées).

Pour chaque section géométrique utilisée dans le modèle (profil en travers du lit mineur, section d'écoulement caractéristique dans un casier en lit majeur), un coefficient de Strickler a été renseigné. Ce coefficient dépend de la nature physique du fond du lit mineur, et de l'occupation du sol dans la plaine d'inondation. Il permet d'influer sur les pertes de charge par frottements et sur les niveaux d'eau.

Les coefficients de Strickler qui ont été utilisés sont les valeurs fixées lors du calage de façon à ce que les niveaux d'eau obtenus coïncident au mieux avec les laisses de la crue de 2006. Ils sont présentés dans le tableau suivant :

	Occupation du sol	Coefficient de Strickler
Lit mineur	Fond du lit	18 à 25
Lit majeur	Pâturages, zones cultivées	≈ 14
	Broussailles	≈ 10
	Forêts	≈ 8

Tableau 12 : Coefficients de Strickler moyens utilisés

3.3.4. Résultats et critique du calage

La précision du calage du modèle conditionne la fidélité des résultats obtenus lors de son exploitation. Sa précision dépend de la différence entre les laisses de crue utilisées et les niveaux d'eau obtenus par le modèle. Mais elle est également conditionnée par la représentativité des repères de crue par rapport aux conditions particulières d'écoulement au moment de la crue. La durée entre la crue et le moment où le marquage d'un repère de crue est réalisé peut également impacter la représentativité de la laisse, tout comme la nature du repère (plaque ou simple marquage en couleur sur le mur).

La localisation des laisses de crue et les résultats du calage du modèle avec la crue d'octobre 2006 sont présentés sur les plans en *annexe 11*. Le tableau suivant présente les écarts entre les cotes simulées et les laisses de la crue de 2006 :

Commune	Laisse de la crue de 2006 (m)	Référence de la laisse de crue dans la base de données des repères de crue du CETE de l'Est (<i>annexe 8</i>)	Cote obtenue après calage du modèle (m)	Différence de niveau (m)
Xeulley	226,11 (2 laisses)	3682 - 3683	225,78	-0,33
	225,54	3684	225,66	0,12
	225,23	3685	225,14	-0,09
Bainville-sur-Madon	222,69	3686	222,84	0,15
	222,82	3687	222,84	0,02
	222,53	3688	222,49	-0,04
	222,62	3689	222,63	0,01
Pont-Saint-Vincent	221,86	3690	222,02	0,16

Tableau 13 : Précision du calage

Les cotes calculées sont pour la plupart supérieures aux laisses de la crue de 2006, ce qui est sécuritaire.

Les deux laisses de crue indiquées sur les habitations en arrière de la route de Pierreville à Xeulley n'ont pas pu être obtenues lors du calage. La cote obtenue par calcul étant un peu plus de 30 cm en-dessous de la laisse de crue. Cependant, les enquêtes terrain ont permis de se rendre compte que le risque d'embâcles est particulièrement élevé sur les biefs en aval de la diffluence (secteur du moulin de Xeulley). En effet, la ripisylve, essentiellement constituée de saules blancs (*Salix alba*), est assez vieillissante et manque d'entretien à cet endroit. Il est donc tout à fait envisageable que des embâcles se soient formés lors de l'épisode de crue de 2006 sous le pont menant au moulin de Xeulley. La conséquence directe serait une augmentation de la ligne d'eau en amont, ce qui expliquerait les difficultés rencontrées pour caler le modèle à partir des laisses de crues situées sur les habitations derrière la route de Pierreville.

Néanmoins, il n'est pas envisageable de réduire la section d'écoulement sous le pont menant au moulin (bief ouest) car il est impossible de prédire que des embâcles se produiront à nouveau lors de futurs épisodes de crue. Il faudra rester vigilant et sécuritaire par la suite vis-à-vis des hauteurs d'eau obtenues pour la crue de référence à cet endroit.

La photographie suivante (prise le 7 mars 2012) illustre la présente d'embâcles sur ce secteur :

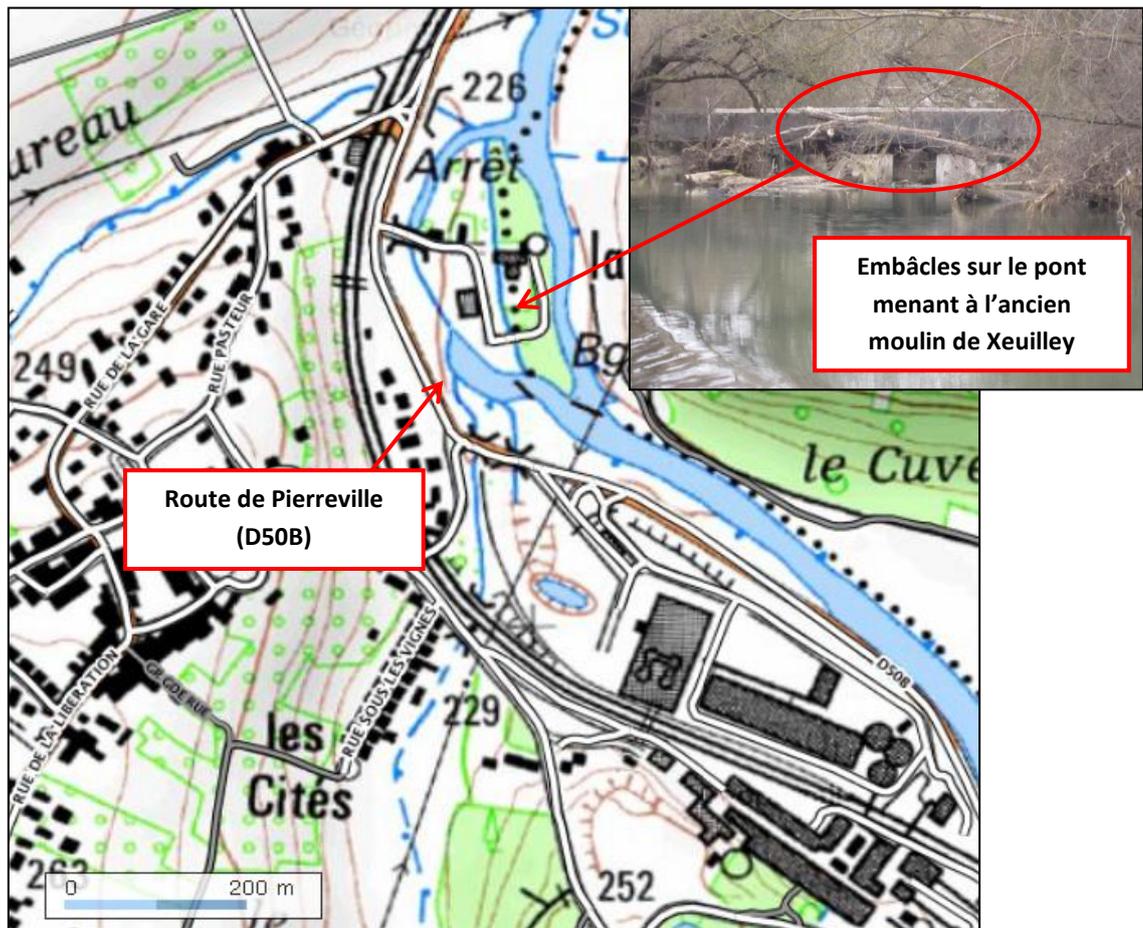


Figure 5 : Embâcles présents sur le pont menant à l'ancien moulin de Xeuilley (Xeuilley, 54990, Meurthe-et-Moselle, France, photographie personnelle, mars 2012 - fond cartographique IGN))

3.4. Validation du modèle hydraulique

Enfin, il reste à valider le modèle en réalisant la simulation d'un autre événement de crue que la crue de calage, pour lequel des laisses de crue sont disponibles. La crue de 1983 est la seule crue exploitable sur le secteur étudié en plus de la crue de 2006. Mais seules trois laisses de crue sont disponibles. La validation du modèle est donc difficilement réalisable dans de bonnes conditions.

Elle est tout d'abord limitée par le nombre et la représentativité médiocre des laisses de crue disponibles. S'agissant d'une crue beaucoup moins récente que la crue de 2006, la représentativité des laisses de crue peut être grandement diminuée par les aménagements réalisés sur le cours d'eau et dans le lit majeur depuis 1983, ceux-ci ayant pu changer la répartition des écoulements et la capacité hydraulique du cours d'eau.

Mais surtout, les niveaux de crue du Madon dépendent de la condition aval du modèle à la confluence avec la Moselle. La connaissance de l'hydrogramme de crue de la Moselle permettrait d'identifier le débit de la Moselle au moment de l'arrivée du pic de crue du Madon à leur confluence, puis d'obtenir la cote de la Moselle correspondante avec l'AZI de la Moselle. Or, la station limnimétrique installée sur la Moselle à Pont-Saint-Vincent (A5500610) n'a réalisé des mesures qu'à partir de 1988. De plus, aucune laisse de la crue de 1983 n'est exploitable au niveau de la confluence des deux cours d'eau.

En conséquent, cette phase de validation du modèle hydraulique n'a pas pu être effectuée du fait de l'absence de données exploitables de façon pertinente.

4. Résultats des simulations numériques et cartographie des zones inondables

Les résultats des simulations numériques à partir du logiciel CARIMA (niveaux de crue et débits) ont été obtenus pour les occurrences de crue décennale, trentennale et centennale.

De plus, les zones inondables du Madon ont été cartographiées en comparant les cotes de crue obtenues avec les données topographiques du terrain naturel. Les débordements dans la zone aval du Madon avant la confluence avec la Moselle à Pont-Saint-Vincent n'ont pas été cartographiés puisque les niveaux de crue dans cette zone sont ceux de l'AZI de la Moselle.

Les cartes de résultats des simulations des crues d'occurrence décennale et centennale du Madon, ainsi que les cartes de résultats du calage du modèle avec la crue d'octobre 2006, sont présentées en *annexe 11*.

Il est important de rappeler ici que la modélisation numérique des écoulements pour une période de retour donnée a été réalisée en considérant les hydrogrammes de crue à Pulligny. Les injections de débit sur les ruisseaux de l'Attenaye à Xeulley et du Viterne à Bainville-sur-Madon permettent de conserver une période de retour constante sur l'ensemble du linéaire du Madon sur le secteur d'étude. De ce fait, les niveaux de crue des ruisseaux de l'Attenaye et du Viterne sur les cartes correspondent à ces valeurs de débits injectés.

5. Diagnostic hydraulique

Cette partie présente le diagnostic hydraulique effectué sur la base des résultats de la modélisation du Madon avec le logiciel CARIMA. Il présente :

- les mécanismes globaux de propagation des crues du Madon et des affluents étudiés (identification des points de débordement principaux et des axes d'écoulements préférentiels des écoulements débordants en lit majeur),
- les enjeux impactés et la capacité d'écoulement des cours d'eau avant atteinte de ces enjeux,
- les facteurs (topographie, ouvrages hydrauliques, infrastructures linéaires...) pouvant aggraver les phénomènes de crues.

5.1. Diagnostic hydraulique sur Xeuilley

La carte en *annexe 9* récapitule l'ensemble des mécanismes de débordement et de propagation des crues pour la commune de Xeuilley. Ces phénomènes sont présentés dans ce paragraphe.

5.1.1. Le Madon

En amont de la commune de Xeuilley, la plaine alluviale du Madon est peu étendue du fait de la présence de plusieurs infrastructures. L'expansion latérale des écoulements en crue est limitée en rive gauche par la voie ferrée. Aussi, la plate-forme de la cimenterie occupe une surface au sol importante sur la rive gauche du Madon, ce qui rétrécit le lit majeur. Enfin, un phénomène de remous du Madon vers le ruisseau de l'Attenaye est possible à la confluence des deux cours d'eau lors des épisodes de crue importants, ce qui pourrait augmenter les hauteurs d'eau au niveau des habitations situées entre la voie ferrée et la route de Pierreville D50B.

Les habitations situées directement en aval de la cimenterie sont donc particulièrement vulnérables aux crues. Les débordements se produisent sur la route de Pierreville D50B et sur la rue de la Cimenterie. Pour une crue centennale, ils touchent les habitations situées en arrière de ces deux routes sans atteindre celles situées au plus proche du remblai de la voie ferrée (celles-ci étant à une altitude plus élevée). La vulnérabilité de cette zone est par ailleurs accentuée par sa situation particulière en extrados de méandre. Les premières habitations sont atteintes lors de crues du Madon ayant une période de retour de 5 à 10 ans. Les hauteurs de submersion sont comprises entre 50 cm et 1 m dans le cas d'une crue centennale.

Mais les habitations les plus vulnérables sont celles de l'ancien moulin de Xeuilley (lieu-dit « La Scierie ») : elles sont touchées par des crues de très faible occurrence (inférieure à 2 ans). Les hauteurs de submersion sont conséquentes pour une crue centennale et peuvent atteindre 1,6 m.

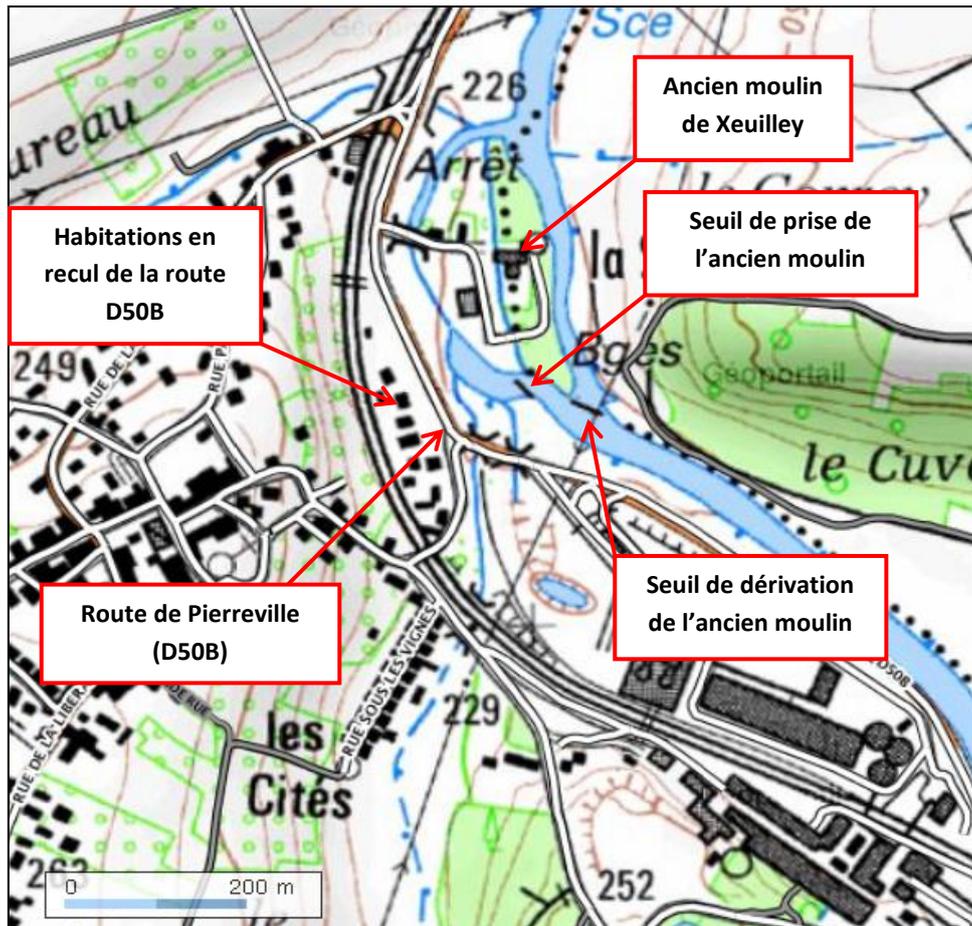


Figure 6 : Localisation des enjeux exposés aux débordements du Madon à Xeuilley (fond cartographique IGN)

Enfin, deux seuils fixes maçonnés sont implantés à travers le lit mineur du Madon à Xeuilley, en amont du lieu-dit de « La Scierie ». Leur impact sur la ligne d'eau en crue, pour les trois occurrences de crue considérées, est précisé dans le tableau suivant :

Seuil de dérivation de l'ancien moulin de Xeuilley			
	Cote amont du seuil (m)	Cote aval du seuil (m)	Hauteur de chute (m)
Q10	225,87	225,64	0,23
Q30	226,23	226,05	0,18
Q100	226,60	226,45	0,15
Seuil de prise de l'ancien moulin de Xeuilley			
	Cote amont du seuil (m)	Cote aval du seuil (m)	Hauteur de chute (m)
Q10	225,83	225,82	0,01
Q30	226,17	226,16	0,01
Q100	226,53	226,52	0,01

Tableau 14 : Hauteurs de chute en crue sur les deux seuils de l'ancien moulin de Xeuilley

5.1.2. L'Attenaye

Le contexte hydraulique dans la commune de Xeuilley comprend également le ruisseau de l'Attenaye. Il s'écoule le long des habitations au sud de Xeuilley, en longeant notamment le Quartier des Cités (rue sous les Vignes). Ces habitations sont particulièrement vulnérables aux débordements de l'Attenaye. Le modèle

hydraulique permet également de déterminer la capacité d'écoulement de l'Attenaye. Le phénomène de remous du Madon dans le ruisseau étant possible au niveau de leur confluence, l'estimation des capacités d'écoulement du ruisseau s'effectue en fonction du débit du Madon.

En faisant l'hypothèse d'une concomitance de la crue de l'Attenaye avec une crue décennale du Madon, les premiers débordements sur le muret en rive gauche du ruisseau seraient observés pour un débit de l'ordre de $12 \text{ m}^3/\text{s}$ (inondations des jardins) et les premières habitations riveraines seraient atteintes pour un débit de $14 \text{ m}^3/\text{s}$ (occurrence inférieure à la décennale).

Lorsque le Madon n'est pas en crue, les débordements du ruisseau atteignent ces habitations pour un débit de crue de $17 \text{ m}^3/\text{s}$ soit une période de retour légèrement inférieure à 10 ans (test réalisé avec un débit du Madon de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondant à son module à la station limnimétrique de Pulligny A5431010 - source Banque Hydro).

L'analyse du contexte local permet d'expliquer la vulnérabilité du Quartier des Cités. Outre la géométrie du lit mineur qui conditionne sa capacité d'écoulement, l'état physique global du ruisseau, assez moyen sur ce tronçon du fait de la proximité directe des habitations (stockage de matériaux sur les berges, possibilité d'embâcles lors d'une crue,...), contribue à aggraver les conditions d'écoulement. Cet état dégradé du cours d'eau a pour conséquence de ralentir les écoulements au droit de zones habitées ce qui augmente la ligne d'eau.

Les ouvrages et infrastructures construits dans ce secteur modifient les écoulements et aggravent la vulnérabilité des habitations. La rue Jacques Callot est construite transversalement au lit majeur du ruisseau. Elle représente alors un obstacle aux écoulements en crue ce qui favorise le stockage en amont dans des zones habitées. Aussi, le ruisseau passe sous la voie ferrée et franchit deux ponts routiers avant la confluence avec le Madon. Ces ouvrages peuvent aggraver les conditions d'écoulement du ruisseau dans la traversée du Quartier des Cités, leur influence sur les niveaux de crue a été analysée.

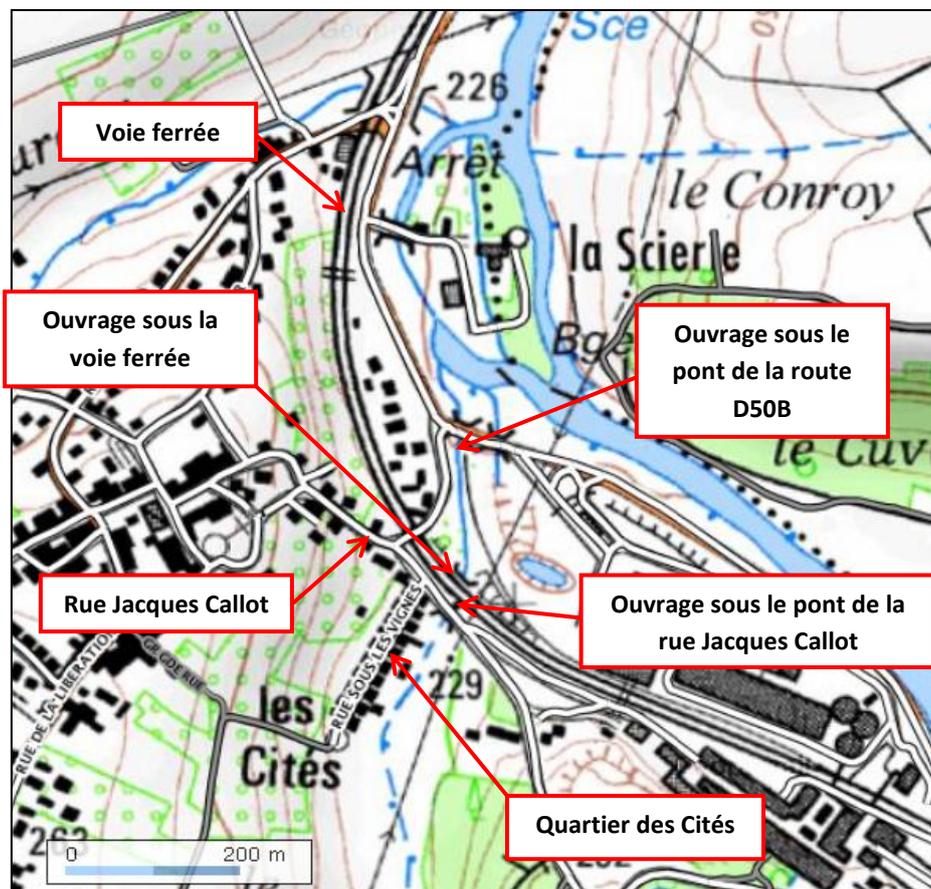


Figure 7 : Localisation des ouvrages de franchissement sur l'Attenaye à Xeuilley (fond cartographique IGN)

Le premier ouvrage est placé sous le pont à l'extrémité de la rue Jacques Callot. Il entre en charge pour une cote amont de 226,49 m. En termes de débit, toujours avec l'hypothèse d'une crue décennale du Madon, il subit une mise en charge pour un débit du ruisseau de $13 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce débit correspondrait pratiquement au moment où les débordements du ruisseau atteignent les premiers enjeux en rive gauche lors d'une crue. L'ouvrage ne permet donc pas un transit suffisant des écoulements de crue et participe à l'augmentation des niveaux de crue en amont en cas de mise en charge.



Figure 8 : Ruisseau de l'Attenaye vu depuis le pont de la rue Jacques Callot (Xeuilley, 54990, Meurthe-et-Moselle, France, auteur : Samuel DEHAN, février 2011)

Le deuxième ouvrage, plus en aval, est situé sous la route de Pierreville D50B. Il entre en charge pour une cote amont de 227,12 m. Son dimensionnement permet une capacité d'écoulement satisfaisante. Avec l'hypothèse d'une crue décennale du Madon, l'ouvrage entre en charge pour un débit de l'Attenaye de $24 \text{ m}^3/\text{s}$, soit légèrement inférieur à une crue centennale du ruisseau.

5.2. Diagnostic hydraulique entre Xeuilley et Bainville-sur-Madon

Entre les communes de Xeuilley et Bainville-sur-Madon, l'extension latérale de la plaine inondable du Madon est toujours assez restreinte compte-tenu de la présence de la voie ferrée en rive gauche et de l'augmentation rapide de la pente du terrain naturel perpendiculairement à la rive droite. Mais le seul enjeu présent sur ce tronçon est le restaurant du Moulin (lieu-dit « Neuf-Moulin ») environ 50 m en aval de Xeuilley.

Le restaurant du Moulin est susceptible d'être inondé pour des crues de période de retour assez faible (environ 5 ans). Les hauteurs de submersion sont conséquentes : 1 m à 1,5 m dans le cas d'une crue centennale. Le seuil construit en travers du Madon au droit du restaurant du Moulin ne présente pas une hauteur de chute importante en crue (moins de 10 cm pour les trois occurrences de crue étudiées). Par contre, le pont situé en aval immédiat du restaurant du Moulin (route D50A) crée une perte de charge importante, notamment pour la crue centennale.

Un second pont est construit environ 500 mètres en amont de Bainville-sur-Madon (route D331) Il ne crée pas une perte de charge importante (moins de 10 cm pour la crue centennale). L'échangeur RD50–RD331 relié à ce pont est construit sur un remblai coupant transversalement le lit majeur en rive gauche du Madon. Il ne semble pas avoir un impact significatif sur les niveaux de crue en amont, augmentant uniquement de façon localisée l'expansion latérale de la zone inondable (aucun enjeu présent).

