

Chemin du Bel'Oiseau 12
Case postale 69
CH-2882 Saint-Ursanne

t +41 32 420 48 00
f +41 32 420 48 11
secr.env@jura.ch

Directive

Etablissement des cartes des cotes de protection en cas de crues et détermination de la revanche

Abréviation : ENV DN Cotes de protection - Revanche

Version et entrée en vigueur : 19 mai 2015

1 But

Partant du constat que les cartes de dangers crues sont destinées essentiellement à la planification territoriale, l'Office de l'environnement du Canton du Jura (ENV) et l'Établissement cantonal d'assurance (ECA Jura) ont souhaité développer un nouvel outil pour pouvoir statuer notamment sur des objets nécessitant protection. À cet effet, les cartes des « cotes de protection » ont été créées. Elles s'appuient avant tout sur les modélisations réalisées pour l'établissement des cartes des dangers.

En 2013, la commission pour la protection contre les crues (CIPC ou « Kommission für Hochwasserschutz » KOHS) publiait une méthode pour déterminer la revanche nécessaire pour assurer la capacité hydraulique des cours d'eau (cf. définition au point 1.1). Auparavant, il existait différentes approches pour fixer la revanche que ce soit pour dimensionner des ouvrages de protection ou lors de l'évaluation des dangers. Afin d'obtenir des résultats homogènes à l'échelle cantonale, l'ENV et l'ECA ont souhaité détailler les critères de détermination de la revanche en fonction des résultats attendus.

Ces directives sont subdivisées en deux parties :

- La première partie définit la méthodologie à appliquer pour calculer la « revanche » dans le cadre de la réalisation de projet de protection contre les crues (dimensionnement des ouvrages de protection). Elle détaille également les démarches à suivre pour l'établissement des cartes de cotes de protection. Elle doit, par conséquent, aussi être appliquée dans la mise à jour des cartes des dangers. La méthodologie proposée est basée sur les recommandations proposées par la KOHS.
- La deuxième partie est consacrée à la description des méthodes permettant de réaliser des cartes de cotes de protection en fonction de l'approche utilisée lors de l'élaboration des cartes de dangers (calcul 2D, 1D et analyse sans modélisation).

Les règles décrites dans ce document sont destinées aux bureaux d'ingénieurs amenés à réaliser des ouvrages hydrauliques, des cartes des cotes de protection ou des mises à jour des cartes des dangers crues sur le territoire cantonal de la République et Canton du Jura. Elles font parties intégrantes des exigences minimales fixées par les autorités cantonales de subventionnement.

1.1 Bases légales concernées

Confédération

- Loi du 21 juin 1991 sur l'aménagement des cours d'eau (LACE – RS 721.100) ;
- Loi du 5 octobre 1990 sur les subventions (LSu – RS 616.1) ;
- Ordonnance du 2 novembre 1994 sur l'aménagement des cours d'eau (OACE – RD 721.100.1) ;

Canton

- Loi du 26 octobre 1978 concernant l'entretien et la correction des cours d'eaux (LECE - RSJU 751.11) ;
- Loi du 29 octobre 2008 sur les subventions (LSubv - RSJU 621) ;
- Plan directeur cantonal: fiche n° 4.03 Dangers naturels.

2 Définitions

Les termes suivants sont définis comme suit :

- **Revanche nécessaire (f_e)** : hauteur verticale (en m relatif) qui désigne la marge de sécurité qui doit être appliquée par rapport à la ligne d'eau, afin de garantir une capacité d'écoulement déterminée par calcul.
- **Niveau d'eau** : altitude de la ligne d'eau selon les calculs hydrauliques de la carte des dangers. L'expression "cote d'eau" en est un synonyme.
- **Niveau d'énergie** : altitude de la ligne de charge (niveau d'eau + énergie cinétique) selon les calculs hydrauliques.
- **Cote de protection** : altitude (en m.s.m) à partir de laquelle un bâtiment est considéré comme protégé pour une crue avec temps de retour donné. Dans le cadre de cette étude, la cote de protection est égale au niveau d'eau « brute » + la revanche nécessaire.
- **Hauteur de protection** : hauteur relative par rapport au sol (en m relatif) au-delà de laquelle un bâtiment est considéré comme protégé.

2.1 La revanche

Lors de l'estimation de la capacité d'écoulement d'un cours d'eau ou en vue du dimensionnement d'ouvrages un lien direct avec l'hydraulique fluviale, une revanche doit généralement être prise en compte. Conformément à la définition de la KOHS (2013), la revanche décrit les incertitudes liées au calcul de la ligne d'eau, mais elle prend également en compte des processus tels que la formation de vagues et le remous sur des obstacles, ainsi que le transport de matériaux flottant.

Il est donc primordial que dans le cadre du dimensionnement des ouvrages de protection contre les crues, pour l'établissement des cotes de protection et les cartes de dangers crues, cette grandeur hydraulique soit prise en compte.