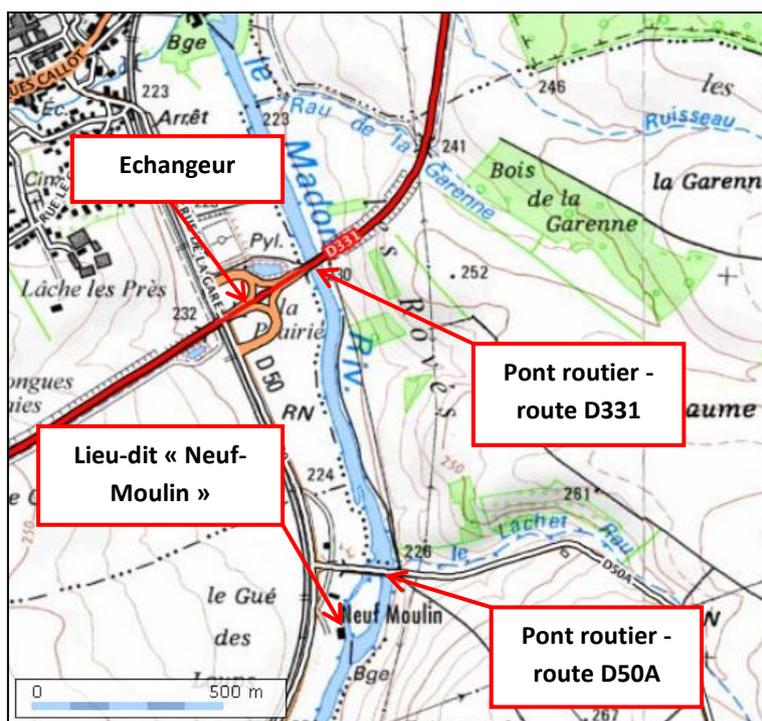


Figure 9 : Localisation des ouvrages routiers entre Xeuilley et Bainville-sur-Madon (fond cartographique IGN)

5.3. Diagnostic hydraulique sur Bainville-sur-Madon

La carte en *annexe 10* synthétise les éléments d'analyse présentés ici concernant les mécanismes de débordement et de propagation des crues dans la commune de Bainville-sur-Madon.

5.3.1. Le Madon

Tout comme dans le cas de la commune de Xeuilley, la plaine inondable du Madon dans la traversée de Bainville-sur-Madon est très étroite en rive gauche et occupée par diverses infrastructures. Plus précisément, l'expansion des crues est limitée en rive gauche par la voie ferrée qui traverse la ville.

Plus en aval, la commune est aussi traversée d'Ouest en Est par le ruisseau du Viterne, dont l'état physique est médiocre. Le tronçon de cours d'eau situé en agglomération comporte deux passages busés sous la rue de la Gare et sous la voie ferrée. Le ruisseau passe ensuite sous un pont comportant deux arches (sous le Chemin du Moulin) pour rejoindre le canal d'alimentation de l'ancien moulin avant la confluence avec le Madon par le seuil fixe maçonné.



Figure 10 : Seuil fixe maçonné à la confluence Madon-Viterne (Bainville-sur-Madon, 54550, Meurthe-et-Moselle, France, photographie personnelle, mars 2012)

Les simulations numériques montrent que ce seuil serait noyé dès une crue décennale. Les hauteurs de chute amont-aval sont les suivantes :

Seuil à la confluence Viterne-Madon à Bainville-sur-Madon			
	Cote amont du seuil (m)	Cote aval du seuil (m)	Hauteur de chute (m)
Q10	222,06	222,01	0,05
Q30	222,44	222,41	0,03
Q100	222,79	222,77	0,02

Tableau 15 : Hauteurs de chute en crue sur le seuil à la confluence Viterne-Madon

Les bâtiments de l'ancien moulin de Bainville-sur-Madon, maintenant habités de façon permanente, sont particulièrement vulnérables aux inondations (hauteur de submersion maximale d'environ 2 m pour la crue centennale). Situés au milieu du champ d'expansion de crue du Madon, ils sont atteints par des crues du cours d'eau d'occurrence inférieure à 2 ans.

De façon globale, les écoulements débordants du Madon sont limités en rive gauche par le remblai de la voie ferrée. **Le niveau d'eau du Madon atteint la crête du remblai de la voie ferrée pour un débit en amont du modèle de 210 m³/s, ce qui correspond à une période de retour de 5 ans. Pour un débit supérieur à cette valeur, les habitations en arrière de la voie ferrée sont exposées aux débordements du Madon par submersion de la voie ferrée.** Dans le cas d'une crue centennale, les hauteurs de submersion sont importantes en arrière de la voie ferrée et peuvent atteindre 1,50 m dans certaines habitations.

Néanmoins, pour des crues de période de retour plus faible n'atteignant pas la crête de la voie ferrée, les écoulements débordants peuvent transiter à travers l'ouvrage de franchissement sous la voie ferrée au niveau d'une ancienne annexe hydraulique.

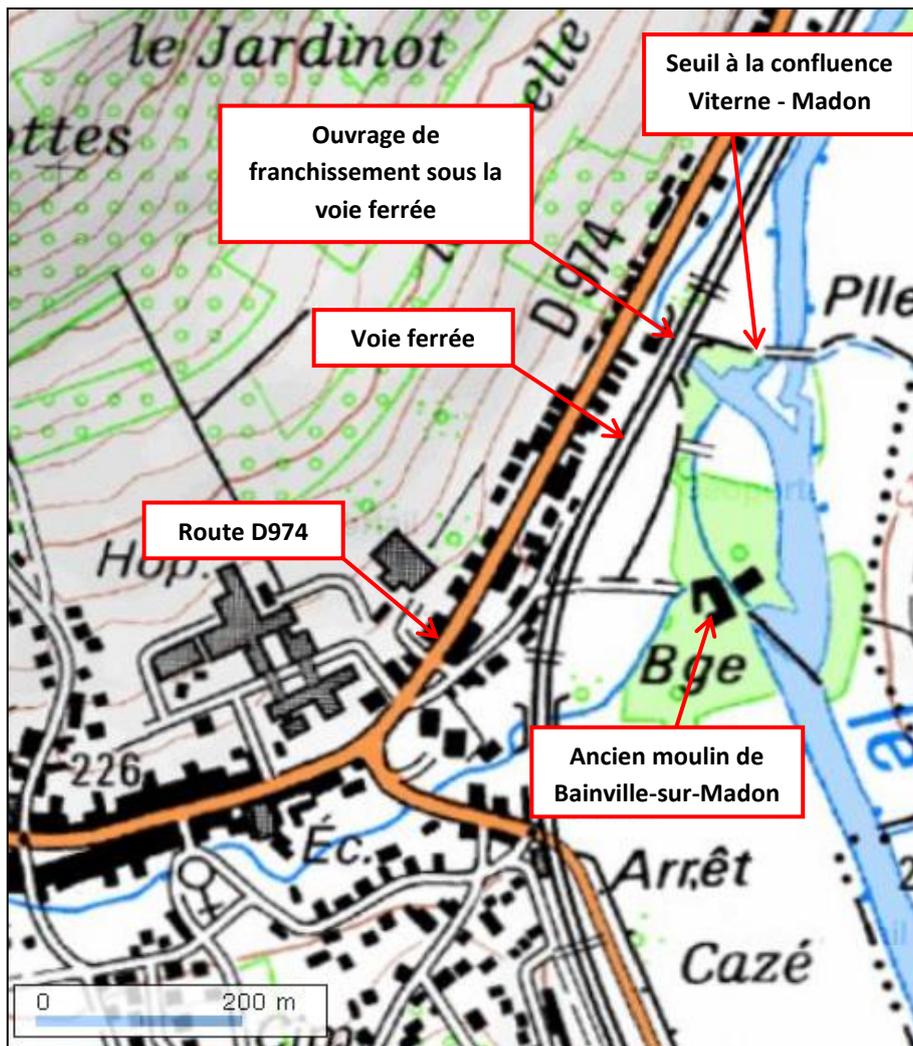


Figure 11 : Localisation de l'ouvrage de franchissement sous la voie ferrée à Bainville-sur-Madon (fond cartographique IGN)

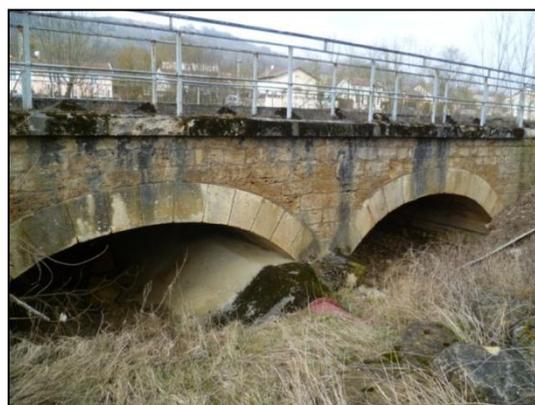


Figure 12 : Ouvrages sous la voie ferrée (Bainville-sur-Madon, 54550, Meurthe-et-Moselle, France, photographie personnelle, mars 2012)

La zone située entre la voie ferrée et la rue Jacques Callot (RD974) peut donc être atteinte sans qu'il y ait débordement du Madon par-dessus la voie ferrée. Cette zone représente une poche de stockage relativement important en cas de crue, les écoulements pouvant se propager jusqu'au niveau du remblai de la route D331D situé plus au Nord. Les habitations situées au Sud de l'ouvrage de franchissement ne seraient pas vraiment

concernées par ces écoulements, ceux-ci se dirigeant plutôt vers le Nord après passage sous la voie ferrée. Les premières habitations sont atteintes pour un débit du Madon ayant une période de retour de 2 à 5 ans.



Figure 13 : Inondation des habitations en arrière de la voie ferrée lors de la crue de 2006 (Bainville-sur-Madon, 54550, Meurthe-et-Moselle, France, photographie CCMM, 4 octobre 2006)

5.3.2. Le Viterne

Comme montré précédemment, des habitations situées entre la rue Jacques Callot (RD974) et la voie ferrée sont donc vulnérables aux débordements du Madon. **Cependant, cette zone à enjeux peut également être atteinte par les débordements du Viterne.**

Le profil en long de la berge rive gauche du ruisseau met en effet en évidence un abaissement de la berge dans la zone située immédiatement en amont de la traversée de la voie ferrée (à partir de l'habitation en bordure du ruisseau en rive gauche : voir *figure 15*). Les débordements en rive gauche du Viterne (entre le pont de la rue de la Gare et l'ouvrage sous la voie ferrée) peuvent remonter vers le Nord en s'écoulant dans la zone située en recul direct du remblai de la voie ferrée. Ces débordements se produisent de façon significative et atteignent les premières habitations riveraines dès que le niveau d'eau du ruisseau atteint 222,15 m au niveau du point bas sur le profil en long de la berge rive gauche. Par ailleurs, les premiers débordements sur la berge se produisent à partir de la cote de 221,40 m environ.

L'estimation des capacités d'écoulement du Viterne s'effectue en fonction du débit du Madon (condition aval du ruisseau). En effet, le phénomène de remous du Madon dans le ruisseau est possible au niveau de leur confluence. L'exploitation du modèle hydraulique permet alors de déterminer les débits de débordement du Viterne selon le débit du Madon considéré. Une carte de synthèse des mécanismes de débordement du Viterne est présentée en *figure 15* à la fin de cette partie.

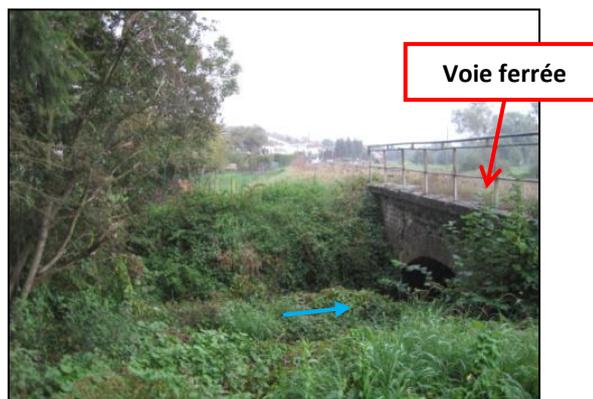


Figure 14 : Ruisseau du Viterne en amont de la voie ferrée (Bainville-sur-Madon, 54550, Meurthe-et-Moselle, France, auteur : Pierre-Etienne SCHNEEGANS, septembre 2010)

Crue du Madon

Le débordement du Madon par-dessus la voie ferrée se produit lorsque le niveau de crue du cours d'eau dépasse la cote de 222,60 m au niveau de la confluence avec le Viterne. Les débordements du Madon atteignent cette cote et inondent les habitations en arrière de la voie ferrée, le long de la rue de la Filature, pour un débit supérieur à 210 m³/s (période de retour estimée : 5 ans).

De plus, la simulation d'une crue du Madon avec un débit très faible en entrée du Viterne (2 m³/s) montre que, même lorsque le Madon ne déborde pas par-dessus le remblai de la voie ferrée, les habitations en arrière de celle-ci peuvent être impactées du fait du remous du Madon faisant déborder le Viterne en rive gauche. Ainsi, le niveau dans le ruisseau atteint la cote de 222,15 m immédiatement en arrière de la voie ferrée avec un débit du Madon de 190 m³/s.

Crue du Viterne

Le Viterne peut également déborder lorsque le Madon n'est pas en crue. Une simulation numérique a été réalisée en considérant un débit du Madon de 10 m³/s correspondant à son module à la station de Pulligny A5431010 (source Banque Hydro). Les débordements en rive gauche du Viterne atteignent les premières habitations en rive gauche pour un débit de 14 m³/s. Ce débit a une période de retour de l'ordre de 5 ans.

Un dernier test a été réalisé pour un débit du Madon en amont de 210 m³/s (juste avant atteinte de la crête du remblai de la voie ferrée) et pour un débit d'occurrence centennale sur le ruisseau du Viterne (22 m³/s). Les résultats de la simulation montrent qu'un débit de l'ordre de 7 m³/s transiterait vers le Nord le long de la voie ferrée et la rue de la Filature. Plusieurs habitations seraient alors inondées par les débordements en rive gauche du Viterne, les hauteurs de submersion dans certaines habitations pouvant atteindre 80 cm pour ce scénario.

Synthèse sur les débordements du Viterne dans la traversée de Bainville-sur-Madon

Ainsi, la rive gauche du Viterne est vulnérable aux phénomènes d'inondation pouvant avoir deux origines :

- **un remous du Madon, lorsque le débit de celui-ci dépasse 190 m³/s : dans ce cas, des premiers débordements se produisent au niveau du point bas sur la berge immédiatement en amont de la voie ferrée,**
- **un débordement au même endroit, lors d'une crue du Viterne de période de retour de l'ordre de 5 ans.**

Dans les 2 cas, l'inondation de la rive gauche se produit en amont immédiat de la voie ferrée, en aval de l'habitation. Lorsque le débit du Viterne dépasse 17 m³/s, le débordement se généralise sur l'ensemble de la berge rive gauche comprise entre la route D974 et la voie ferrée. Inversement, lorsque le débit du Madon augmente, les débordements se généralisent sur ce site par surverse sur la voie ferrée. Cette zone représente une poche de stockage importante où la décrue peut être longue à s'amorcer.

La carte suivante synthétise l'ensemble des mécanismes de débordement du Viterne dans la zone située en recul de la voie ferrée :

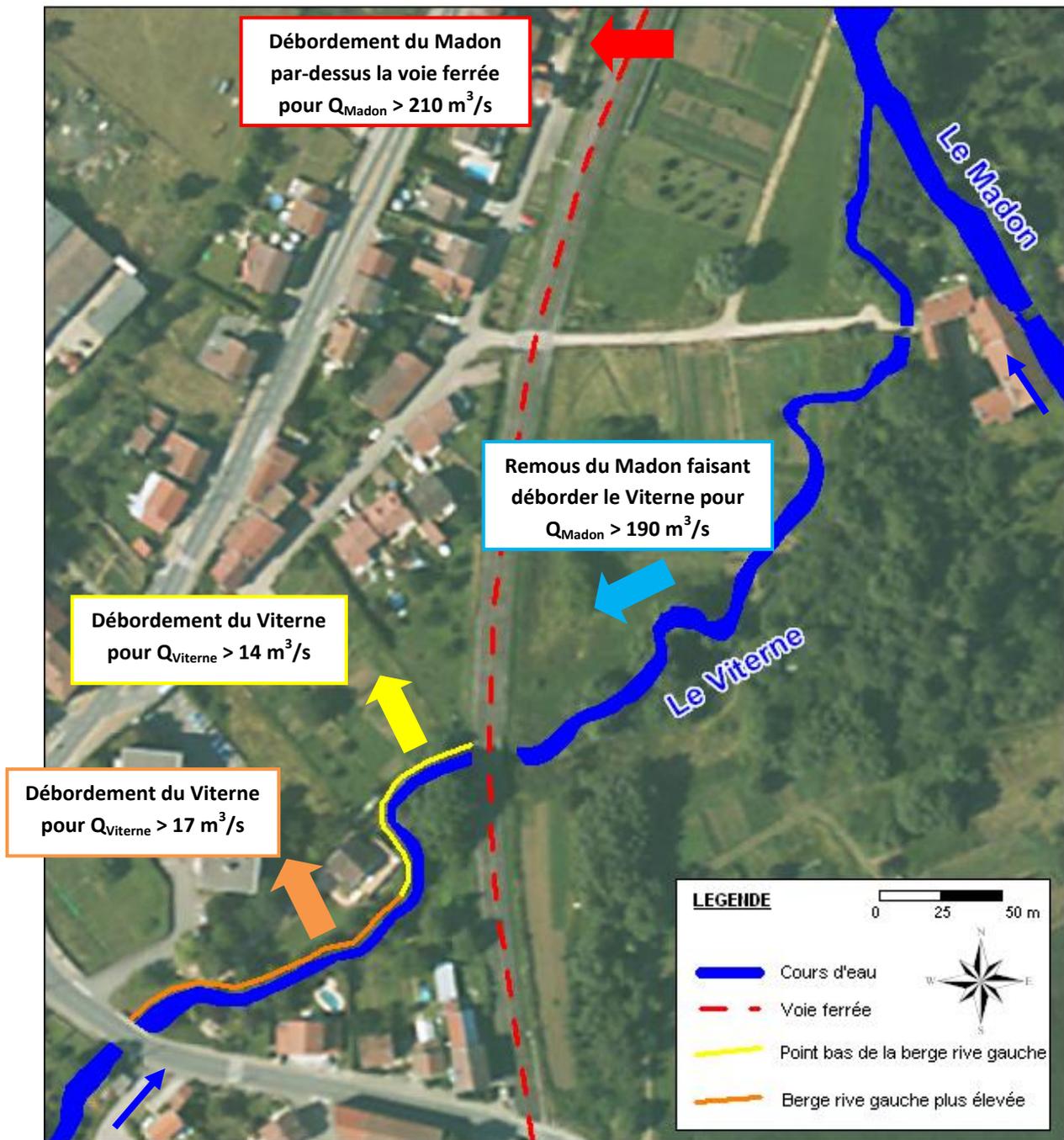


Figure 15 : Carte de synthèse des mécanismes de débordement du Viterne

6. Dispositifs et ouvrages de protection contre les inondations

Cette partie présente le dimensionnement (au stade avant-projet) des aménagements prévus dans le programme d'actions pour assurer la protection contre les crues du Madon et de ses principaux affluents problématiques sur le territoire de la CCMM.

6.1. Mise en place de batardeaux individuels

Dans les communes de Bainville-sur-Madon et Xeuilley, les contraintes d'implantation sur site et l'importance de l'aléa ne permettent pas et ne justifient pas un aménagement de protection collective de l'ensemble des habitations vulnérables aux débordements du Madon et de ses affluents. En particulier, le remblai de la voie ferrée limite considérablement l'emprise au sol disponible à proximité des enjeux à protéger. Dans tous les cas, lorsque l'emprise au sol reste suffisante pour mettre en place un aménagement de protection collective, il s'agit de ne pas aggraver la situation en aval. En effet, le fait d'empêcher localement les débordements dans le lit majeur peut augmenter les volumes de crue en aval de telle façon que les habitations qui y sont installées se retrouvent encore plus touchées par les crues.

Ainsi, la stratégie de protection retenue pour les communes de Xeuilley et Bainville-sur-Madon consiste à mettre en place des batardeaux individuels sur les ouvertures des habitations et bâtiments à protéger. L'inondabilité des zones à enjeux reste alors inchangée par la mise en place des batardeaux, contrairement à un aménagement de protection collective. Seules les habitations touchées par les débordements en rive gauche du ruisseau du Viterne, derrière le remblai de la voie ferrée à Bainville-sur-Madon, pourront être protégées collectivement par un mur anti-crue (de façon partielle car le niveau de protection dépendra de la condition aval du Madon : *cf partie 6.2*).

L'efficacité du dispositif de protection par batardeaux individuels est à la fois dépendante :

- de l'identification des bâtiments soumis à l'aléa inondation pour la crue de référence, qui doit être exhaustive,
- de la procédure de mise en place des batardeaux individuels lorsqu'un événement de crue vient à se produire. La pose des batardeaux doit se faire de façon opérationnelle : suffisamment tôt pour ne pas se laisser surprendre par la montée des eaux et de façon organisée.

6.1.1. Méthodologie

La compréhension des mécanismes de débordements et les résultats des simulations numériques permettent d'identifier les bâtiments et habitations concernés par le risque inondation pour les occurrences de crue décennale, trentennale et centennale.

Les cotes seuil des ouvertures des habitations (portes, fenêtres,...) ont été levées par un géomètre. En comparant ces cotes avec les niveaux de crue, il est possible de déterminer pour chaque enjeu s'il doit être protégé par un dispositif de batardage individuel. Les bâtiments situés en zone inondable mais dont les cotes seuil des ouvertures sont au-dessus de la cote de crue sont retirés de la liste des enjeux exposés. Aussi, les garages accolés aux habitations principales, lorsqu'ils existent, sont pris en compte dans l'identification des enjeux à protéger.

6.1.2. Protection par batardage dans la commune de Xeuilley

Sur le territoire de la commune de Xeuilley, les habitations et bâtiments concernés par la pose de batardeaux individuels sont les enjeux situés entre la route de Pierreville (RD50) et la voie ferrée, les bâtiments de l'ancien

moulin (lieu-dit « La Scierie ») et le restaurant du Moulin. Les habitations du quartier des Cités ne sont pas concernées par la protection par batardeau individuel. Elles sont vulnérables aux débordements du ruisseau de l'Attenaye. La conception d'un dispositif d'écrêtement des crues du ruisseau en amont de la commune permettra d'assurer leur protection (cf partie 6.3). Le tableau suivant présente le nombre de bâtiments concernés par la pose de batardeaux individuels à Xeuilley, pour les trois périodes de retour simulées :

Période de retour	10 ans	30 ans	100 ans
Nombre de bâtiments protégés par batardeaux individuels à Xeuilley	13	13	15
Hauteur de submersion moyenne	0,4 m	0,7 m	0,8 m
Hauteur de submersion maximale	1,0	1,3 m	1,6 m

Tableau 16: Nombre d'habitations et bâtiments concernés par la mise en place de batardeaux à Xeuilley

6.1.3. Protection par batardeau dans la commune de Bainville-sur-Madon

Dans la commune de Bainville-sur-Madon, les habitations situées en arrière de la voie ferrée et les bâtiments habités de l'ancien moulin seront protégés par batardeau des ouvertures contre les crues du Madon (et contre celles du Viterne derrière la voie ferrée). Le nombre de bâtiments protégés par batardeaux individuels à Bainville-sur-Madon selon chaque période de retour est présenté dans ce tableau :

Période de retour	10 ans	30 ans	100 ans
Nombre de bâtiments protégés par batardeaux individuels à Bainville-sur-Madon	29	33	36
Hauteur de submersion moyenne	0,5 m	0,7 m	0,9 m
Hauteur de submersion maximale	1,4	1,7 m	2,1 m

Tableau 17 : Nombre d'habitations et bâtiments concernés par la mise en place de batardeaux à Bainville-sur-Madon

6.2. Mur anti-crue à Bainville-sur-Madon

6.2.1. Principe et justification de l'aménagement

Le diagnostic hydraulique a permis d'expliciter la vulnérabilité des habitations situées entre la voie ferrée et la rue Jacques Callot (RD974). Lorsque le débit du Madon n'est pas suffisamment élevé pour engendrer la submersion de la voie ferrée (inférieur à 210 m³/s en amont de Xeuilley soit une période de retour de 5 ans), ces habitations peuvent tout de même être inondées en cas de crue du ruisseau du Viterne. Les débordements en rive gauche du Viterne (entre le pont de la rue de la Gare et l'ouvrage sous la voie ferrée) peuvent se propager vers le Nord en s'écoulant dans la zone située en recul direct du remblai de la voie ferrée (zone où la berge est plus basse).

Ainsi, un muret positionné sur le linéaire de berge où se produisent les premières inondations permettrait de réduire la vulnérabilité de la rive gauche vis-à-vis des remous du Madon pour les crues courantes et vis-à-vis des crues moyennes du Viterne. L'aménagement diminuerait la fréquence d'installation des batardeaux individuels par les habitants. L'implantation du mur est localisée sur cet extrait de cartographie :

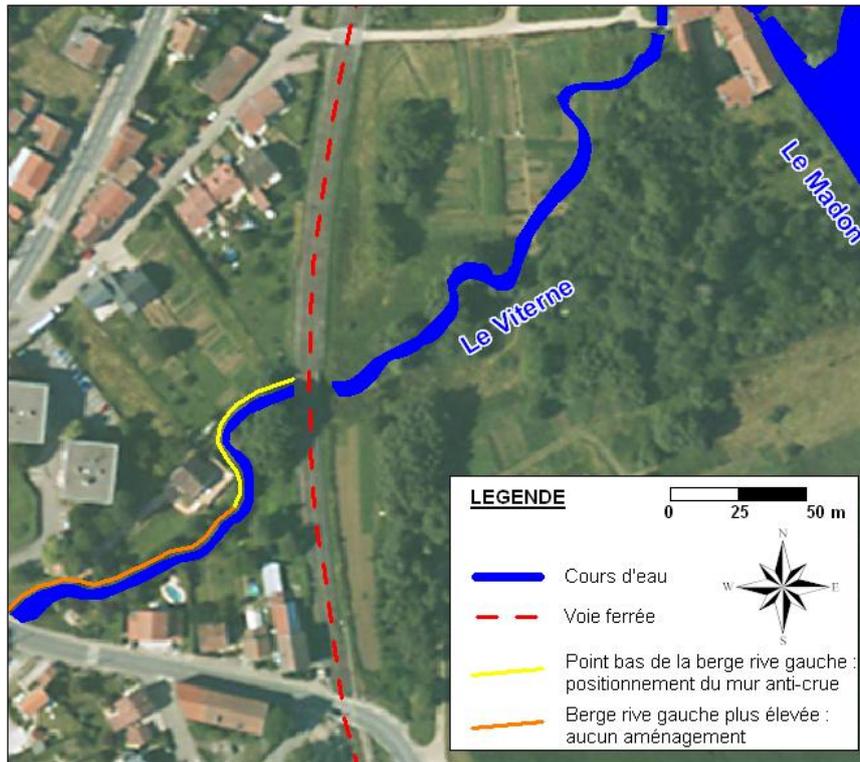


Figure 16 : Localisation du mur anti-crue en rive gauche du Viterne à Bainville-sur-Madon

Ce mur aura pour fonction de protéger les habitations en arrière de la voie ferrée contre les débordements du Viterne en rive gauche amont de la voie ferrée. Cette protection sera assurée tant que la voie ferrée n'est pas submergée par les débordements du Madon. Dans le cas contraire, la mise en place des batardeaux individuels est la seule solution de protection à mettre en œuvre. Vis-à-vis des débordements du Madon, l'inondabilité de cette zone en recul de la voie ferrée reste bien entendu la même avec l'aménagement d'un mur anti-crue.

De plus, le mur anti-crue ne doit pas aggraver la situation actuelle en termes de hauteur de crue, notamment en ce qui concerne les quelques habitations en rive droite du Viterne.

6.2.2. Dimensionnement du mur anti-crue

Afin de ne pas aggraver la vulnérabilité des habitations en rive droite, il faudra s'assurer que l'aménagement d'un mur de protection n'ait pas une incidence significative sur les niveaux de crue en amont du transit du Viterne sous la voie ferrée. En particulier, la transparence de l'ouvrage devra être assurée dans le cas d'une crue centennale du ruisseau.

Dans tous les cas, une hauteur excessivement élevée de l'ouvrage ne se justifie pas. A partir de la cote de 222,60 m au niveau de la zone de confluence avec le Viterne, le Madon aura déjà débordé par-dessus la voie ferrée et atteint les habitations situées en arrière de celles-ci. De plus, la rive gauche du Viterne n'étant plus mobilisée avec le positionnement du mur pour les crues inférieures à la crue de dimensionnement, la conséquence directe d'un mur très haut pourrait être un exhaussement des niveaux d'eau pour les habitations en rive droite à hauteur du mur. Il s'agit donc d'adapter la longueur et la hauteur du mur de façon à ne pas reporter les débordements vers la rive droite de façon excessive.

Afin de ne pas impacter les niveaux d'eau pour ces habitations en rive droite, la cote de crue en amont du transit du Viterne sous la voie ferrée ne devra pas atteindre 223,00 m (cote du seuil le plus bas de toutes les ouvertures des habitations riveraines) pour une crue centennale du ruisseau.

Ainsi, l'ouvrage est calé de la façon suivante. **Le mur serait implanté uniquement sur la partie basse du profil en long de la rive gauche et aurait une longueur de 65 m environ à partir du remblai de la voie ferrée. De**

plus, la cote de crête du mur ne doit pas excéder 222,60 m. Avec ces dimensions, l'ouvrage n'aurait pas d'impact sur les niveaux de crue centennale du ruisseau et n'aggraverait pas la situation pour les habitations présentes en rive droite.

La figure suivante précise l'implantation du mur par rapport au profil en long du Viterne en rive gauche :

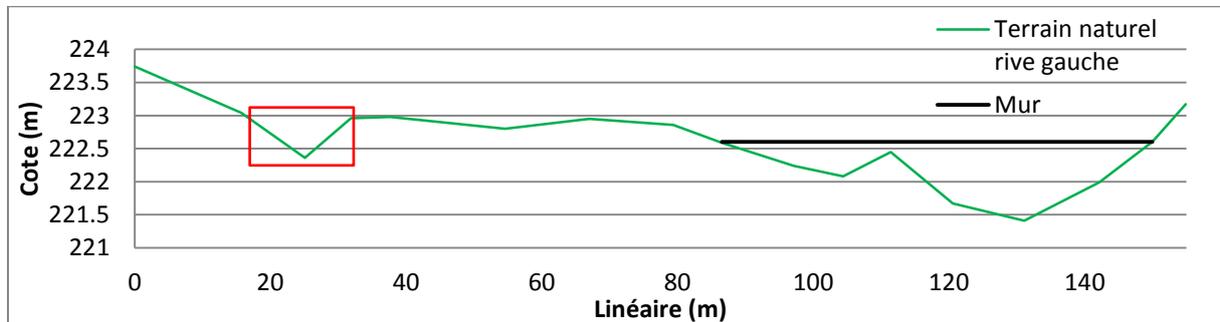


Figure 17 : Profil en long du mur anti-crue à Bainville-sur-Madon

La hauteur maximale du mur est de 1,2 m au point le plus bas de la berge en rive gauche, avec une hauteur moyenne de 0,8 m environ. Des travaux de reprofilage de la berge pourront être réalisés sur le faible linéaire de berge où la cote est légèrement inférieure à 222,60 m (zone repérée en rouge sur le profil en long ci-dessus). Un linéaire de berge d'une quinzaine de mètre est concerné.

6.2.3. Détermination du niveau de protection assuré par le mur anti-crue

Deux scénarii ont été simulés avec le modèle hydraulique afin de déterminer le niveau de protection assuré par ce dimensionnement du mur anti-crue. Le mur a été implanté dans le modèle hydraulique CARIMA, par modification des cotes paramétrant la liaison déversante entre le ruisseau du Viterne et le casier en lit majeur en arrière de la voie ferrée. L'objectif est d'identifier, toujours en fonction du débit du Madon, la valeur limite du débit du Viterne avant surverse par-dessus le mur. Cette valeur limite dépend du niveau d'eau du Madon, qui représente la condition aval pour le Viterne (avec possibilité de remous dans le ruisseau).

- **1er cas : débit du Madon égal au module.**

Le module du Madon est de l'ordre de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ à Pulligny. En considérant ce débit du Madon, il s'agit dans la pratique d'injecter différents débits sur le ruisseau du Viterne afin de déterminer par tâtonnements le débit maximal du ruisseau pour lequel le mur anti-crue protège les habitations en rive gauche.

Ainsi, le niveau d'eau dans le ruisseau du Viterne atteint la cote de 222,60 m (crête du mur) pour un débit dans le ruisseau de l'ordre de $17 \text{ m}^3/\text{s}$. Au-delà de cette valeur, les habitations en arrière de la voie ferrée ne seront plus protégées. Pour ce scénario, le mur anti-crue protégerait donc les habitations en rive gauche pour une **période de retour d'environ 20 ans** (alors que les débordements impactent ces enjeux pour une occurrence de 5 ans dans la situation actuelle).

- **2ème cas : débit maximal du Madon avant débordement par-dessus la voie ferrée.**

Pour un débit de $210 \text{ m}^3/\text{s}$, le niveau du Madon atteint la voie ferrée en aval de la confluence avec le Viterne, et également la crête du mur projeté le long du Viterne. **Le mur protège ainsi contre les crues courantes du Madon (environ 5 ans de période de retour).**

6.2.4. Impact du mur sur les niveaux de crue

La création du mur n'aura pas d'impact sur les crues les plus fortes. Par ailleurs, pour le débit de dimensionnement ($17 \text{ m}^3/\text{s}$ sur le Viterne), la ligne d'eau n'est pas rehaussée (impact inférieur à 1 cm). Au-delà de ce débit, le déversement se généralise sur toute la berge, limitant ainsi fortement l'impact du mur.

Dans le cas d'une crue du Viterne supérieure à la période de retour dimensionnante (20 ans), la surverse s'effectue ainsi sur le mur et sur l'ensemble de la berge amont. La zone en arrière du mur constitue en réalité une cuvette dans laquelle vont se propager les premiers débordements. Aussi, cette zone sera rapidement en eau, limitant ainsi les risques de rupture de l'ouvrage. Pour les crues les plus fortes, l'équilibre des niveaux en amont et en aval du mur est rapidement atteint.

Pour une crue du Madon supérieure à la crue dimensionnante, les débordements s'effectueront sur la voie ferrée et participeront également au remplissage de la zone en arrière du mur, limitant ainsi les risques de rupture et les conséquences d'une éventuelle rupture.

6.3. Ouvrage de sur-inondation en amont de Xeulley

6.3.1. Principe et justification de l'aménagement

Dans la commune de Xeulley, le quartier des Cités est particulièrement vulnérable aux débordements du ruisseau de l'Attenaye. Le ruisseau longe la rue Sous les Vignes avant de rejoindre le Madon. Le remous du Madon dans le ruisseau participe à l'augmentation des niveaux d'eau en crue.

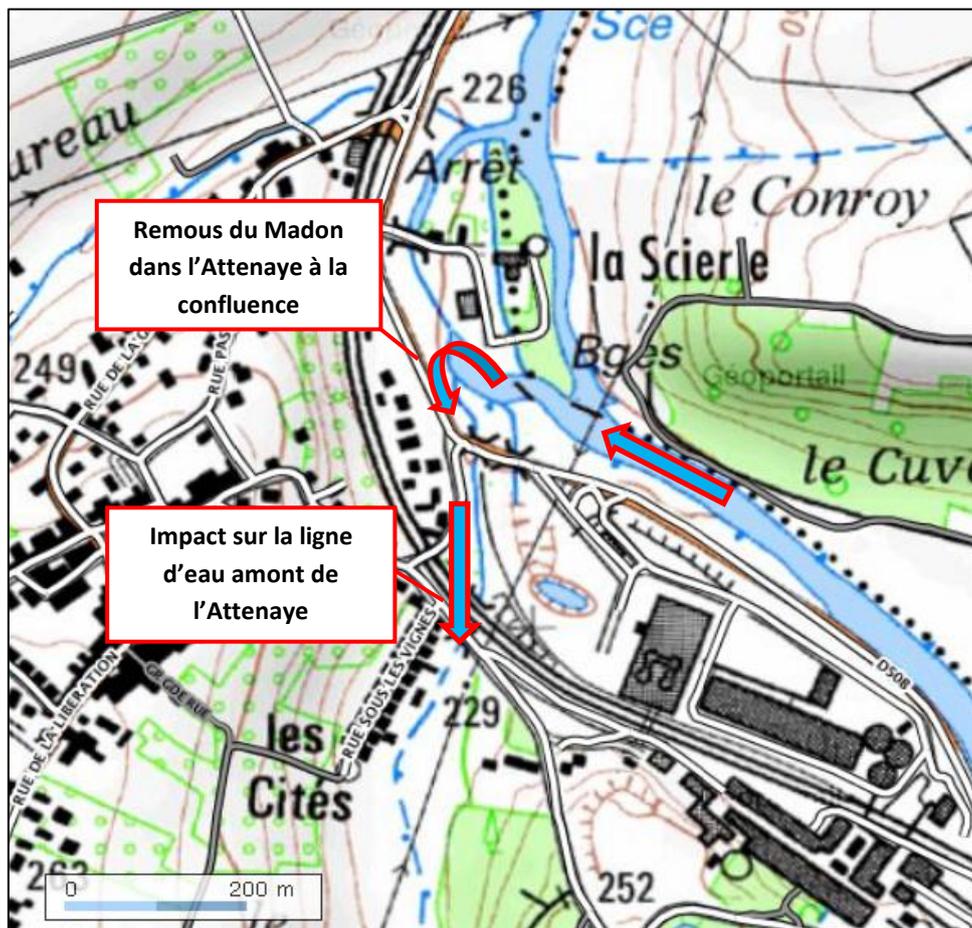


Figure 18 : Localisation du phénomène de remous du Madon dans le ruisseau de l'Attenaye (fond cartographique IGN)

Face à ce risque inondation important, il a été envisagé de réaliser un ouvrage d'écrêtement des crues sur le ruisseau en amont de la traversée de la commune.

Les ouvrages d'écroulement des crues s'inscrivent dans une démarche de ralentissement dynamique de crue, en alliant l'expansion des crues dans le lit majeur et l'écroulement des débits de pointe de crue par le transit dans de petits ouvrages. La solution retenue consiste à construire deux remblais transversaux barrant le lit majeur de part et d'autre du lit mineur. Les ouvrages ne modifient pas le fonctionnement naturel du cours d'eau pour les crues courantes. Pour les crues plus rares, le rétrécissement du lit majeur par les ouvrages transversaux dans le lit majeur du ruisseau augmente la capacité de stockage et de rétention du lit majeur, provoquant ainsi un exhaussement de la ligne d'eau en amont immédiat de l'aménagement. La mobilisation du champ d'expansion de crue est améliorée tout en conservant la même géométrie du lit mineur et le même profil en long. Le fonctionnement est donc assez proche du fonctionnement naturel avant aménagement. (14)

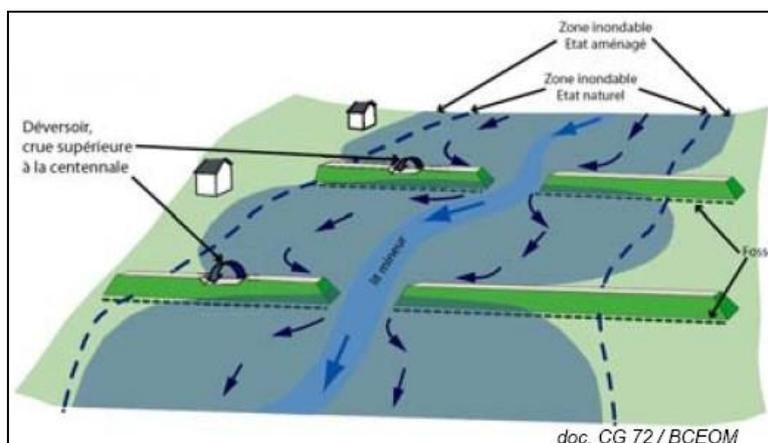


Figure 19 : Principe de fonctionnement de barrages écrêteurs (illustration Conseil Général 72)

L'objectif du dispositif est ainsi la réduction de l'aléa inondation par la rétention d'une partie du volume de la crue en amont de la zone à enjeux (du fait de la mobilisation accrue du champ d'expansion des crues qui permet d'écrouler les débits de pointe). **Ce dispositif est compatible avec l'orientation suivante du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) Rhin-Meuse (15):**

Orientation T5A - O3 : Prévenir l'exposition aux risques d'inondations à l'échelle des districts du Rhin et de la Meuse.

Orientation T5A - O3.1 : Sur les cours d'eau soumis à des inondations, il convient d'identifier des zones de stockage de crues et même, à chaque fois que cela apparaît possible, de reconquérir des zones d'expansion des crues.

La figure suivante illustre ce principe de ralentissement dynamique :

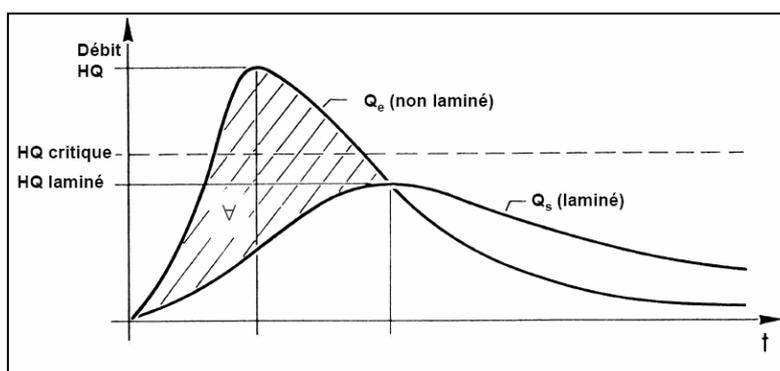


Figure 20 : Schéma de principe de l'influence du ralentissement dynamique sur la propagation des crues (illustration ARTELIA)

L'écêtement de l'onde de crue permet donc l'abaissement des niveaux d'eau en aval immédiat de l'ouvrage. Le volume de crue stocké de façon temporaire est restitué de façon progressive vers la zone aval à la décrue.

Différentes crues de projet sont considérées dans le dimensionnement de l'ouvrage au stade avant-projet (16) :

- La crue de protection est déterminée selon les capacités d'écoulement et les enjeux qui doivent être protégés en aval de l'ouvrage. Néanmoins, l'objectif de protection peut parfois être adapté en fonction des potentialités de rétention (insuffisance de volume disponible pour écêter les crues rares). Pour un débit supérieur à la crue de protection, le déversoir de crue entre en fonctionnement et rend ainsi le dispositif quasi transparent.
- Pour la crue de sécurité, le niveau d'eau dans la retenue atteint le niveau des Plus Hautes Eaux (PHE). Il reste alors une revanche entre la cote des PHE et la crête du remblai, destinée à protéger l'ouvrage de la surverse et du phénomène de batillage. **Le déversoir de sécurité est donc calé sur la cote maximale atteinte à l'intérieur de la retenue pour la crue de protection et dimensionné pour pouvoir assurer l'évacuation de la crue de sécurité.**
- La crue de danger est celle pour laquelle le déversement par-dessus le remblai débute. La revanche est alors nulle.

6.3.2. Choix du site d'implantation

Un site d'implantation de l'ouvrage a été désigné en amont de Xeuilley avant le début du stage de fin d'études. Des levés topographiques ont été réalisés sur ce site, localisé sur l'extrait de cartographie en figure 24.

Le choix de ce site est justifié par la configuration de la vallée, qui semble a priori propice à l'implantation d'un ouvrage de ralentissement dynamique à cet endroit. La zone considérée correspond en effet à un léger resserrement de la vallée et une légère remontée du terrain naturel, permettant ainsi d'envisager la mise en place du barrage. Le site ne présente aucun enjeu humain ou matériel qui empêcherait la submersion temporaire de cette surface. L'aménagement nécessiterait l'acquisition foncière des terrains concernés par l'implantation des remblais transverses. Cependant, la topographie du site resterait inchangée en amont de l'ouvrage (aucun décaissement n'est réalisé pour augmenter le volume de stockage disponible) et l'usage des terrains pourrait rester le même. La fréquence des débordements y serait toutefois légèrement augmentée, de même que les durées de submersion.

Ainsi, les simulations numériques auront pour objectif de vérifier si l'emprise au sol et la topographie du site d'implantation envisagé permet un écêtement suffisant des crues de différentes périodes de retour retenues pour la modélisation.

6.3.3. Loi cote-volume

Pour évaluer la capacité de stockage du site d'implantation retenu initialement, des levés topographiques ont été réalisés afin de déterminer une loi de stockage hauteur-volume. La zone d'implantation potentielle a été levée jusqu'à une cote du terrain naturel de 233,00 m. En réalisant une loi cote-volume correspondant à la topographie du site, le volume de stockage disponible a été estimé à 84 700 m³, en atteignant la cote de 233,00 m. Il ne prend pas en compte le volume d'eau contenu dans le lit mineur du ruisseau sur le tronçon délimité par la zone de stockage.

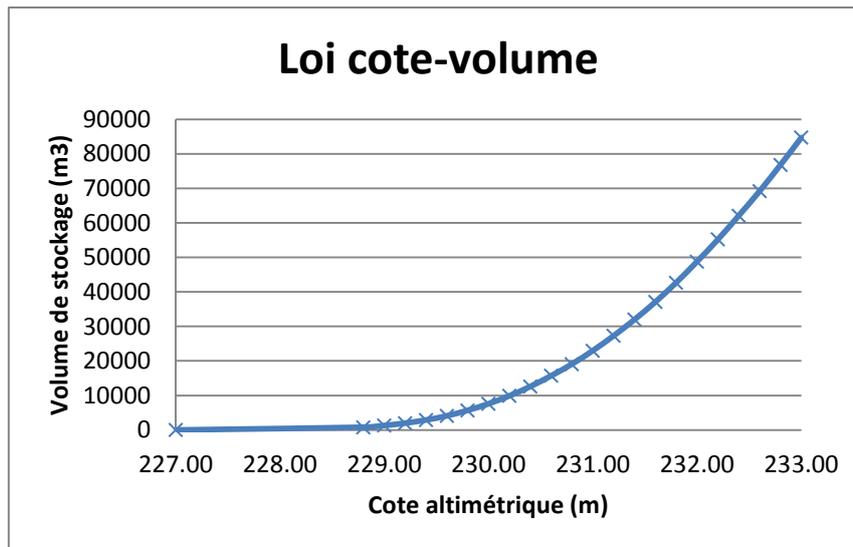


Figure 21 : Loi cote-volume du site de ralentissement dynamique retenu initialement

6.3.4. Modélisation hydrologique

Un modèle de transformation pluie-débit a été mis en œuvre sur le bassin versant de l'Attenaye en utilisant le logiciel PLUTON (développé par SOGREAH). Ce logiciel permet le calcul d'un hydrogramme de crue après traitement statistique et la modélisation de l'écrêtement des débits de crue par l'ouvrage de ralentissement dynamique.

De cette façon, l'hydrogramme de crue sur le bassin versant de l'Attenaye est calculé par le logiciel à partir des valeurs caractéristiques des pluies journalières et des débits de crue modélisées statistiquement pour les périodes de retour considérées (cf *analyse hydrologique préalable*). Les pluies sont simulées en calculant leur intensité à partir de la valeur de la pluie journalière pour la période de retour considérée et de la valeur du paramètre b de la loi de Montana :

$$i = a t^b$$

Sur le secteur étudié, le coefficient b vaut -0,67.

La description du bassin versant dans le modèle pluie-débit est réalisée en renseignant la superficie, la pente, la longueur du drain principal et le coefficient de ruissellement. L'estimation du coefficient de ruissellement est délicate, car ce paramètre dépend à la fois :

- de la nature du sol et des couches géologiques conditionnant l'infiltrabilité lors d'un épisode pluvieux,
- de l'occupation du sol : couverture végétale (forêts, prairies, surfaces agricoles cultivées ou non) et densité des zones urbanisées,
- de l'épisode pluvieux (période de retour),
- de l'état d'humectation antérieur des sols : la saturation des sols est liée aux conditions météorologiques ayant précédé l'épisode pluvieux générant une crue sur le bassin versant.

Le coefficient de ruissellement est supposé constant durant l'ensemble de l'épisode pluvieux. Par contre, il varie en fonction de la période de retour de la crue simulée.

Le modèle pluie-débit est calé en ajustant la valeur du coefficient de ruissellement de telle façon que le débit de crue simulé soit compatible avec les débits estimés dans l'analyse hydrologique préalable. Pour obtenir ces valeurs de débits de crue, le coefficient de ruissellement renseigné est de 0,26 pour une crue de protection

trentennale et de 0,27 pour l'occurrence centennale. Ainsi, les valeurs obtenues sont cohérentes avec l'occupation du sol sur le bassin versant de l'Attenaye, essentiellement constituée de forêts, prairies et terres arables dans des proportions équivalentes :

Occupation du sol	% surface du bassin versant	Coefficient de ruissellement pour un terrain de perméabilité moyenne
Forêt	27,0%	0,1
Végétation basse (herbacée, arbustive)	0,3%	0,15
Prairie	34,6%	0,2
Cultures permanentes	0,0%	0,2
Zones agricoles hétérogènes	0,8%	0,3
Terres arables	34,9%	0,4
Mines, décharges et chantiers	0,1%	0,6
Zones urbanisées	2,3%	0,6

Tableau 18 : Occupation du sol sur le bassin versant de l'Attenaye

Ainsi, le calage du modèle pluie-débit permet également de vérifier d'une certaine façon la cohérence des débits caractéristiques de l'Attenaye, calculés dans l'analyse hydrologique par analogie avec le bassin versant du Brénon.

6.3.5. Objectifs et méthode de dimensionnement de l'ouvrage

L'aménagement doit permettre de diminuer suffisamment les niveaux de crue en aval pour que les habitations du Quartier des Cités ne soient plus en zone inondable. **L'objectif de protection est la limitation du débit de l'Attenaye à 13 m³/s dans la traversée de Xeuilley.** En effet, cette valeur de 13 m³/s correspond à la capacité limite d'écoulement du ruisseau avant atteinte des premières habitations en rive gauche à hauteur du Quartier des Cités. Elle a été déterminée avec le modèle hydraulique du Madon et de ses affluents étudiés ici (modélisation réalisée sous CARIMA). Comme il a été précisé dans le diagnostic hydraulique, ce débit correspond en fait à la valeur limite avant mise en charge de l'ouvrage placé sous la rue Jacques Callot. Sa mise en charge aboutit à un exhaussement rapide de la ligne d'eau en amont du passage du Viterne sous la rue Jacques Callot, avec les conséquences directes sur les habitations du Quartier des Cités.

Deux scénarii ont été simulés avec le modèle de transformation pluie-débit (logiciel PLUTON) pour évaluer dans les deux cas le gain sur le débit de pointe et l'efficacité du dispositif de ralentissement dynamique sur le site de rétention choisi :

- **un scénario avec une crue de protection d'occurrence centennale,**
- **un scénario avec une crue de protection d'occurrence trentennale.**

La topographie disponible permet de simuler un ouvrage avec une hauteur de crête allant jusqu'à 6 m par rapport au fond du lit, soit 4,5 m par rapport à la berge du ruisseau. En effet, les levés topographiques de la zone de rétention ont été réalisés jusqu'à la cote de 233,00 m.

Considérant une hauteur maximale de 6 m et un volume de 85 000 m³ environ, **le barrage projeté serait réglementairement de classe C au sens du décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques.** (17)

Le déversoir de sécurité ne doit pas fonctionner pour un débit de pointe correspondant à la crue de protection.

Ensuite, ce déversoir devra être capable d'évacuer l'ensemble du débit de la crue de sécurité. Le Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) a émis un certain nombre de recommandations concernant le dimensionnement des barrages et le choix de la période de retour de la crue de sécurité. Ainsi, l'aléa intrinsèque au barrage dépend de la hauteur du barrage et du volume de la retenue. Mais le niveau de risque dépend également de la vulnérabilité de la zone plus en aval. **Pour un barrage en remblai de classe C créant**

une rétention d'eau en amont d'une zone où des enjeux existent et où la sécurité publique est en jeu (ce qui est le cas pour l'ouvrage projeté en amont de Xeuilley), la période de retour de la crue de sécurité ne doit pas être inférieure à 1000 ans. Cette valeur est retenue pour le dimensionnement de l'ouvrage.

Dans la pratique, il s'agit de déterminer dans un premier temps la cote atteinte dans la retenue pour la crue de protection simulée. Le déversoir de sécurité est alors calé à cette cote de telle façon qu'il n'entre pas en fonctionnement pour la crue de protection. La largeur du déversoir est enfin fixée de façon à pouvoir évacuer la crue millénale sous une lame d'eau de 30 cm.

6.3.6. Méthode d'évaluation de l'écrêtement des crues de l'Attenaye

Il reste alors à obtenir les cotes de crue au niveau de la traversée de Xeuilley et du Quartier des Cités après simulation de l'ouvrage d'écrêtement des débits. Le but est de déterminer la pertinence de l'aménagement vis-à-vis de la réduction de l'aléa inondation dans la traversée de Xeuilley.

Pour cela, le modèle hydraulique du Madon et de ses affluents est utilisé. Le débit en aval de la zone de rétention obtenu par le modèle de transformation pluie-débit est injecté dans le modèle CARIMA sur le ruisseau de l'Attenaye. En comparant les cotes obtenues avec et sans dispositif d'écrêtement, l'impact de l'ouvrage sur la vulnérabilité des habitations de la rue sous les Vignes peut alors être identifié de façon immédiate. **Le niveau d'eau dépendant du niveau aval du Madon à la confluence des deux cours d'eau, les tests ont été réalisés avec l'hypothèse d'une crue décennale du Madon.**

6.3.7. Résultats des simulations

- **Efficacité du dispositif dimensionné pour la crue centennale**

Dans le cas d'un dimensionnement sur une crue centennale de l'Attenaye, la propagation d'une crue centennale (crue de protection) par l'ouvrage de ralentissement dynamique aboutirait à une réduction du débit de pointe centennial de 26 à 20 m³/s. L'efficacité de l'ouvrage serait alors insuffisante pour permettre une diminution significative des niveaux d'eau du ruisseau le long de la Rue sous les Vignes (réduction du débit à 13 m³/s). L'enveloppe de la zone inondable se rapprocherait celle de la crue trentennale du ruisseau (22 m³/s). Plus précisément, sept habitations situées en partie basse de la rue (soit au plus près du ruisseau) resteraient vulnérables aux débordements de l'Attenaye dans le cas d'une crue centennale de celui-ci.

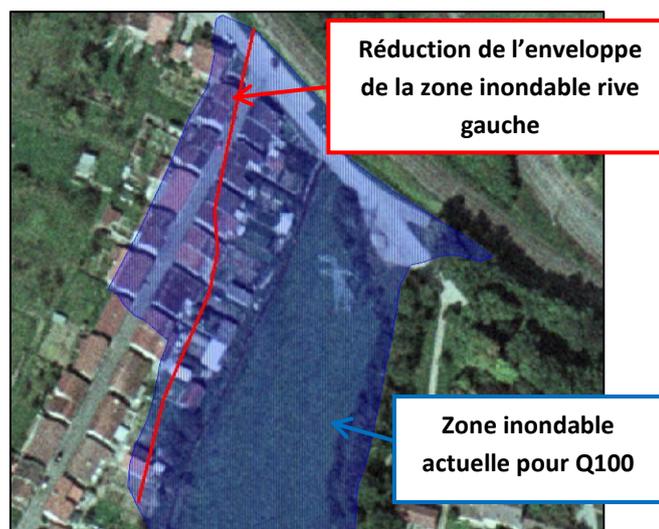


Figure 22 : Réduction de la zone inondable à hauteur du Quartier des Cités avec un dispositif dimensionné pour la crue centennale

- **Efficacité du dispositif dimensionné pour la crue trentennale**

Une autre simulation a été réalisée dans le cas d'un dimensionnement sur une crue trentennale du ruisseau. Cette fois, l'écrêtement des débits par l'ouvrage de sur-inondation aboutit à une valeur de débit de 16 m³/s transitant dans le ruisseau à hauteur du Quartier des Cités (contre 22 m³/s dans la situation actuelle sans aménagement). Ainsi, l'objectif d'écrêtement du débit de pointe du ruisseau pour atteindre le débit de 13 m³/s n'est pas réalisable non plus pour une crue de projet d'occurrence trentennale. Cependant, la diminution du débit et des niveaux d'eau est tout de même significative, et seules deux habitations seraient situées dans la zone inondable du ruisseau pour cette occurrence de crue (en contre-bas du croisement de la rue sous les Vignes et de la rue de la Cimenterie).

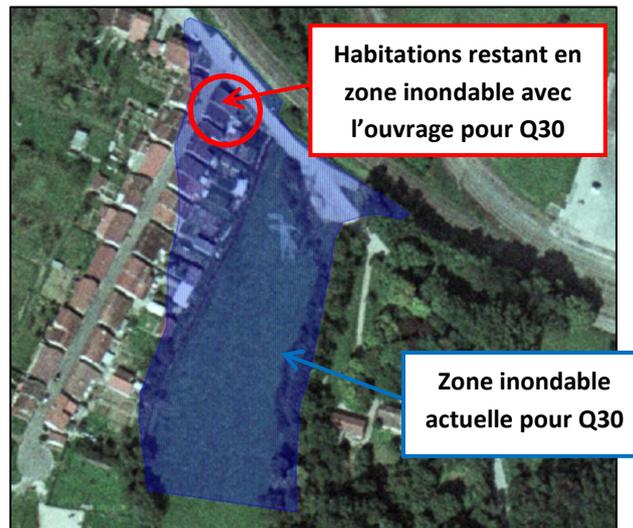


Figure 23 : Réduction de la zone inondable à hauteur du Quartier des Cités avec un dispositif dimensionné pour la crue trentennale

- **Synthèse**

Le dimensionnement de l'ouvrage à l'aide du logiciel PLUTON a abouti aux éléments suivants :

	Dimensionnement T = 30 ans	Dimensionnement T = 100 ans
Débit entrant (m ³ /s)	Q30=22 m ³ /s	Q100=26 m ³ /s
Cote de fond (m)	227,00	227,00
Cote max. dans la retenue pour la crue de protection (m)	232,55	232,70
Section de l'orifice modélisé	1m*1,9m	1m*2,4m
Débit de fuite (m ³ /s)	15,7	20,1
Cote déversoir (m)	232,60	232,70
Hauteur déversoir (m)	5,60	5,70
Largeur déversoir (m)	50	50
Cote max. dans la retenue pour la crue Q1000 (m)	232,92	232,97
Hauteur de l'ouvrage (m)	5,92	5,97

Tableau 19 : Eléments de dimensionnement de l'ouvrage écrêteur sur le ruisseau de l'Attenaye

La réalisation d'un ouvrage de 6 m de haut (par rapport au fond du lit mineur) sur le secteur d'implantation retenu semble d'ores-et-déjà insuffisante pour assurer la protection des habitations en aval de façon sécurisée pour des objectifs de protection de 30 ou 100 ans.

Le site retenu pourrait éventuellement permettre d'atteindre l'objectif d'écrêtement en augmentant la hauteur du barrage (la topographie disponible ne permettant pas le calcul). Mais dans tous les cas, la réalisation d'un ouvrage ayant une hauteur encore plus élevée semble peu pertinente du point de vue de son intégration paysagère et de la présence d'enjeux relativement proches en aval.

6.3.8. Synthèse et perspectives concernant l'étude de faisabilité d'un ouvrage de ralentissement dynamique

Les calculs réalisés ont permis de mettre en évidence les insuffisances du site de rétention retenu initialement en termes de capacité de stockage, ceci malgré une hauteur d'ouvrage tout de même importante (6 m par rapport au fond du lit mineur) dont l'intégration paysagère semble d'ores-et-déjà difficile. L'écrêtement des crues de protection simulées en amont de la commune est insuffisant pour qu'aucune habitation du Quartier des Cités ne soit exposée aux débordements de l'Attenaye pour des périodes de retour de 30 et 100 ans.

Néanmoins, le dispositif étudié ici pourrait être complété par une seconde zone de rétention plus en amont afin d'optimiser la capacité de stockage globale en amont de la commune de Xeuilley. L'aménagement d'un second ouvrage en amont de l'unique site prévu initialement permettrait également de diminuer la hauteur des ouvrages et améliorer de cette façon leur intégration paysagère et de diminuer les dangers qu'ils génèrent (risque de rupture).

Les visites de terrain et l'analyse des courbes de niveau ont permis d'identifier deux autres sites potentiels en amont du premier site projeté. *Ces sites sont localisés sur la carte en page suivante.*

L'opportunité de réaliser un autre ouvrage de sur-inondation sur un de ces sites dépendra de leur capacité de stockage. Des levés topographiques supplémentaires seront donc nécessaires dans la suite qui sera donnée à cette étude.

Enfin, ces sites sont situés immédiatement en aval de la confluence de plusieurs ruisseaux (ruisseau d'Attigny, ruisseau de Lavaux et ruisseau des Grandes Côtes). Il ne semble pas pertinent de réaliser un aménagement encore plus en amont :

- L'écrêtement ne serait pas optimal puisqu'il mobiliserait les apports d'un seul des ruisseaux, ce qui ne représenterait pas une part suffisante du débit de l'Attenaye dans la traversée de Xeuilley.
- La distance par rapport à la source de chacun des ruisseaux ne serait plus très importante, la superficie du bassin intercepté étant trop réduite pour assurer une efficacité du dispositif sur l'écrêtement des crues exceptionnelles.
- Les courbes de niveau sur le secteur montrent un resserrement marqué du fond de la vallée sur ces ruisseaux, la zone de stockage ne serait donc pas très étendue latéralement et le volume de rétention serait donc d'autant plus faible.

La suite qui sera donnée à cette étude particulière sera définie en concertation avec les services techniques de la CCMM. Il s'agira alors de modéliser le ou les ouvrages de ralentissement dynamique supplémentaires avec le logiciel PLUTON afin de définir le niveau de protection résultant.

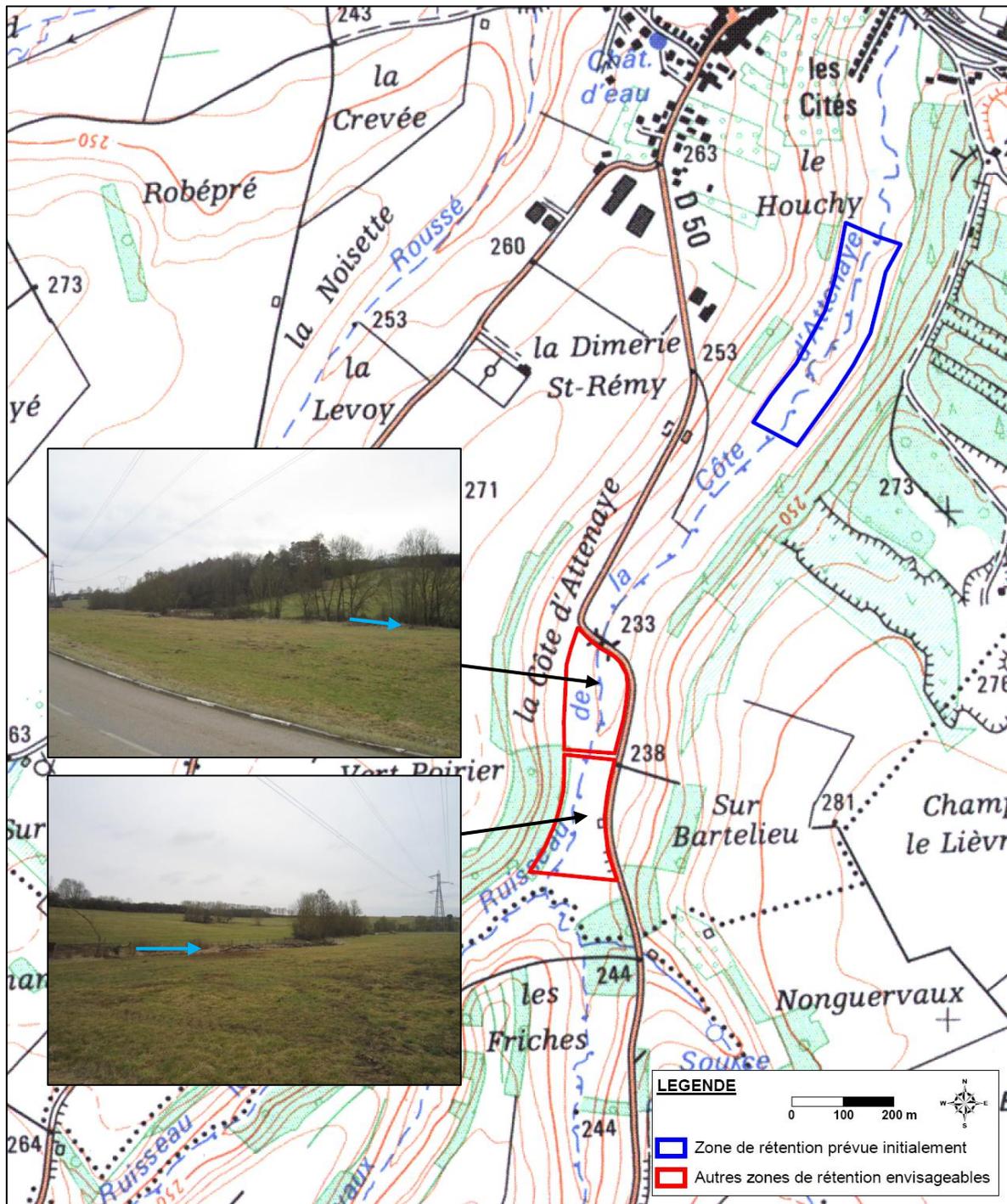


Figure 24 : Carte de localisation des sites potentiels de rétention en amont de la commune de Xeuilley (Xeuilley, 54990, Meurthe-et-Moselle, France, photographies personnelles, mars 2012)

Conclusion

Le territoire de la Communauté de Communes Moselle & Madon a connu des inondations importantes ayant généré des dégâts conséquents dans les habitations. Le bureau d'études ARTELIA a ainsi été mandaté par la CCMM pour réaliser une mission de maîtrise d'œuvre complète visant à élaborer un projet de lutte contre les inondations sur ce territoire.

Le travail de mon stage a consisté plus particulièrement à réaliser lors d'une première phase un diagnostic hydraulique du risque inondation sur les communes concernées par les débordements du Madon et de ses affluents principaux. Basé sur une étude hydrologique préalable ayant permis la détermination des débits caractéristiques de crue, ce diagnostic a montré la capacité d'écoulement globalement insuffisante du Madon et de ses affluents sur le secteur d'étude, aggravée par le dimensionnement insuffisant de plusieurs ouvrages de franchissement (ponts,...). La vulnérabilité des habitations exposées s'explique également dans certains cas par leur localisation au milieu du champ d'expansion de crue des cours d'eau concernés. Le modèle numérique des écoulements du Madon et des ruisseaux de l'Attenaye et du Viterne, réalisé dans le cadre de ce diagnostic, a permis de montrer qu'un certain nombre d'habitations seraient touchées par les débordements de crue relativement « courantes » : d'une occurrence de moins de deux ans pour les anciens moulins sur le Madon (bâtiments désormais habités) et dans tous les cas moins de dix ans. Ainsi, la crue du Madon en octobre 2006, ayant généré des dégâts conséquents sur le territoire de la CCMM, aurait une période de retour de 10 ans sur la partie aval du bassin versant du Madon.

La seconde phase du stage a été consacrée aux aménagements et dispositifs de protection contre les inondations causées par le Madon et ses affluents. Un programme d'actions décrivant les stratégies d'aménagement du territoire visant à réduire le risque inondation avait été élaboré par ARTELIA avant le début de mon stage et validé par les services techniques de la CCMM.

- Les habitations exposées aux débordements du Madon ne pourront pas être protégées par un dispositif de protection collective, notamment du fait des contraintes d'implantation fortes sur un tel secteur urbanisé. La solution retenue est la pose de batardeaux individuels sur les ouvertures des bâtiments. Les résultats des simulations numériques (niveaux de crue) ont permis d'identifier les bâtiments concernés (15 à Xeuilley et 36 à Bainville-sur-Madon).
- Un mur anti-crue en rive gauche du ruisseau du Viterne pourra être réalisé sur un secteur particulièrement vulnérable à ses débordements du fait d'un abaissement localisé de la berge. Sur une longueur de 65 m, l'ouvrage protégerait les habitations en recul de la voie ferrée contre les débordements du Viterne pour une période de retour de l'ordre de 20 ans et contre le phénomène de remous du Madon dans le ruisseau jusqu'à une période de retour de 5 ans.
- Il est envisagé de mettre en place un dispositif d'écrêtement des débits de crue du ruisseau de l'Attenaye en amont de la traversée de Xeuilley afin de protéger une vingtaine d'habitations en rive gauche de façon collective et sans mise en place de batardeaux individuels. Cependant, le site de rétention identifié initialement (en concertation avec les services techniques de la CCMM) ne présente pas une capacité de stockage suffisante pour protéger l'ensemble des habitations en aval contre une crue trentennale. Afin de poursuivre cette étude, il sera nécessaire de réaliser des levés topographiques sur d'autres sites potentiels de rétention plus en amont afin de vérifier si la combinaison de plusieurs sites de ralentissement dynamique permettrait la protection contre une crue centennale de l'Attenaye de tous les enjeux exposés en aval.

Après mon stage et dans la suite qui sera donnée à cette mission de maîtrise d'œuvre, il s'agira notamment de :

- poursuivre l'étude de faisabilité d'un ouvrage de ralentissement dynamique en amont de Xeuilley une fois les données topographiques obtenues,
- réaliser une analyse hydromorphologique approfondie afin d'étudier le devenir de certains seuils fixes maçonnés fortement dégradés sur le Madon et le Viterne et proposer des possibilités d'aménagements sur ces ouvrages,
- fixer l'objectif de protection définitif contre les crues des cours d'eau sur le secteur étudié, en concertation avec les services techniques de la CCMM. Pour cela, une fois tous les aménagements dimensionnés au stade avant-projet, une analyse coûts-bénéfices réalisée à l'échelle globale du territoire de la CCMM permettra de justifier la pertinence financière du projet retenu.

Enfin, d'un point de vue personnel, ce stage a été l'occasion de travailler au sein d'un bureau d'études. Durant ces six mois de stage, mon intégration à l'équipe d'ingénieurs et de techniciens du pôle hydraulique fluviale m'a permis une mise en situation professionnelle enrichissante à plusieurs points de vue. En particulier, j'ai pu développer mes compétences techniques et ma capacité à m'adapter à de nouvelles méthodes de travail. J'ai également eu l'occasion de réaliser des travaux qui m'ont montré d'autres aspects du travail en bureau d'études (participation à la rédaction d'un dossier d'autorisation d'un projet au titre de la Loi sur l'Eau, réponses à des appels d'offres).

Bibliographie

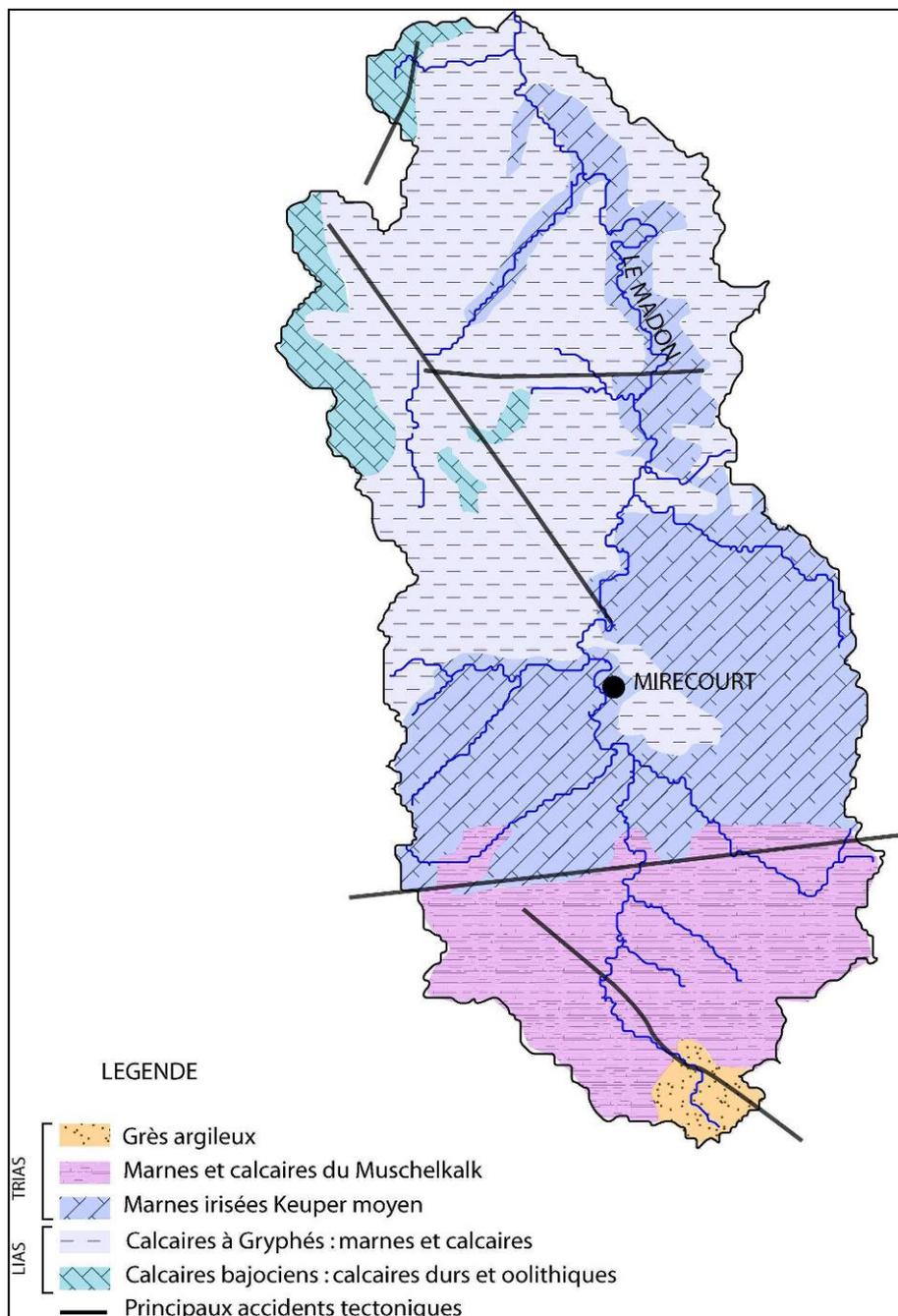
1. **Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie.** Prévention des risques - Le risque inondation. *MEDDE*. [En ligne] 2011. [Citation : 20 01 2012.] <<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-risque-inondation.html>>.
2. **Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.** Les inondations - Dossier d'information. *Catalogue numérique Prim.net*. [En ligne] 2004. [Citation : 20 01 2012.] <http://catalogue.prim.net/49_les-inondations---dossier-d-information.html>.
3. **PROUST, S.** *Hydraulique des crues et des écoulements débordants*. [éd.] ENGEES (support de cours). 2010. 88 pages.
4. **Bureau d'études GINGER.** *Expertise hydrologique sur le Madon*. 2007.
5. **SOGREAH Consultants.** *Etude hydraulique - Vérification de l'impact de la déviation de Mirecourt (RD 166) sur la zone inondable du Madon*. 2010.
6. **Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement.** Programmes d'action de prévention des inondations (PAPI) : de la stratégie aux programmes d'action : cahier des charges. *Catalogue numérique Prim.net*. [En ligne] 2011. [Citation : 01 Avril 2012.] <http://catalogue.prim.net/165_programmes-d-action-de-prevention-des-inondations-papi-de-la-strategie-aux-programmes-d-action-cahier-des-charges.html>.
7. **Bureau d'études GINGER.** *Cartographie des zones inondables de la basse vallée du Madon selon l'approche hydrogéomorphologique*. 2008.
8. **Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement de l'Est.** *Compléments hydrauliques sur le bassin du Madon*. 2009.
9. **LABORDE, J.P.** *Éléments d'hydrologie de surface*. [éd.] ENGEES (support de cours). 2005. 55 pages.
10. **SOGREAH Consultants.** *CARIMA version 4.00 - Manuel de référence technique*. 2003. 63 pages.
11. **SOGREAH Consultants.** *CARIMA version 4.00 - Guide utilisateur*. 2003. 55 pages.
12. **VAZQUEZ, J.** *Hydraulique à surface libre*. [éd.] ENGEES (support de cours). 2009. 104 pages.
13. **SOGREAH Consultants.** *Atlas des Zones Inondables de la Moselle et de la Meurthe*. 2002.
14. **Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.** Le ralentissement dynamique pour la prévention des inondations. [En ligne] 2004. [Citation : 23 Mars 2012.] <www.languedoc-roussillon.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Guide_RD_cle53f737.pdf>.
15. **Comité de bassin Rhin-Meuse.** SDAGE Rhin et Meuse. *Directive Cadre Européenne Eau 2015 Rhin-Meuse*. [En ligne] 2009. [Citation : 5 janvier 2012.] <http://www.eau2015-rhin-meuse.fr/dce/site/medias/_documents/cd_cb_271109/pdf/Tome%2004_Orientations%20fondamentales%20e%20t%20dispositions.pdf>.
16. **ROYET, P.** *Introduction aux barrages*. [éd.] ENGEES (support de cours). 2011. 95 pages.

17. **Gouvernement Français.** Textes législatifs et réglementaires. *Legifrance.gouv.fr*. [En ligne] 11 décembre 2007. [Citation : 19 Mai 2012.]
<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=4BE08FE905D7683B8B3A875AEA9840ED.tpdjo13v_3?cidTexte=JORFTEXT000017641418&dateTexte=20071213>.

ANNEXES

Annexe 1 : Carte de synthèse lithologique du bassin versant du Madon

La carte de synthèse lithologique permet de représenter la nature des roches qui forment une couche géologique. La carte présentée ci-dessous (4) illustre l'opposition des caractéristiques géologiques entre l'amont et l'aval du bassin versant du Madon :



Annexe 2 : Présentation de la méthode SPEED

La méthode SPEED (Système Probabiliste d'Etude par Evénements Discrets) est une méthode probabiliste qui intègre la théorie du Gradex. Elle est basée sur deux analyses réalisées de façon successive :

1. L'analyse régionale des pluies et le traitement des maxima des pluies journalières de chaque année hydrologique

Les maxima des pluies journalières de chaque année hydrologique, comme d'autres phénomènes météorologiques accidentels et rares, suivent une loi de Gumbel. L'ajustement des pluies observées sur un graphique de Gumbel se traduit par une droite définie par Y_0 , le pivot de la distribution et P_{jm} , la valeur moyenne des pluies journalières.

Le pivot est la valeur de la variable de Gumbel pour laquelle la droite d'ajustement de Gumbel coupe l'axe $P_{journalière}=0$. Il est lié au nombre d'événements indépendants d'où sont tirés les maxima annuels, lui-même proportionnel au nombre de perturbations météorologiques sur le secteur étudié. Ainsi, le pivot Y_0 est supposé invariant sur une région donnée, pour des phénomènes météorologiques de même origine.

La majeure partie de la France est soumise aux perturbations océaniques qui traversent le territoire d'Ouest en Est. Les pluies journalières maximales annuelles ont une valeur de pivot comprise entre -3,3 et -3,5 pour ces pluies cycloniques. La partie Sud-Est de la France est à l'abri des flux d'Ouest (à cause du relief des Pyrénées) et est soumise à des pluies plus intenses par le flux d'air chaud et humide remontant de la Méditerranée. Le pivot sur cette zone est de l'ordre de -2,5. Enfin, les pluies d'altitude (Alpes, Hautes-Pyrénées et Massif Central) sont plus fréquentes et ont un pivot de -4,5.

Ce paramètre Y_0 étant connu de façon régionale, la caractérisation des pluies sur le bassin ne dépend plus que de la valeur moyenne des pluies journalières mesurées P_{jm} qui elle peut varier spatialement. Cette méthode permet donc de réduire l'incertitude sur la détermination des pluies, en mettant en évidence certains phénomènes particuliers dus notamment au relief qui modifient la droite d'ajustement des pluies en créant des ruptures de pente de celle-ci (augmentant la valeur de la pluie rare).

2. Le traitement statistique des maxima des débits instantanés mesurés pour chaque année hydrologique, au moyen d'une relation pluie-débit

Les recherches théoriques ont abouti à une formulation compatible avec les théories de l'hydrogramme unitaire et du Gradex, en tenant compte de précipitations réparties en intensité-durée-fréquence par une loi classique de Montana :

$$Q_T = \frac{S^{0.75}}{12} C_0 P_T \quad \text{si } T < T_0$$
$$Q_T = \frac{S^{0.75}}{12} (P_T - P_0) \quad \text{si } T > T_0$$

- Q_T = débit de pointe de crue de période de retour T (années),
- P_T = précipitation journalière ponctuelle de même période T,
- S = superficie du bassin versant, en km^2 ,
- P_0 = seuil probabiliste de ruissellement, en mm,
- C_0 = coefficient de proportionnalité des faibles crues aux pluies.

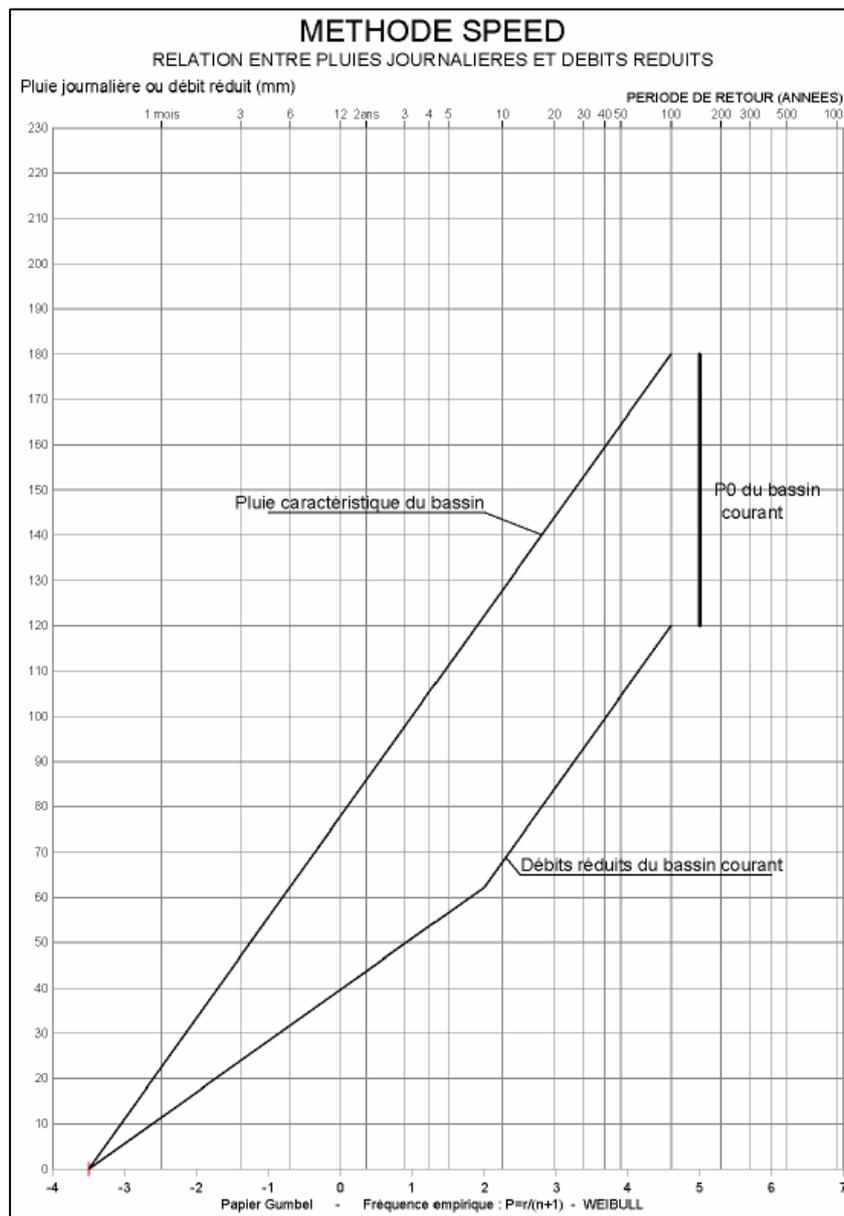
Dans la pratique, les précipitations journalières observées et les valeurs de débits réduits sont disposées sur un même graphique de Gumbel. Les débits réduits (Q_{re}) sont l'expression en millimètres des débits de pointe de crue par cette relation :

$$Q_{re} = \frac{12 Q}{S^{0.75}}, \text{ avec } S \text{ la superficie du bassin versant intercepté en km}^2 \text{ et } Q \text{ le débit en m}^3/\text{s}$$

Ils permettent donc de s'affranchir de la notion de superficie du bassin versant et peuvent se superposer directement aux valeurs de pluies journalières considérées sur la même période. Cette formulation est valable pour des bassins versants de 500 à 1000 km² (et pour les bassins versants de plus petite superficie à condition qu'ils soient « naturels »).

Pour $T < T_0$, l'ajustement des débits réduits est effectuée directement sur les données mesurées (analysées au préalable) car, leur période de retour étant relativement faible, ces événements pluvieux remplissent les nappes de surface ou s'infiltrent dans le sol et alimentent la nappe.

A partir d'une certaine période de retour T_0 , la droite d'ajustement des débits devient parallèle à celles des pluies journalières et décalée de la quantité P_0 correspondant aux pertes initiales. Le paramètre P_0 est souvent proche de 60 mm en France (pour des bassins versants non karstiques).



Annexe 3 : Détermination des débits caractéristiques du Madon

Analyse régionale des pluies

Stations pluviométriques

Plusieurs stations pluviométriques sont implantées sur le bassin versant du Madon. Le tableau suivant décrit l'ensemble des stations traitées :

Station	Code station	Altitude (m)	Nombre d'années de mesure	Début	Fin
Lerrain	88 267	320	38	1971	Ouverte
Mirecourt	88 304	265	68	1939	Ouverte
Charmes	88 090	283	42	1958	2008
Praye	54 434	307	50	1949	2008

Traitement statistique et analyse régionale des pluies

Les pluies journalières maximales annuelles mesurées sur chacune de ces stations ont été traitées par ajustement statistique sur un graphique de Gumbel.

Les valeurs ont fait l'objet d'un ajustement par une droite passant par le pivot établi sur la zone étudiée : la valeur du pivot est de -3,5 pour les perturbations Ouest-Est de type flux océanique dans le Nord-Est de la France.

Les graphiques *fournis en pages suivantes* présentent les ajustements de Gumbel réalisés pour chaque station pluviométrique. Le tableau suivant récapitule les valeurs caractéristiques obtenues :

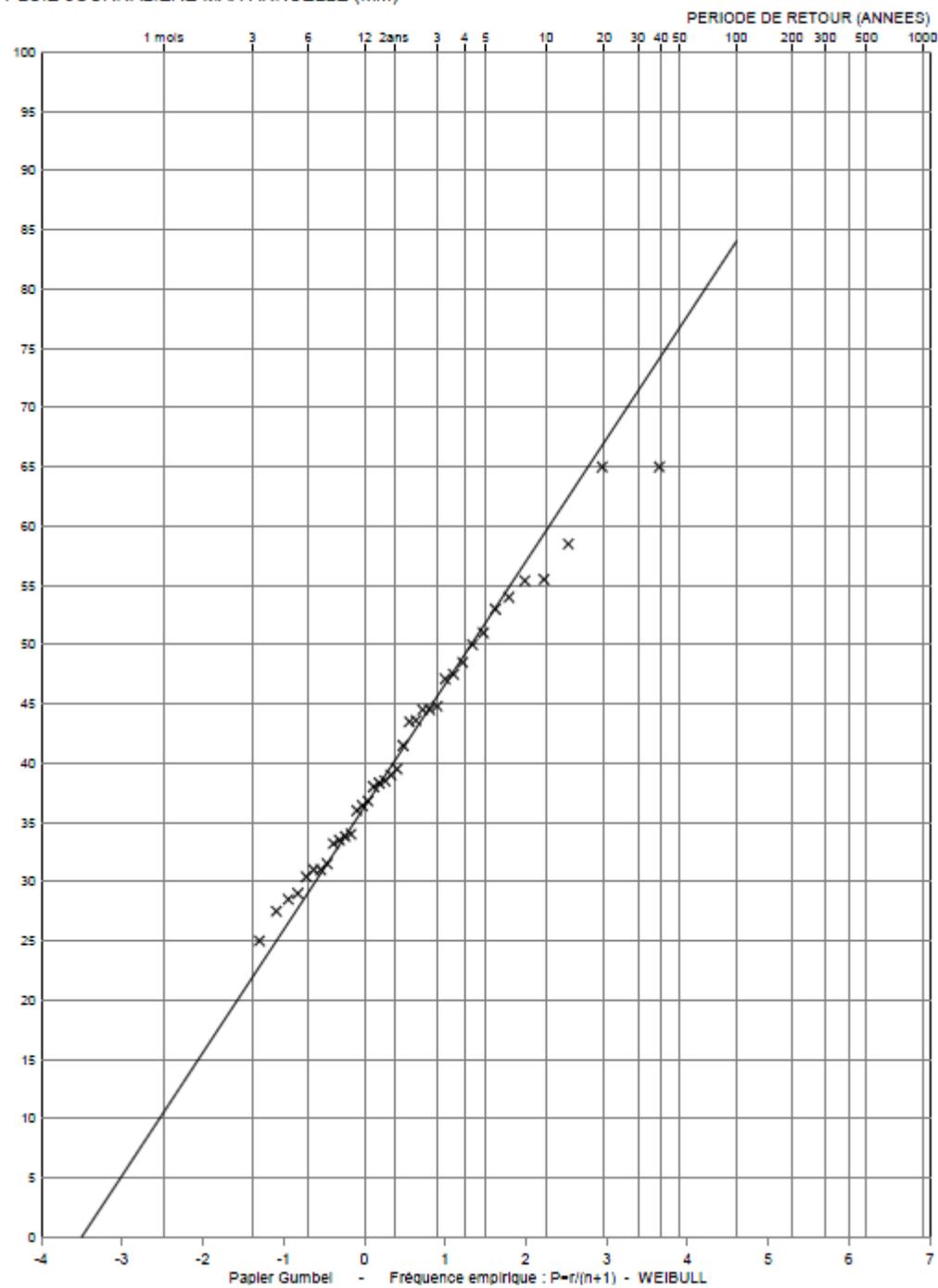
Station	P2 (mm)	P10 (mm)	P30 (mm)	P100 (mm)
Lerrain	40	59	73	84
Mirecourt	35	52	63	73
<i>avec cassure</i>	35	52	74	95
Charmes	37	54	64	77
Praye	36	53	63	75

Les résultats montrent une relative homogénéité des pluies sur le bassin versant. La station de Lerrain présente un ajustement légèrement au-dessus des autres, ce qui s'explique par sa position sur l'amont du bassin versant du Madon. Les pluies journalières mesurées à la station de Charmes ne présentent pas un alignement satisfaisant par rapport à la droite d'ajustement obtenue : les données provenant de ce poste pluviométrique n'ont donc pas été exploitées pour effectuer les analyses hydrologiques par la suite.

LERRAIN

Traitement de 38 valeurs sur 38 années

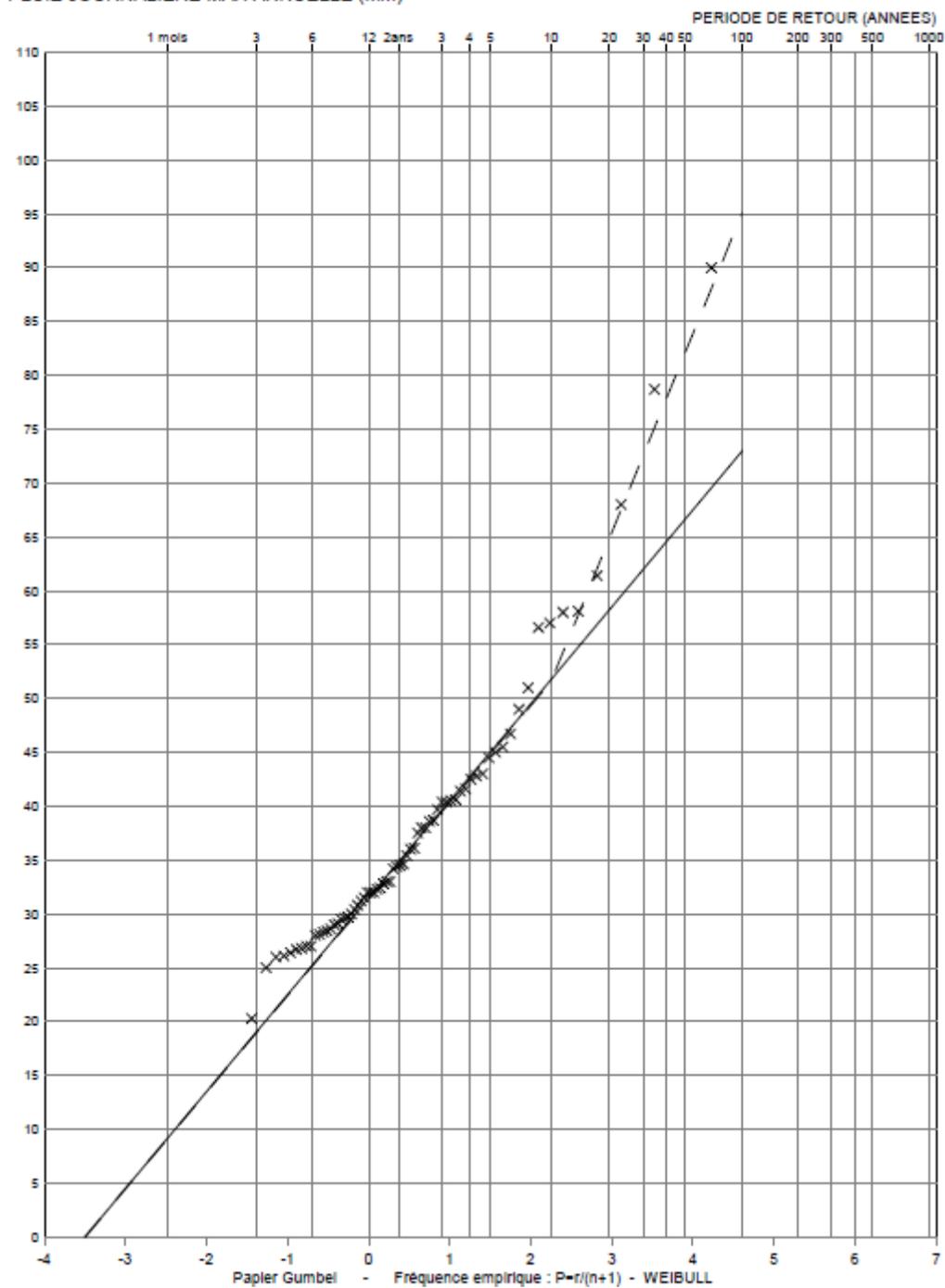
PLUIE JOURNALIERE MAX ANNUELLE (mm)



MIRECOURT

Traitement de 68 valeurs sur 68 années

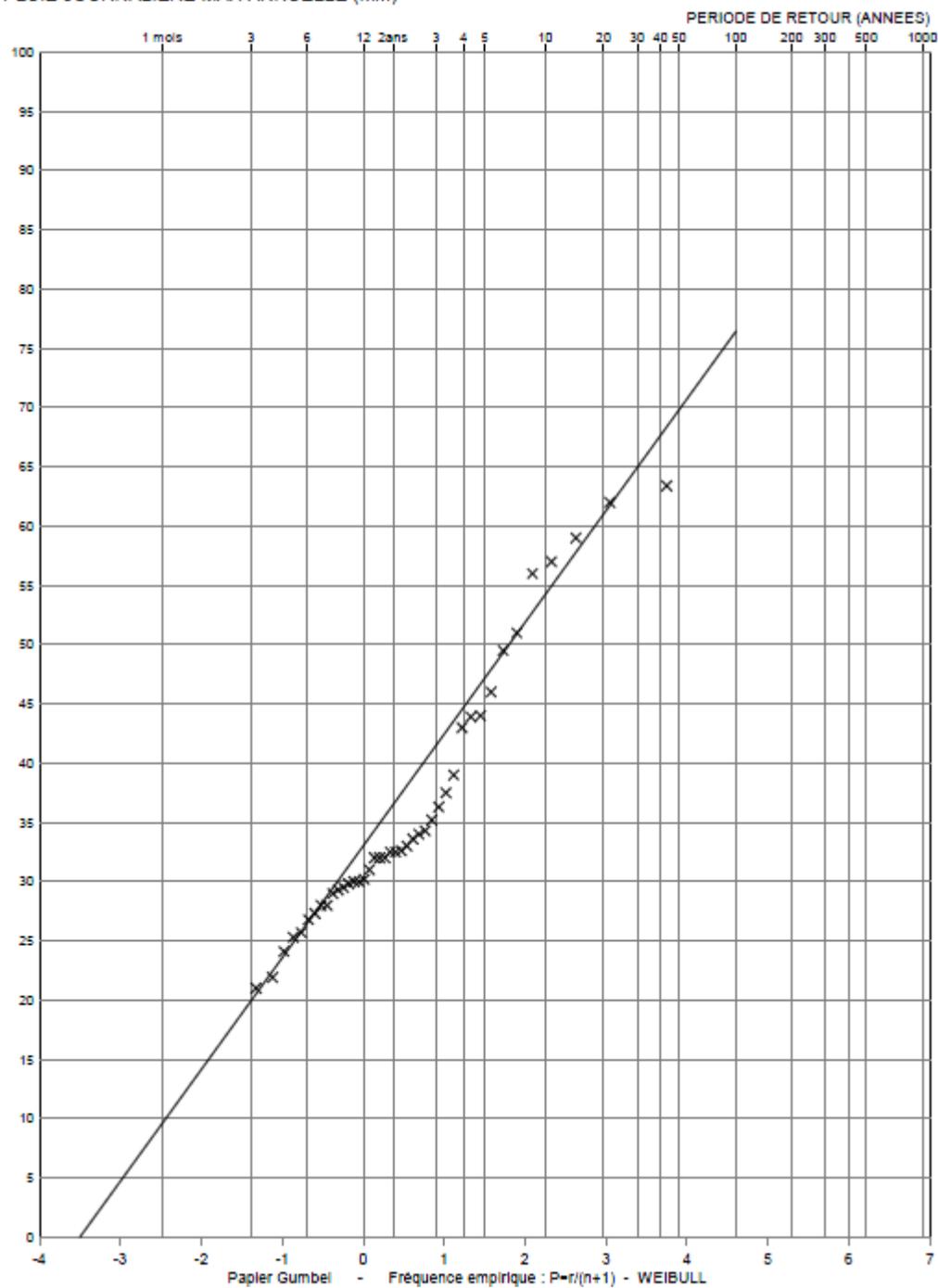
PLUIE JOURNALIERE MAX ANNUELLE (mm)



CHARMES

Traitement de 42 valeurs sur 42 années

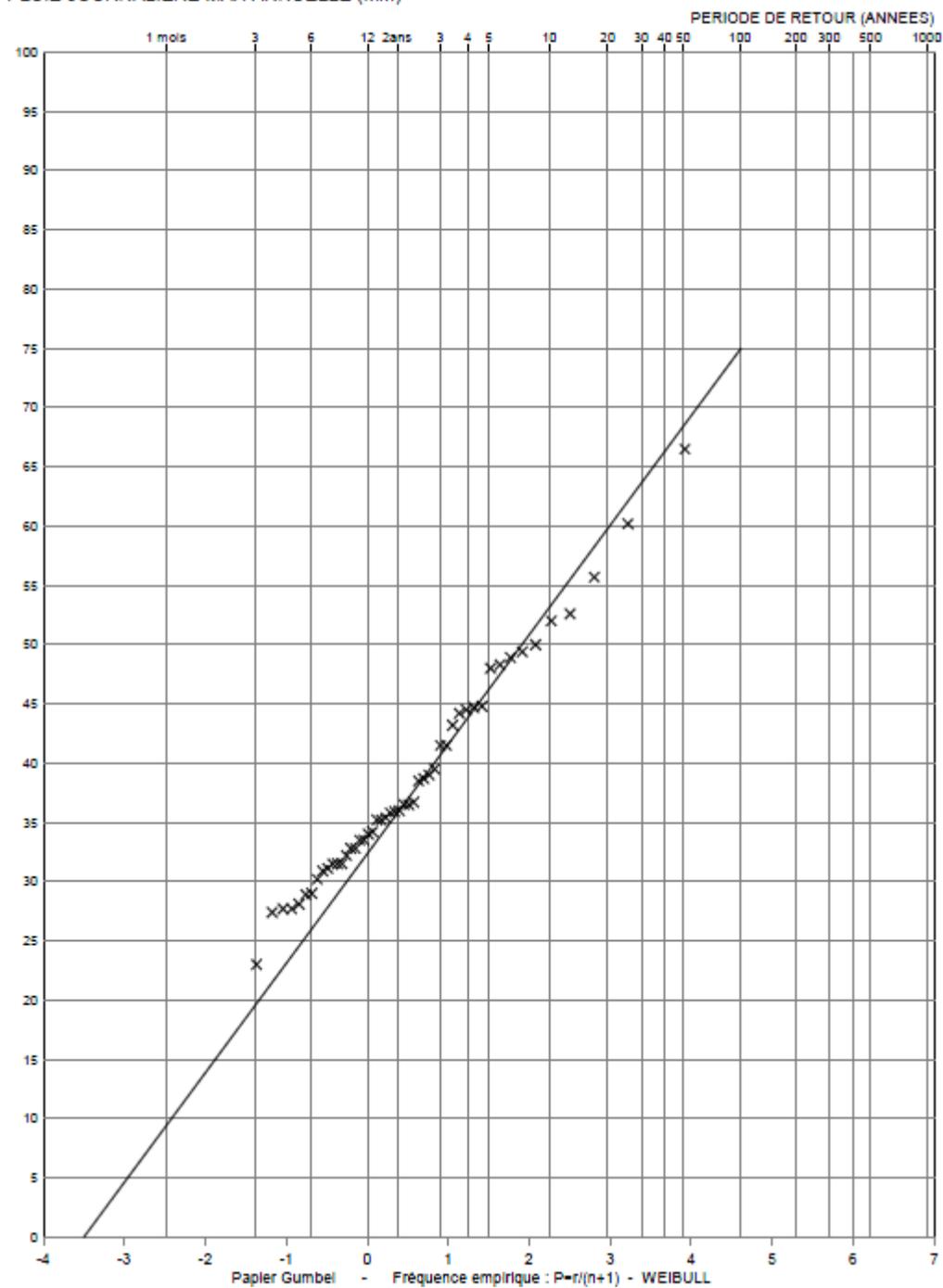
PLUIE JOURNALIERE MAX ANNUELLE (mm)



PRAYE

Traitement de 50 valeurs sur 50 années

PLUIE JOURNALIERE MAX ANNUELLE (mm)



La position des valeurs les plus fortes mesurées à la station de Mirecourt montre la possibilité d'existence d'une cassure de la droite d'ajustement (représentée en traits pointillés sur le graphique de Gumbel). Cette cassure aboutirait à une valeur de pluie journalière d'occurrence centennale de 95 mm. L'observation de telles cassures peut s'expliquer par la présence du relief. Lorsqu'une masse d'air chaude et humide arrive sur un versant de montagne, elle est obligée de s'élever et cela provoque des précipitations. Mais une fois parvenue sur le versant opposé de la montagne, la masse d'air a eu le temps de s'assécher ce qui diminue les quantités d'eau précipitées. A partir d'une certaine période de retour, la masse d'air devient importante et son assèchement reste négligeable : les hauteurs de précipitations sur chaque versant sont alors comparables. Mais dans le contexte régional, une telle influence du relief sur les précipitations reste peu probable du fait de la position centrale du poste de Mirecourt sur le bassin versant du Madon.

De plus, l'analyse des pluies journalières sur le bassin versant de la Moselle effectuée préalablement à l'élaboration de l'AZI (*présentée sur la carte en page suivante*) ne justifie pas non plus une pluviométrie journalière bien plus élevée au poste de Mirecourt. Une telle différence par rapport aux postes environnants ne coïncide pas avec la répartition spatiale des pluies sur le bassin versant de la Moselle qui est relativement homogène (de l'ordre de 80 mm pour l'occurrence centennale).

Ainsi, l'hypothèse d'une cassure de la droite d'ajustement des pluies pour la station de Mirecourt n'a pas été retenue pour la suite de l'étude.

ANALYSE DE LA PLUVIOMETRIE JOURNALIERE

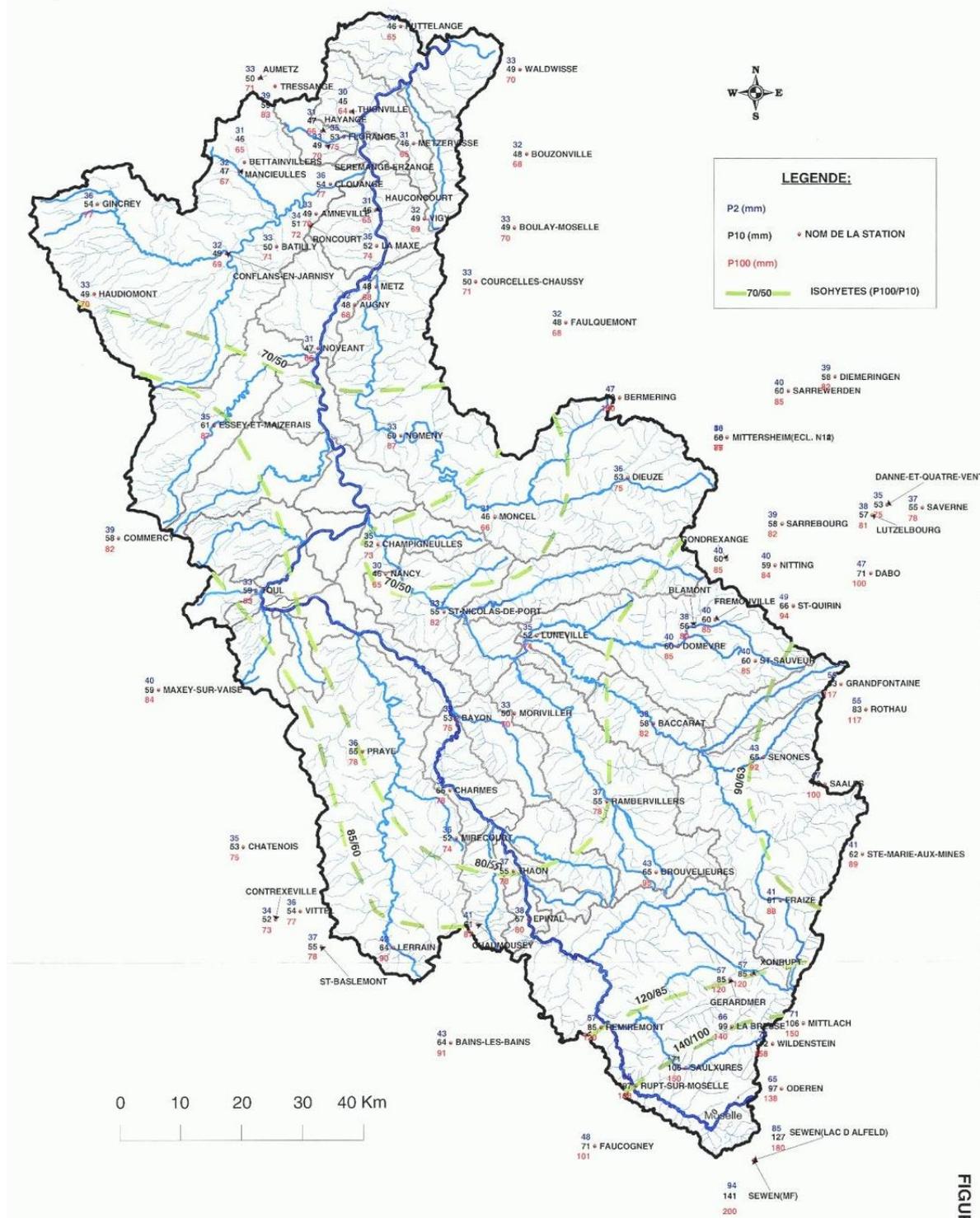


FIGURE A2-6

ATLAS DES ZONES INONDABLES DE LA MOSELLE ET LA MEURTHE

Analyse hydrologique de la pluviométrie journalière réalisée par ARTELIA dans le cadre de l'élaboration de l'AZI de la Moselle (13)

Détermination des débits caractéristiques

Stations limnimétriques

Les stations limnimétriques sont des stations de mesure des niveaux d'eau dans la rivière. Les débits peuvent alors être obtenus par l'intermédiaire d'une loi hauteur-débit (courbe de tarage) qui est fixée par le gestionnaire. En amont de la zone d'étude, le Madon est équipé des deux stations limnimétriques répertoriées dans le tableau suivant :

Station	Code station	Altitude (m)	Superficie du bassin versant (km ²)	Nombre d'années de mesure	Début	Fin
Mirecourt	A5261010 A5261020	261	382	42	01/08/1965	ouverte
Pulligny	A5431010	225	943	46	01/01/1964	ouverte

Analyse des débits réduits

Dans un premier temps, les maxima des débits instantanés sur chaque année hydrologique ont été transformés en débits réduits et traités statistiquement par la loi de Gumbel, loi des valeurs extrêmes.

Pour la chronique de débits étudiée, la droite d'ajustement des données de Pulligny ne présente pas de cassure. Par contre, l'ajustement de Mirecourt montre une bonne homogénéité des débits réduits jusqu'à une valeur de 12,5 mm (90 m³/s). Au-delà, les débits réduits à Mirecourt augmentent très nettement par rapport aux débits réduits à Pulligny. L'analyse des cartes géologiques de la région ne met pas en évidence de grande différence dans la géologie locale. La pluviométrie régionale est très homogène (P100 # 80 mm) et la couverture des sols est globalement similaire. Ces éléments ne sauraient expliquer une telle différence dans les valeurs de débit réduit de deux stations situées sur le même bassin versant, soumises aux mêmes pluies sur un sol de nature et de couverture globalement similaire. La brusque augmentation des débits réduits de la station de Mirecourt ne peut raisonnablement pas être attribuée à la saturation du bassin. Toutes les études antérieures réalisées par application de la méthode SPEED montrent que le facteur P₀ (hauteur de pluie nécessaire à la saturation complète de la nappe et de la surface) avoisine 60 mm dans la région Est.

La fiabilité des valeurs de débits maximaux annuels de la station de Mirecourt reste donc douteuse : il est possible que les valeurs affichées soient affectées par une imprécision de la courbe de tarage. Par conséquent, l'analyse probabiliste a été menée uniquement à partir des débits mesurés à la station de Pulligny, sans considérer les données de débits de Mirecourt.

Analyse pluie-débit

L'analyse pluie-débit consiste à comparer les valeurs des pluies et des débits réduits sur une période commune.

Toutes les stations pluviométriques considérées disposent de mesures sur les périodes correspondant aux plus fortes crues (notamment celle d'octobre 2006). L'analyse des pluies a donc consisté à réaliser un ajustement moyen avec les données issues des stations pluviométriques de Lerrain (position amont), Mirecourt et Praye (position centrale).

Pour réaliser l'ajustement des débits réduits, seules les données issues de la station limnimétrique de Pulligny ont été considérées. Les valeurs des débits réduits de la station de Mirecourt figurent également sur le graphique d'ajustement, mais uniquement à titre indicatif.

La relation pluie-débit est obtenue en superposant sur un même papier Gumbel les pluies considérées et les débits réduits de la station retenue pour l'analyse. Le graphique *en page suivante* présente la superposition des ajustements effectués.

Cet ajustement ne met pas en évidence de cassure dans la droite d'ajustement des débits réduits calculés à partir des données de station de Pulligny. La droite d'ajustement est bien alignée sur les valeurs extrêmes, et l'écart entre pluie centennale et débit réduit centennial serait d'environ 55 mm. La valeur minimale de P_0 serait donc de 55 mm, et la saturation du bassin versant au sens du Gradex (atteinte du seuil probabiliste de ruissellement généralisé sur le bassin versant à partir d'une période de retour T_0) n'interviendrait que pour une période de retour supérieure à 100 ans (la période de mesure n'étant pas suffisamment longue pour mettre en évidence cette cassure).

Ces résultats sont cohérents avec les valeurs généralement constatées sur l'Est de la France, où la valeur de P_0 à partir de laquelle il y a ruissellement généralisé avoisine les 60 mm.

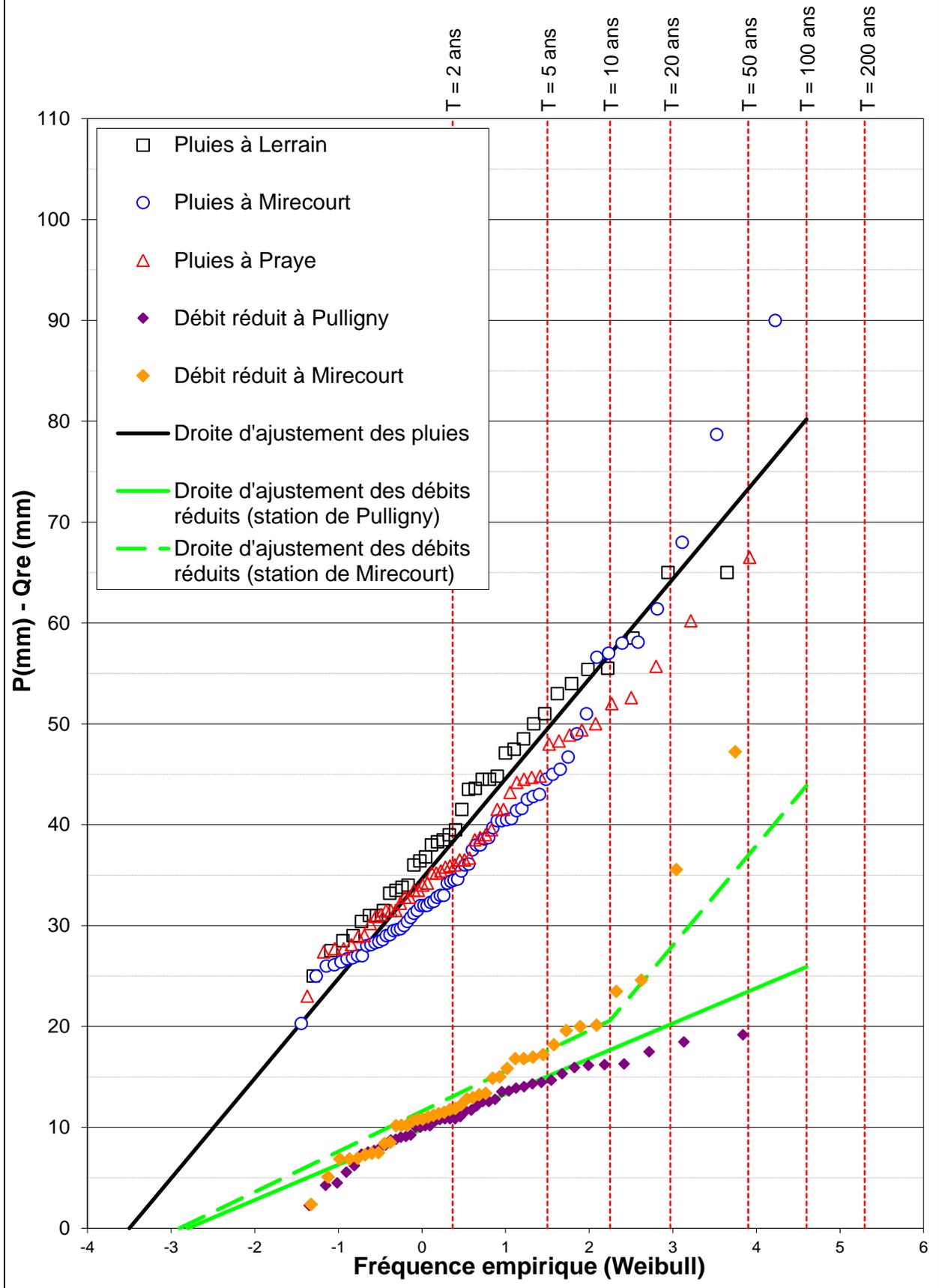
L'ajustement des débits réduits met également en évidence qu'il existerait des pertes à l'origine, liées à l'état du substratum du bassin versant aval du Madon (substrat marno-calcaire et calcaire). La valeur du P_0 associé à ces pertes initiales serait de l'ordre de 10 à 20 mm environ.

Le même ajustement effectué avec les valeurs de la station de Mirecourt permettrait d'envisager une cassure dans la droite des débits réduits, à partir de $T = 10$ ans environ (droite en pointillé sur le graphique). La valeur de P_0 résultante serait alors de 37 mm, ce qui semble peu vraisemblable pour la région (environ 60 mm). Ce résultat confirme les doutes formulés sur la validité des débits de la station de Mirecourt.

Par lecture graphique des débits réduits sur l'ajustement présenté précédemment, les débits caractéristiques du Madon à hauteur de Pulligny sont obtenus :

Période de retour	2 ans	10 ans	30 ans	100 ans
Débit réduit Q_{re} (mm)	11,1	17,7	21,6	25,9
Débit du Madon à Pulligny (m^3/s) [S = 943 km ²]	157	251	307	367

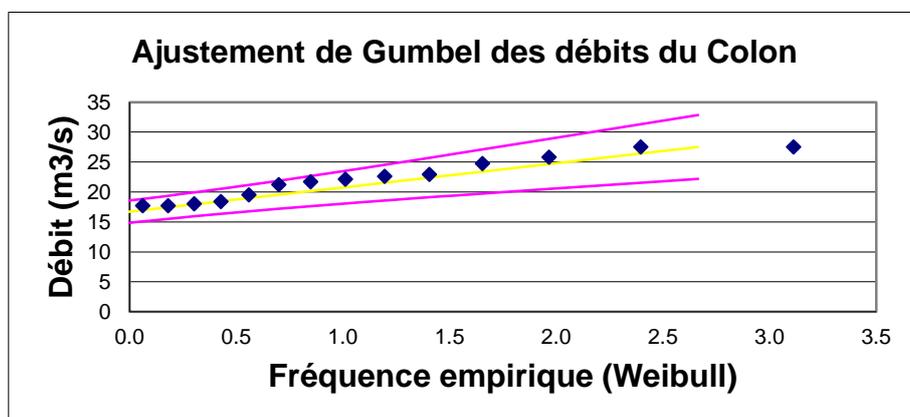
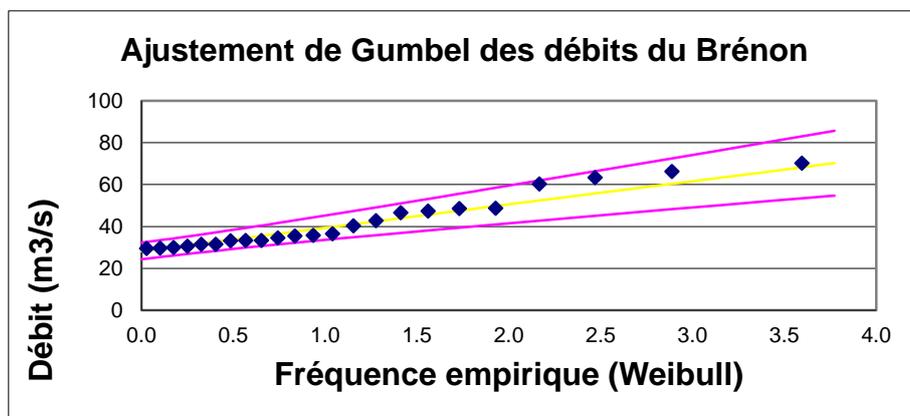
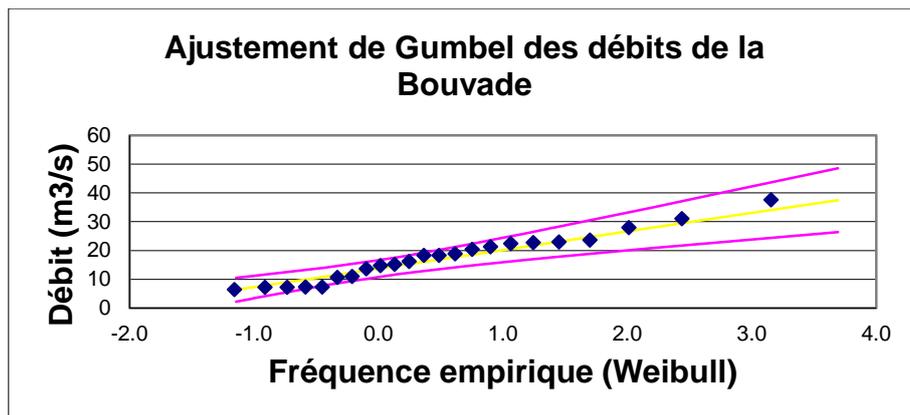
Ajustement de Gumbel des débits du Madon - Méthode SPEED



Annexe 4 : Détermination des débits caractéristiques de l'Attenaye

Les débits caractéristiques du ruisseau de l'Attenaye ont été obtenus par ajustement de Gumbel des débits mesurés sur les ruisseaux de la Bouvade, du Brénon et du Colon. Seules les valeurs issues du traitement statistique des données du Brénon ont été utilisées pour fixer les débits de l'Attenaye car il s'agit du seul ruisseau pour lequel l'ajustement était satisfaisant.

Les figures suivantes présentent les trois ajustements de Gumbel réalisés.



Annexe 5 : Présentation du logiciel CARIMA

CARIMA (CALcul de Rivières MAillées) est un système intégré de modélisation des écoulements dans les fleuves, rivières, canaux, réseaux d'irrigation et champs d'inondation. Il inclut aussi des modules spécifiques de modélisation pour les ouvrages mobiles, régulés ou non, et pour le transfert des polluants.

CARIMA est l'aboutissement des recherches et des développements en hydraulique numérique poursuivis depuis 1970 par SOGREAH. Cet outil opérationnel au service de l'ingénieur a été utilisé et validé sur un grand nombre de bassins hydrographiques, de rivières, de fleuves soumis à l'action de la marée, de deltas, de systèmes d'irrigation et de drainage, avec des conditions hydrologiques et hydrauliques très diverses.

Citons quelques applications typiques dans les études d'ingénierie :

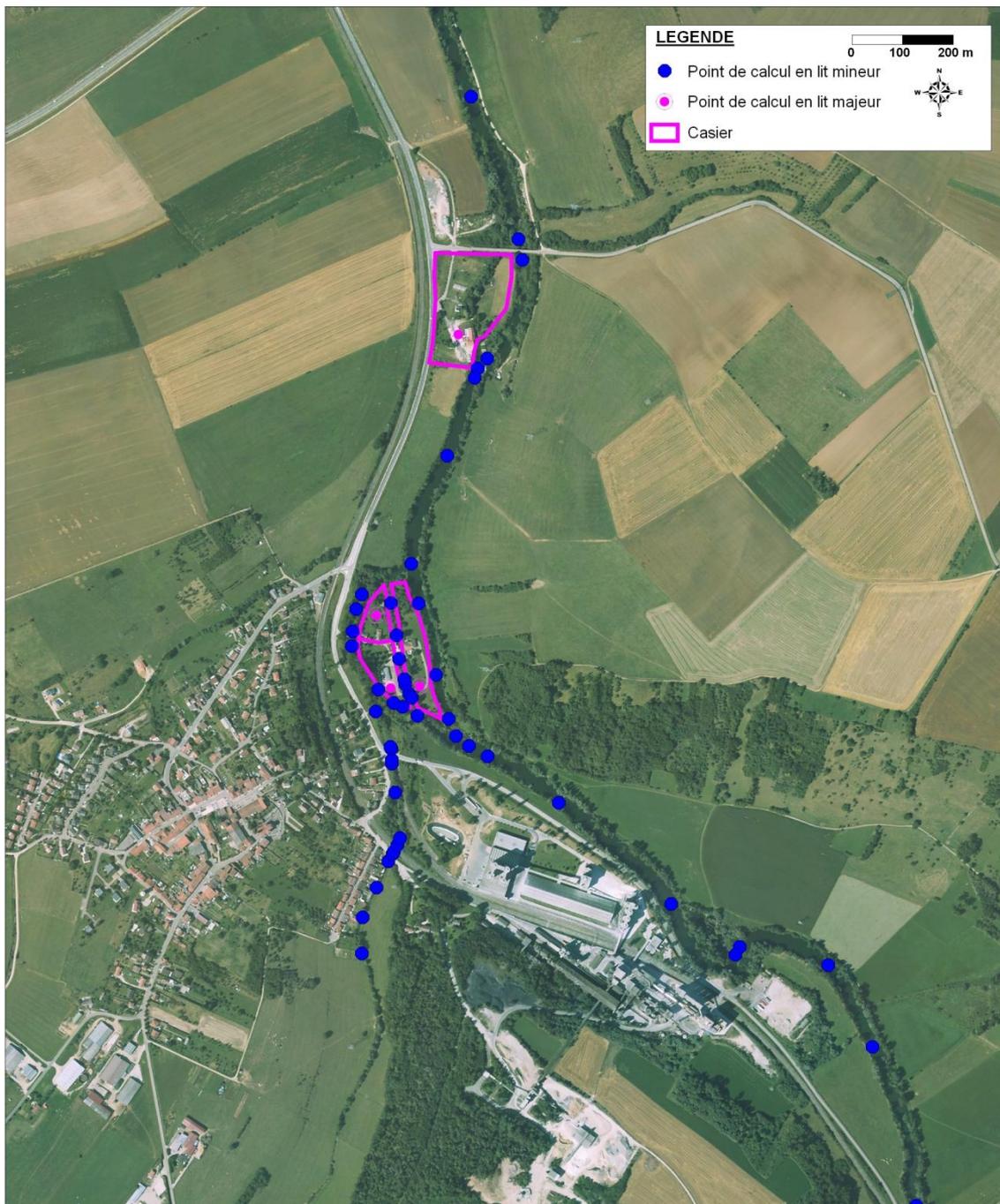
- Etudes d'aménagement de rivières et de fleuves ;
- Evaluation des risques d'inondation et étude des protections ;
- Etudes d'impact hydraulique d'aménagements dans les cours d'eau et leurs vallées inondables ;
- Etudes de stratégie de fonctionnement d'ouvrages de régulation, établissement de programmes de consignes ;
- Aide à la gestion et à l'exploitation des ressources énergétiques d'un cours d'eau ;
- Irrigation, drainage et assainissement agricole ;
- Etudes de transfert des polluants d'origine agricole, industrielle

La description des cours d'eau et du terrain est basée sur une large bibliothèque d'objets et d'options qui permettent de représenter finement l'ensemble des situations rencontrées en hydraulique fluviale. La rivière et le champ d'inondation sont représentés par un ensemble de points de calcul (le maillage du modèle) reliés par des tronçons d'écoulement. Deux régimes de base des écoulements sont traités par CARIMA :

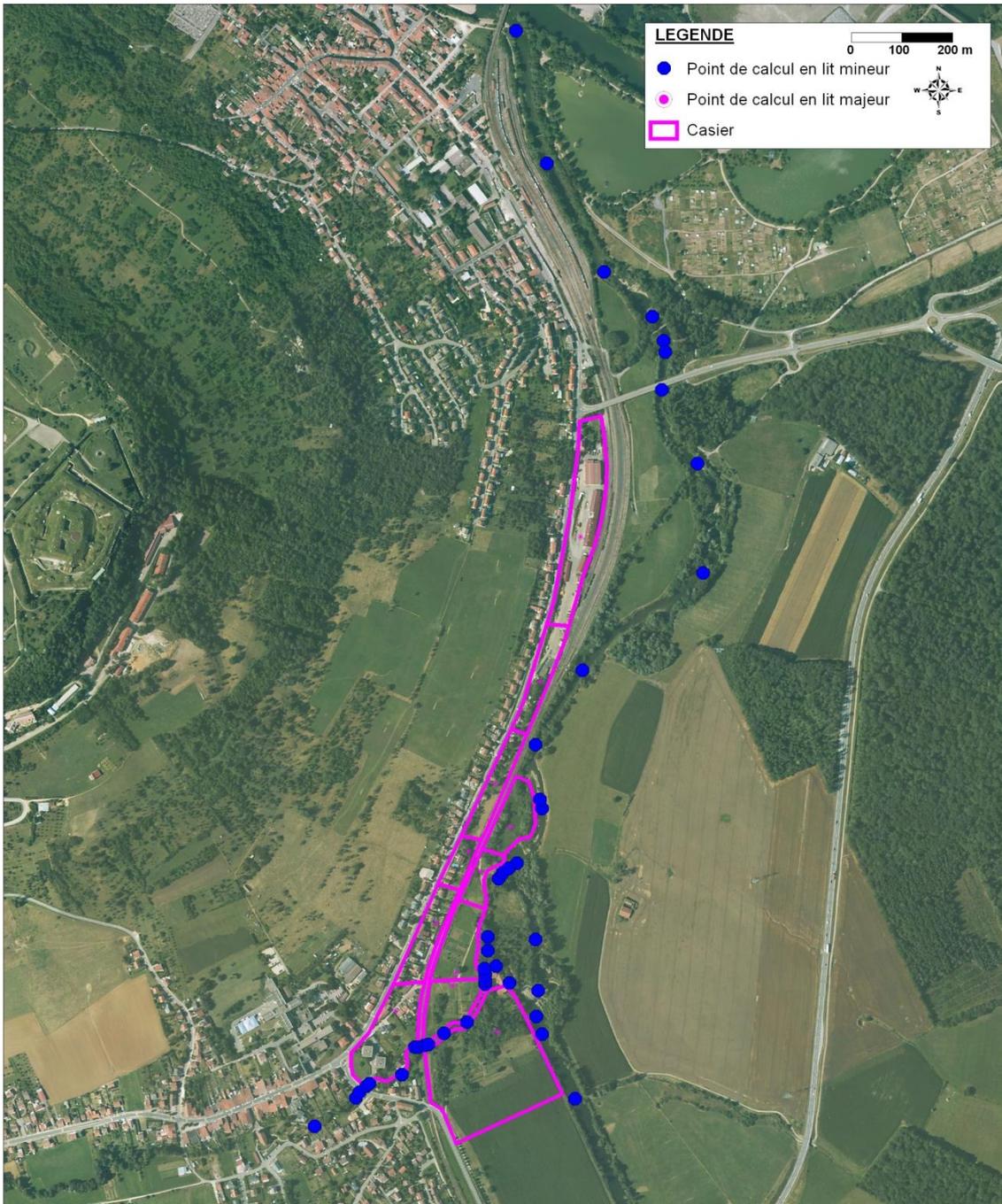
- L'écoulement unidimensionnel (1D) suivant le ou les lits mineurs de la rivière, représenté par les équations complètes de Barré de Saint-Venant qui tiennent compte de l'inertie. Des relations particulières expriment les pertes de charge singulières et les lois d'écoulement en cas de singularités (digues, barrages, seuils, vannes, orifices, déversoirs, etc.)
- L'écoulement dans le champ d'inondation, représenté par une modélisation dite « à casiers » (ou quasi 2D) est basé sur la continuité du volume pour chaque casier et sur les lois d'écoulement sans inertie entre les casiers. L'écoulement entre les cellules est supposé obéir soit à une loi de résistance (perte de charge par frottement), soit à une loi de type ouvrage (déversoir, orifice, etc.).

CARIMA comprend trois sous-modules qui permettent la saisie du modèle, la simulation hydraulique, l'analyse et la présentation des résultats.

Annexe 6 : Topologie du modèle hydraulique



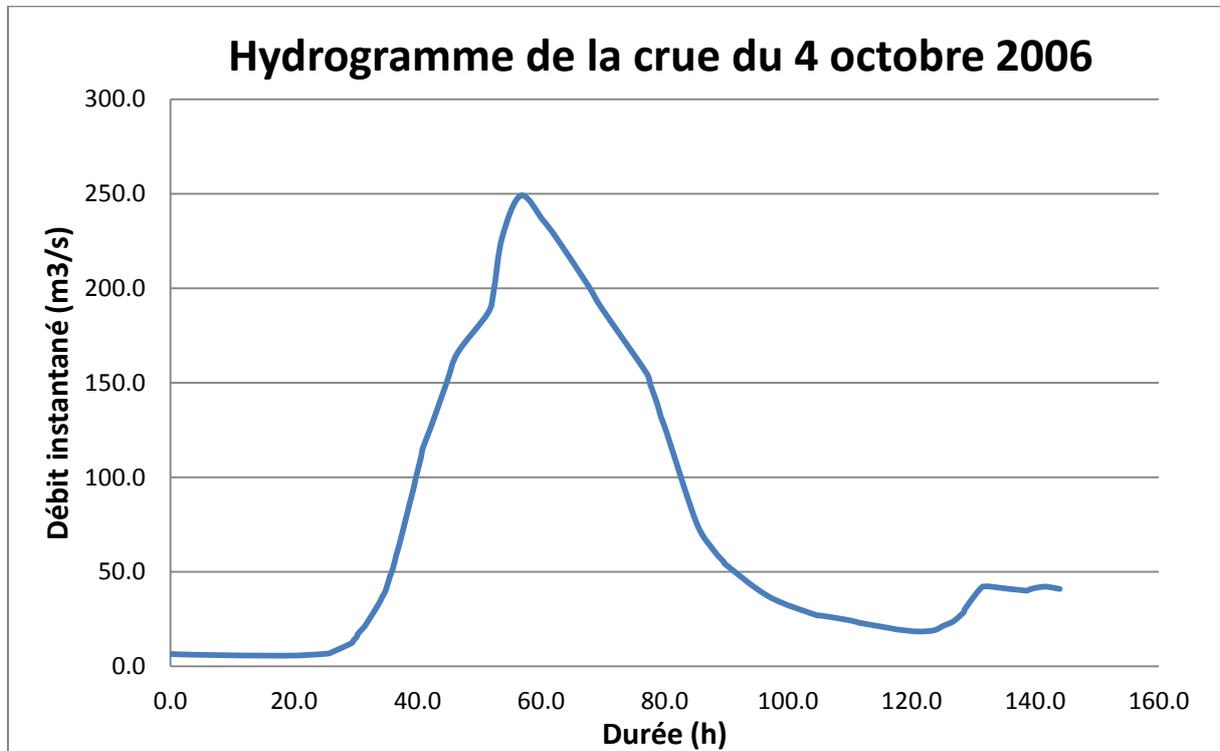
Topologie du modèle sur la commune de Xeuilley



Topologie du modèle sur la commune de Bainville-sur-Madon et Pont-Saint-Vincent

Annexe 7 : Hydrogramme de la crue d'octobre 2006

L'hydrogramme utilisé en entrée du modèle pour réaliser le calage est celui de la crue d'octobre 2006 à la station limnimétrique de Pulligny (données Banque Hydro). Il est présenté ci-dessous :



Annexe 8 : Repères de crue pour la crue d'octobre 2006 (fournis par le CETE de l'Est)

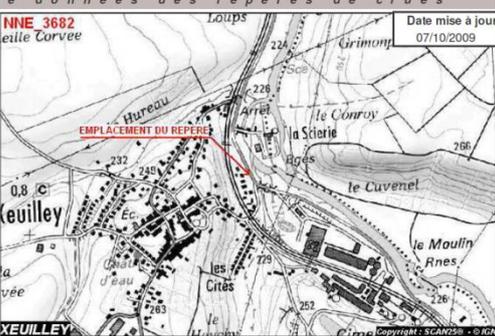
Base de données des repères de crues



Fiche N°
3682

NNE_3682
vieille Corvée

Date mise à jour : 07/10/2009



Commune: XEUILLEY
Adresse :
Dépt : MEURTHE-ET-MOSELLE
Rivière: Madon
Coordonnées : X = 877 877.00
(Lambert I) Y = 1 103 244.00
Observations

Crue d'octobre 2006				Cote du repère(IGN69) : 226.11	Hauteur d'eau: 0.00	Plaque posée <input type="checkbox"/>
Existence du repère : Existant						
Nivellement : Sûr				SCP Suaire & Didier		
Représentativité :						



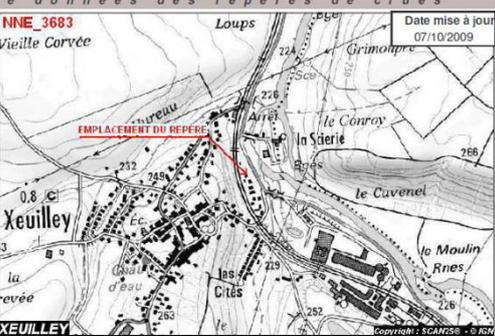
Base de données des repères de crues



Fiche N°
3683

NNE_3683
Vieille Corvée

Date mise à jour : 07/10/2009



Commune: XEUILLEY
Adresse :
Dépt : MEURTHE-ET-MOSELLE
Rivière: Madon
Coordonnées : X = 877 836.00
(Lambert I) Y = 1 103 270.00
Observations

Crue d'octobre 2006				Cote du repère(IGN69) : 226.11	Hauteur d'eau: 0.00	Plaque posée <input type="checkbox"/>
Existence du repère : Existant						
Nivellement : Sûr				SCP Suaire & Didier		
Représentativité :						



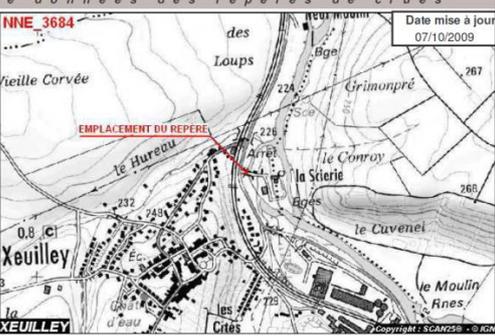
Base de données des repères de crues



Fiche N°
3684

NNE_3684
vieille Corvée

Date mise à jour : 07/10/2009



Commune: XEUILLEY
Adresse :
Dépt : MEURTHE-ET-MOSELLE
Rivière: Madon
Coordonnées : X = 877 846.00
(Lambert I) Y = 1 103 422.00
Observations

Crue d'octobre 2006				Cote du repère(IGN69) : 225.54	Hauteur d'eau: 0.00	Plaque posée <input type="checkbox"/>
Existence du repère : Existant						
Nivellement : Sûr				SCP Suaire & Didier		
Représentativité :						



Base de données des repères de crues

Fiche N° 3685

Date mise à jour : 07/10/2009

Commune: XEUILLEY
 Adresse :
 Dépt. : MEURTHE-ET-MOSELLE
 Rivière: Madon
 Coordonnées : X = 878 068.06 (Lambert I) Y = 1 104 027.45
 Observations

Crue d'octobre 2006	Cote du repère(IGN69) : 225.23	Hauteur d'eau: 0.00	Plaque posée <input type="checkbox"/>
Existence du repère :	Existant		
Nivellement :	Sûr SCP Suaire & Didier		
Représentativité :			



Base de données des repères de crues

Fiche N° 3686

Date mise à jour : 07/10/2009

Commune: BAINVILLE-SUR-MADON
 Adresse :
 Dépt. : MEURTHE-ET-MOSELLE
 Rivière: Madon
 Coordonnées : X = 877 426.00 (Lambert I) Y = 1 105 450.00
 Observations

Crue d'octobre 2006	Cote du repère(IGN69) : 222.69	Hauteur d'eau: 0.00	Plaque posée <input type="checkbox"/>
Existence du repère :	Existant		
Nivellement :	Sûr SCP Suaire & Didier		
Représentativité :			



Base de données des repères de crues

Fiche N° 3687

Date mise à jour : 07/10/2009

Commune: BAINVILLE-SUR-MADON
 Adresse :
 Dépt. : MEURTHE-ET-MOSELLE
 Rivière: Madon
 Coordonnées : X = 877 450.00 (Lambert I) Y = 1 105 569.00
 Observations

Crue d'octobre 2006	Cote du repère(IGN69) : 222.82	Hauteur d'eau: 0.00	Plaque posée <input type="checkbox"/>
Existence du repère :	Existant		
Nivellement :	Sûr SCP Suaire & Didier		
Représentativité :			



Base de données des repères de crues

Fiche N° 3688

Date mise à jour : 07/10/2009

Commune: BAINVILLE-SUR-MADON
 Adresse :
 Dépt : MEURTHE-ET-MOSELLE
 Rivière: Madon
 Coordonnées : X = 877 486.00 (Lambert I) Y = 1 105 701.00
 Observations

Crue d'octobre 2006	Cote du repere(KN69) : 222.53	Hauteur d'eau: 0.00	Plaque posée <input type="checkbox"/>
Existence du repère :	Existant		
Nivellement :	Sûr SCP Sulaire & Didier		
Représentativité :			



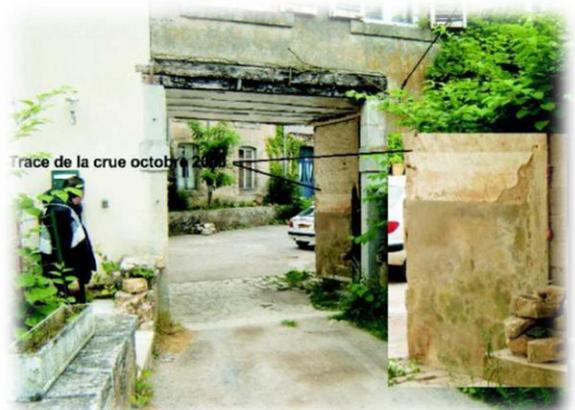
Base de données des repères de crues

Fiche N° 3689

Date mise à jour : 07/10/2009

Commune: BAINVILLE-SUR-MADON
 Adresse :
 Dépt : MEURTHE-ET-MOSELLE
 Rivière: Madon
 Coordonnées : X = 877 606.00 (Lambert I) Y = 1 105 617.00
 Observations

Crue d'octobre 2006	Cote du repere(KN69) : 222.62	Hauteur d'eau: 0.00	Plaque posée <input type="checkbox"/>
Existence du repère :	Existant		
Nivellement :	Sûr SCP Sulaire & Didier		
Représentativité :			



Base de données des repères de crues

Fiche N° 3690

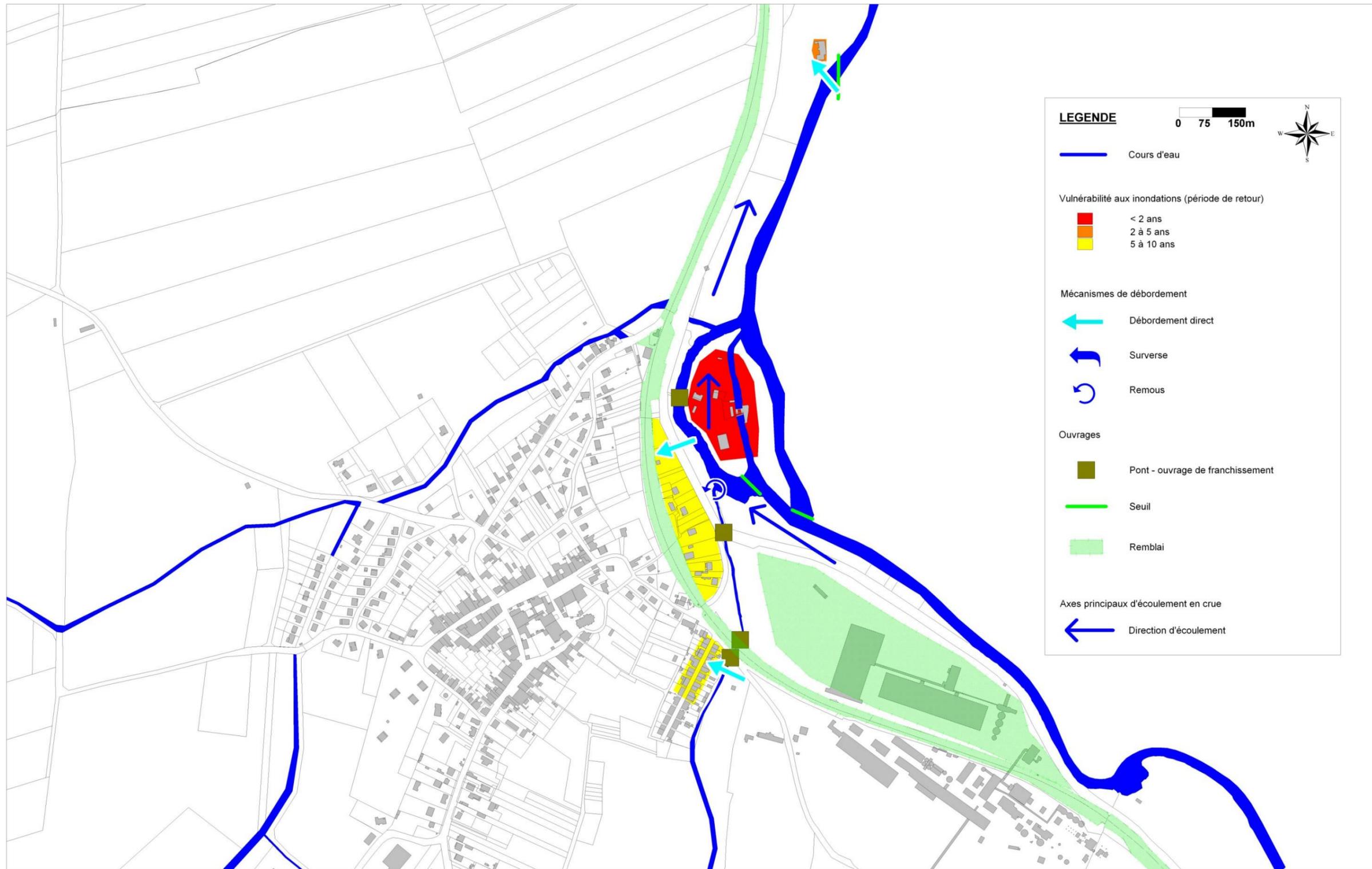
Date mise à jour : 07/10/2009

Commune: PONT-SAINT-VINCENT
 Adresse :
 Dépt : MEURTHE-ET-MOSELLE
 Rivière: Madon
 Coordonnées : X = 877 798.00 (Lambert I) Y = 1 106 519.00
 Observations

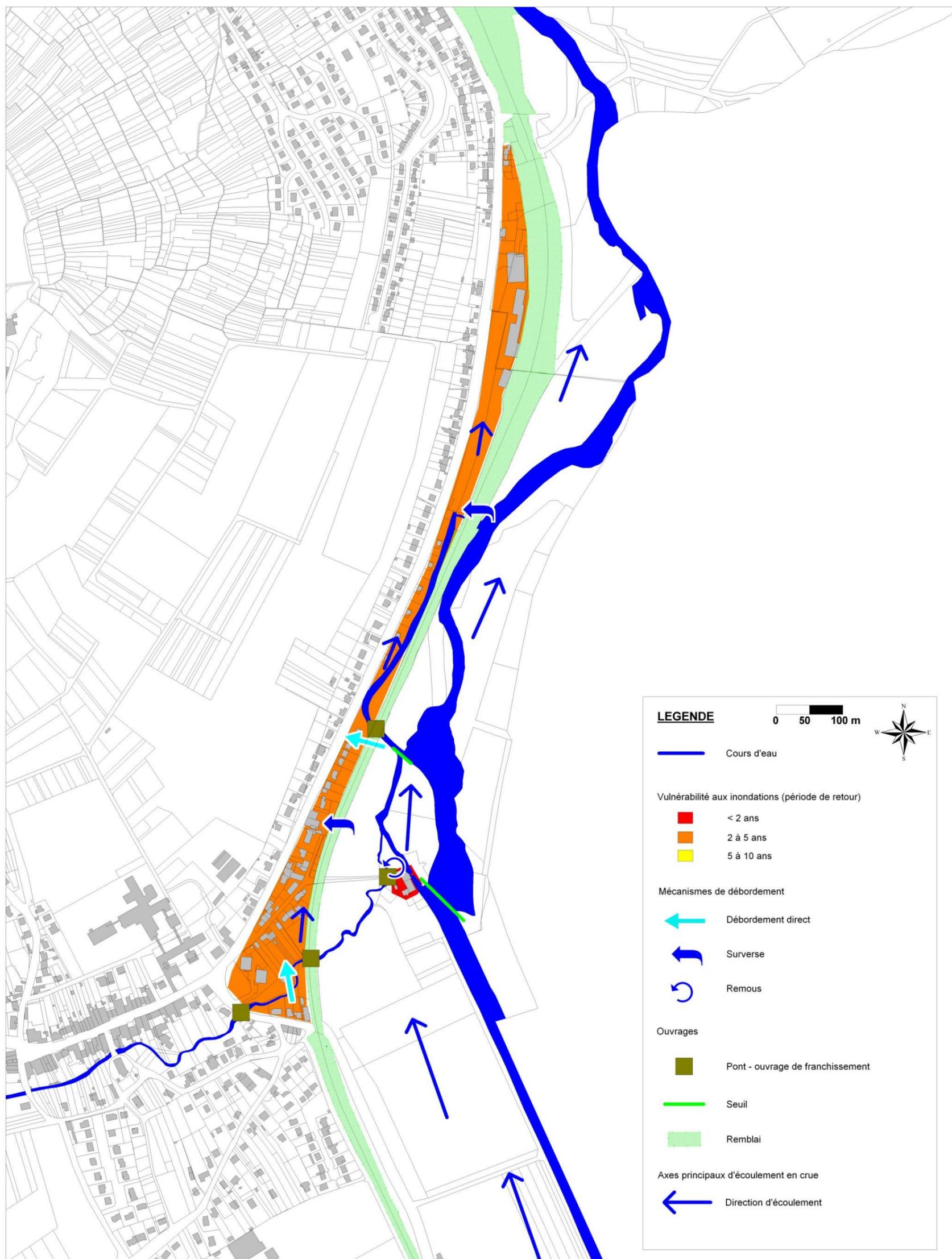
Crue d'octobre 2006	Cote du repere(KN69) : 221.86	Hauteur d'eau: 0.00	Plaque posée <input type="checkbox"/>
Existence du repère :	Existant		
Nivellement :	Sûr SCP Sulaire & Didier		
Représentativité :			



Annexe 9 : Carte de synthèse du diagnostic hydraulique sur la commune de Xeuilley



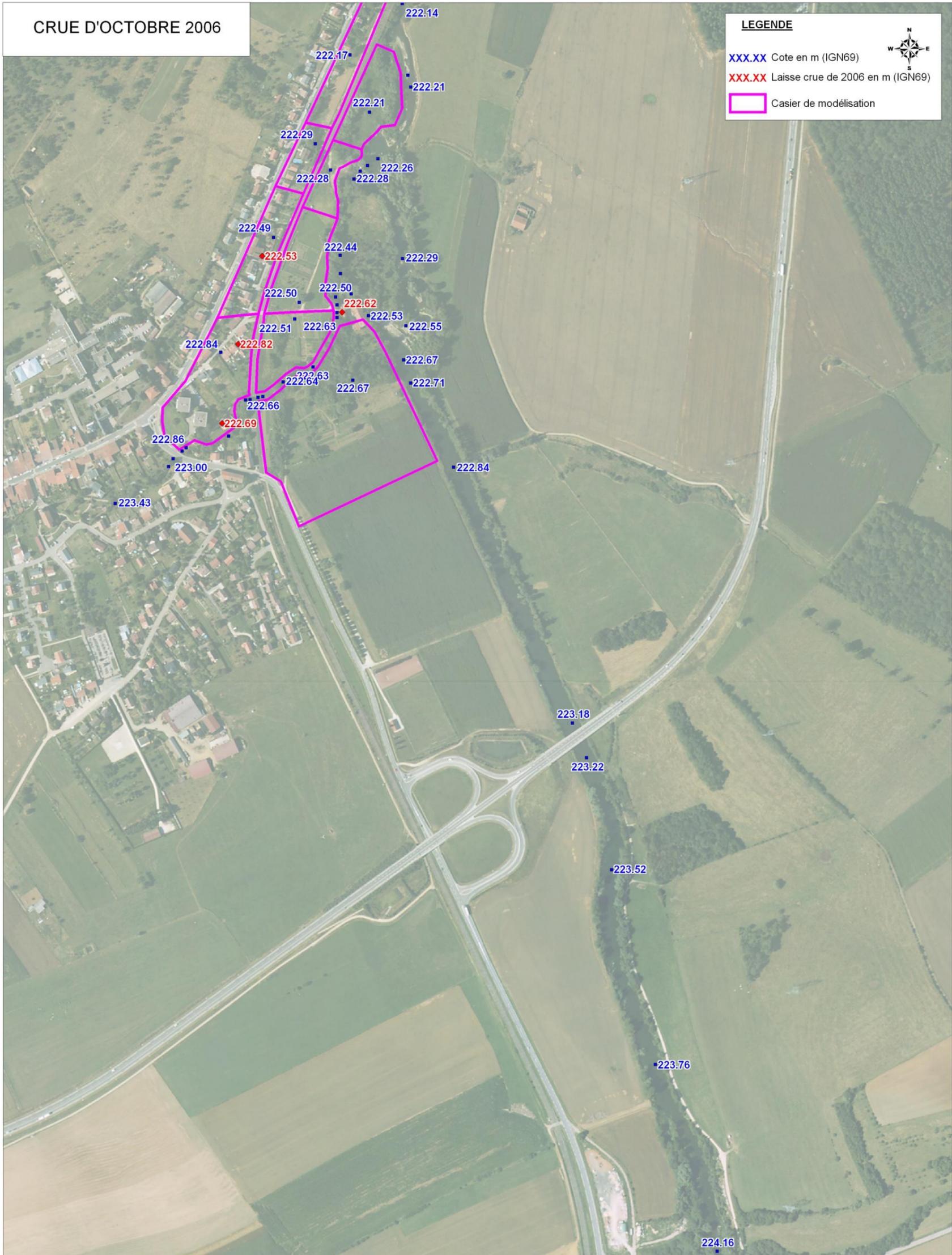
Annexe 10 : Carte de synthèse du diagnostic hydraulique sur la commune de Bainville-sur-Madon



Annexe 11 : Atlas cartographique des résultats des simulations numériques



CRUE D'OCTOBRE 2006



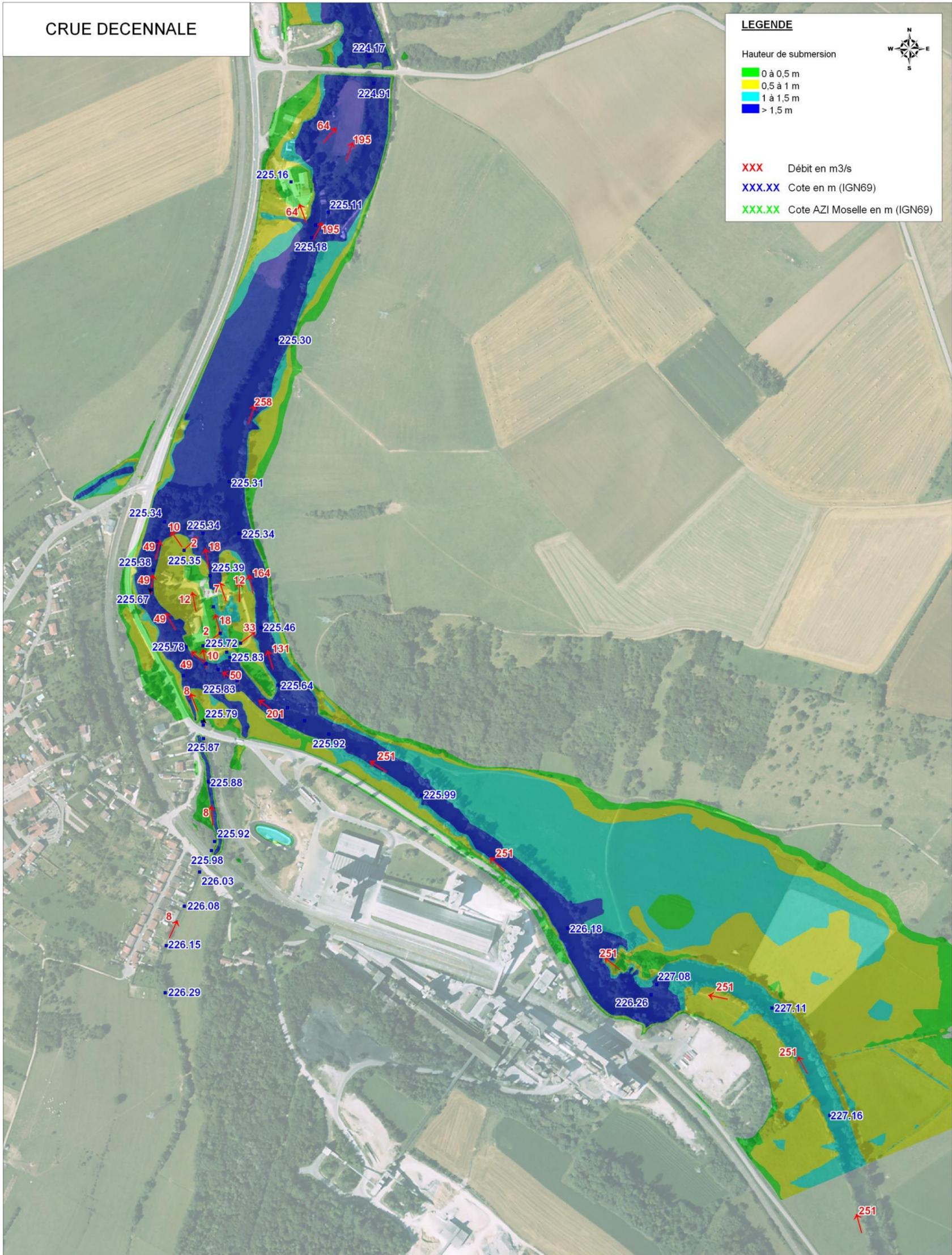
Maitre de l'ouvrage : Communauté de Communes Moselle & Madon Département : 54	MOE Lutte contre les inondations sur le territoire de la Communauté de Communes	N° Affaire : 4 63 1351	Etabli par : MGN	Vérifié par : SDN	N° Plan	Indice	Format
Maitre d'oeuvre/Bureau d'études AGENCE DE STRASBOURG 15 avenue de l'Europe - 67 300 SCHILTIGHEIM Tel : 03 88 04 04 00 Fax : 03 88 56 90 20 E-mail : strasbourg-s@artelagroup.com	RESULTATS DU CALAGE DU MODELE	Phase : AVP	Date : Mai 2012	Date : Mai 2012	Annexe 11	A	A3
		Echelle : 1/5000e	0 50 100 m		Planche 2		

CRUE D'OCTOBRE 2006



Maitre de l'ouvrage : Communauté de Communes Moselle & Madon Département : 54	MOE Lutte contre les inondations sur le territoire de la Communauté de Communes	N° Affaire : 4 63 1351	Etabli par : MGN	Vérifié par : SDN	N° Plan	Indice	Format
Maitre d'oeuvre/Bureau d'études AGENCE DE STRASBOURG 15 avenue de l'Europe - 67 300 SCHILTIGHEIM Tel : 03 88 04 04 00 Fax : 03 88 56 90 20 E-mail : strasbourg-s@artelagroup.com	RESULTATS DU CALAGE DU MODELE	Phase : AVP	Date : Mai 2012	Date : Mai 2012	Annexe 11	A	A3
		Echelle : 1/5000e	0 50 100 m		Planche 3		

CRUE DECENNALE



LEGENDE

Hauteur de submersion

- 0 à 0,5 m
- 0,5 à 1 m
- 1 à 1,5 m
- > 1,5 m

XXX Débit en m3/s

XXX.XX Cote en m (IGN69)

XXX.XX Cote AZI Moselle en m (IGN69)

Maitre de l'ouvrage : Communauté de Communes Moselle & Madon	MOE Lutte contre les inondations sur le territoire de la Communauté de Communes	N° Affaire : 4 63 1351	Etabli par : MGN	Vérifié par : SDN	N° Plan	Indice	Format
Département : 54		Phase : AVP	Date : Mai 2012	Date : Mai 2012	Annexe 11	A	A3
Maitre d'oeuvre/Bureau d'études AGENCE DE STRASBOURG 15 avenue de l'Europe - 67 300 SCHILTIGHEIM Tel : 03 88 04 04 00 Fax : 03 88 56 90 20 E-mail : strasbourg-s@artelagroup.com	CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES PAR UNE CRUE DECENNALE DU MADON	Echelle : 1/5000e	0 50 100 m	Planche 1			

CRUE DECENNALE



LEGENDE

Hauteur de submersion

- 0 à 0,5 m
- 0,5 à 1 m
- 1 à 1,5 m
- > 1,5 m

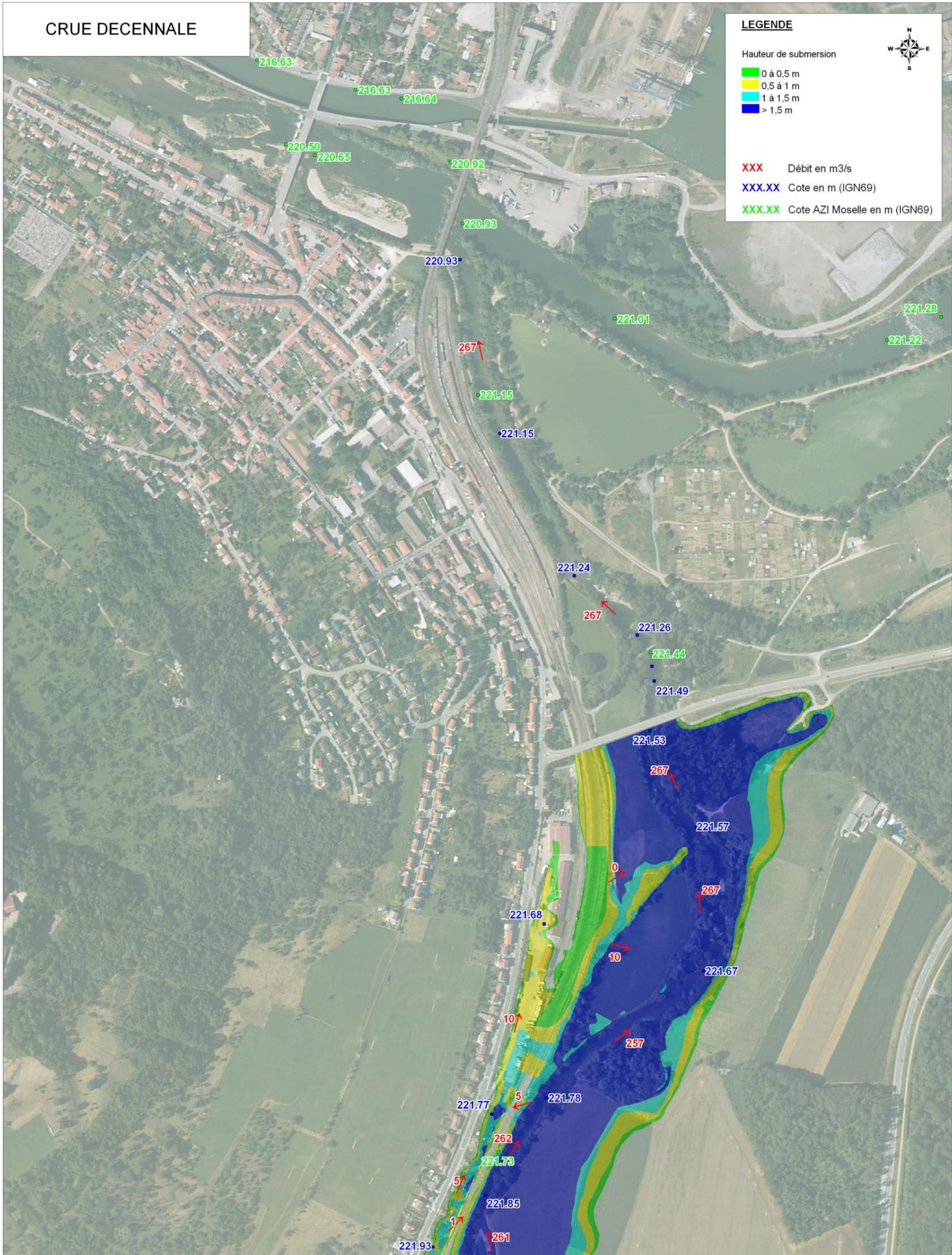
XXX Débit en m3/s

XXX.XX Cote en m (IGN69)

XXX.XX Cote AZI Moselle en m (IGN69)

Maitre de l'ouvrage : Communauté de Communes Moselle & Madon	MOE Lutte contre les inondations sur le territoire de la Communauté de Communes	N° Affaire : 4 63 1351	Etabli par : MGN	Vérifié par : SDN	N° Plan	Indice	Format
Département : 54		Phase : AVP	Date : Mai 2012	Date : Mai 2012	Annexe 11	A	A3
Maitre d'oeuvre/Bureau d'études AGENCE DE STRASBOURG 15 avenue de l'Europe - 67 300 SCHILTIGHEIM Tel : 03 88 04 04 00 Fax : 03 88 56 90 20 E-mail : strasbourg-s@artelagroup.com	CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES PAR UNE CRUE DECENNALE DU MADON	Echelle : 1/5000e	0 50 100 m	Planche 2			

CRUE DECENNALE



LEGENDE

Hauteur de submersion

- 0 à 0,5 m
- 0,5 à 1 m
- 1 à 1,5 m
- > 1,5 m

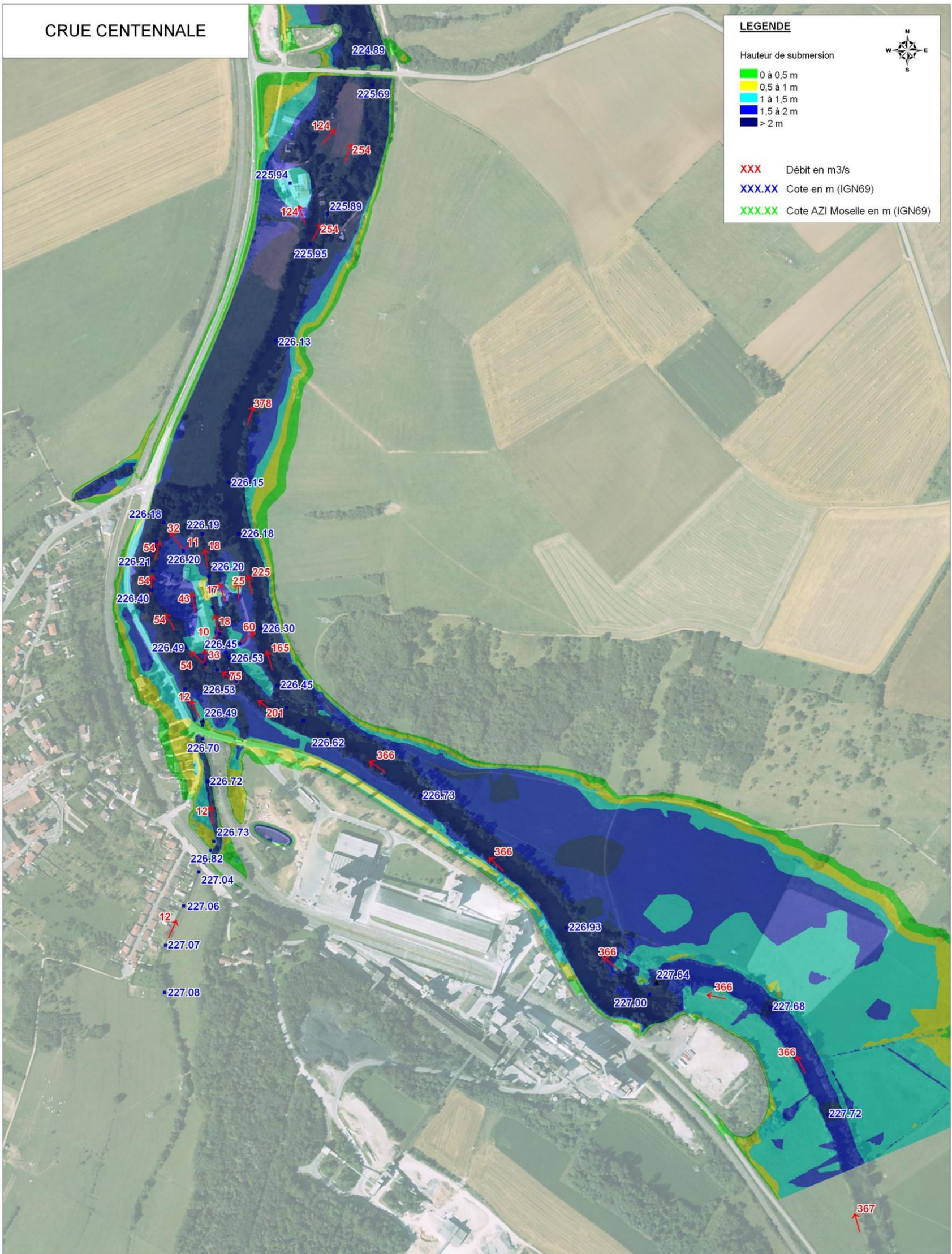
XXX Débit en m3/s

XXX.XX Cote en m (IGN69)

XXX.XX Cote AZI Moselle en m (IGN69)

Maitre de l'ouvrage : Communauté de Communes Moselle & Madon	MOE Lutte contre les inondations sur le territoire de la Communauté de Communes	N° Affaire : 4 63 1351	Etabli par : MGN	Vérifié par : SDN	N° Plan	Indice	Format
Département : 54		Phase : AVP	Date : Mai 2012	Date : Mai 2012	Annexe 11	A	A3
Maitre d'oeuvre/Bureau d'études AGENCE DE STRASBOURG 15 avenue de l'Europe - 67 300 SCHILTIGHEIM Tel : 03 88 04 04 00 Fax : 03 88 56 90 20 E-mail : strasbourg-s@artelagroup.com	CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES PAR UNE CRUE DECENNALE DU MADON	Echelle : 1/5000e	0 50 100 m	Planche 3			

CRUE CENTENNALE



LEGENDE

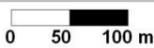
Hauteur de submersion

- 0 à 0,5 m
- 0,5 à 1 m
- 1 à 1,5 m
- 1,5 à 2 m
- > 2 m

XXX Débit en m3/s

XXX.XX Cote en m (IGN69)

XXX.XX Cote AZI Moselle en m (IGN69)

Maitre de l'ouvrage : Communauté de Communes Moselle & Madon	MOE Lutte contre les inondations sur le territoire de la Communauté de Communes	N° Affaire : 4 63 1351	Etabli par : MGN	Vérifié par : SDN	N° Plan	Indice	Format
Département : 54		Phase	AVP	Date : Mai 2012	Annexe 11	A	A3
Maitre d'oeuvre/Bureau d'études AGENCE DE STRASBOURG 15 avenue de l'Europe - 67 300 SCHILTIGHEIM Tel : 03 88 04 04 00 Fax : 03 88 56 90 20 E-mail : strasbourg-s@artelia.com		CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES PAR UNE CRUE CENTENNALE DU MADON	Echelle : 1/5000e		Planche 1		

CRUE CENTENNALE



LEGENDE

Hauteur de submersion

- 0 à 0,5 m
- 0,5 à 1 m
- 1 à 1,5 m
- 1,5 à 2 m
- > 2 m

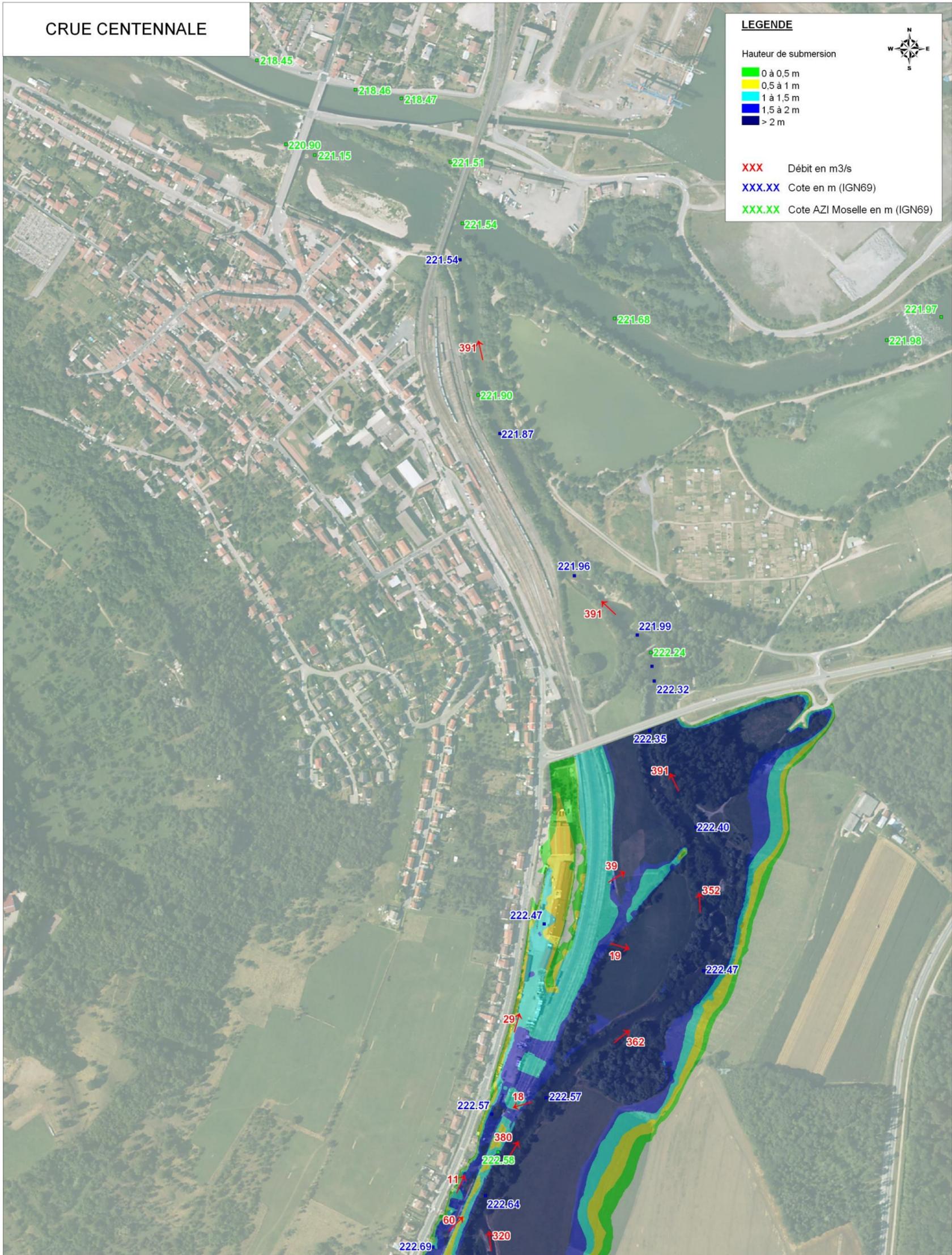
XXX Débit en m3/s

XXX.XX Cote en m (IGN69)

XXX.XX Cote AZI Moselle en m (IGN69)

Maitre de l'ouvrage : Communauté de Communes Moselle & Madon	MOE Lutte contre les inondations sur le territoire de la Communauté de Communes	N° Affaire : 4 63 1351	Etabli par : MGN	Vérifié par : SDN	N° Plan	Indice	Format
Département : 54		Phase	Date : Mai 2012	Date : Mai 2012	Annexe 11	A	A3
Maitre d'oeuvre/Bureau d'études AGENCE DE STRASBOURG 15 avenue de l'Europe - 67 300 SCHILTIGHEIM Tel : 03 88 04 04 00 Fax : 03 88 56 90 20 E-mail : strasbourg-s@artelia.com	CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES PAR UNE CRUE CENTENNALE DU MADON	Echelle : 1/5000e	0 50 100 m	Planche 2			

CRUE CENTENNALE



LEGENDE

Hauteur de submersion

- 0 à 0,5 m
- 0,5 à 1 m
- 1 à 1,5 m
- 1,5 à 2 m
- > 2 m

XXX Débit en m3/s

XXX.XX Cote en m (IGN69)

XXX.XX Cote AZI Moselle en m (IGN69)

Maitre de l'ouvrage : Communauté de Communes Moselle & Madon	MOE Lutte contre les inondations sur le territoire de la Communauté de Communes	N° Affaire :	4 63 1351	Etabli par :	MGN	Vérifié par :	SDN	N° Plan	Indice	Format
Département : 54		Phase	AVP	Date :	Mai 2012	Date :	Mai 2012	Annexe 11	A	A3
Maitre d'oeuvre/Bureau d'études AGENCE DE STRASBOURG 15 avenue de l'Europe - 67 300 SCHILTIGHEIM Tel : 03 88 04 04 00 Fax : 03 88 56 90 20 E-mail : strasbourg-s@artelagroup.com		CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES PAR UNE CRUE CENTENNALE DU MADON	Echelle :	1/5000e		Planche 3				