Pour les cartes de dangers, la revanche est prise en compte pour identifier les points faibles et éventuellement considérer des scénarios aggravants. Les exemples de la figure ci-dessous, illustrent comment la revanche peut être utilisée et les scénarios de danger peuvent être définis. Pour les cas A, la situation est claire il n'y a pas de risque de débordement. Pour les cas B, un scénario aggravant pourrait générer un débordement. Pour la digue, le scénario aggravant pourrait être un risque de débordement voire de rupture de digue si la digue est fragile. Pour le pont, le scénario aggravant classique sera le risque d'embâcle.

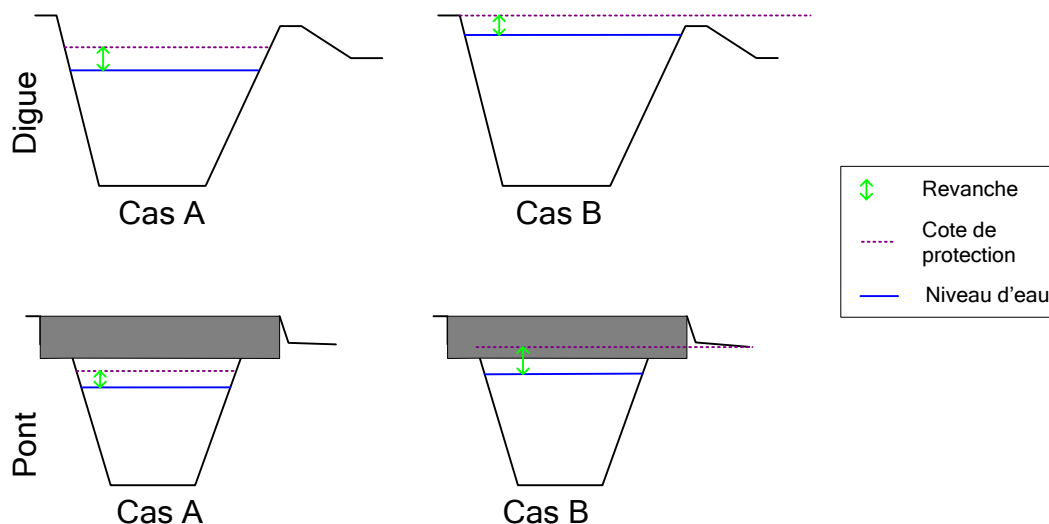


Figure 1: Exemple de définition des points faibles et scénario associé ou aggravant

Pour le dimensionnement des ouvrages de protection, tout comme pour les cartes de cote de protection, l'objectif visé est de garantir la robustesse des mesures proposées et de garantir un niveau hors d'eau. Ainsi la revanche répond à ce même objectif.

2.2 Les cartes de cote de protection

Les cartes de cotes de protection ont pour finalité d'aider les autorités à fixer les cotes de protection pour les crues centennales Q_{100} et tricentennales Q_{300} . Elles sont requises pour les nouveaux projets de construction ou de réaménagement d'un bâtiment existant, soumis à une procédure de permis de construire.

Ces cotes de protection s'appuient avant tout sur les résultats des cartes de danger. Elles permettent de travailler à l'échelle de la parcelle, soit le 1 : 1'000 (l'échelle de travail des cartes de danger est généralement 1 : 5'000). Dans le but de prendre en compte les différentes incertitudes et les simplifications liées à l'établissement de la carte de danger, l'intégration d'une revanche aux cotes brutes calculées s'avère nécessaire.

Ces incertitudes sont de natures diverses : incertitude du calcul hydraulique, incertitude sur les processus de vague et de vitesse et incertitude de cartographie. Pour tenir compte de celles-ci, il est souhaitable qu'une revanche soit prise afin de respecter les règles de l'art.

Les méthodes proposées ont été testées sur 3 sites types où les cartes d'intensité ont été déterminées par des approches différentes. Afin de pouvoir gérer les informations au niveau cantonal (géoportail) une base de données SIG a été définie.

Avant de réaliser la carte de cote de protection, une réflexion sur la qualité des données à disposition et du contexte topographique du secteur doit être menée, afin d'évaluer de manière critique l'opportunité de réaliser des cartes de cotes de protection et pour définir les exigences pour la réalisation de l'étude.

3 Méthodologie proposée pour la détermination de la revanche

La KOHS propose une recommandation pour une évaluation homogène de la revanche¹. La revanche, f , désigne la distance verticale entre le niveau de l'eau et le sommet d'une berge ou d'un ouvrage de construction hydraulique (par ex. barrage, digue), ou le bas d'un pont.

La revanche nécessaire, f_e , désigne la revanche devant être conservée afin de garantir une capacité d'écoulement déterminée par calcul.

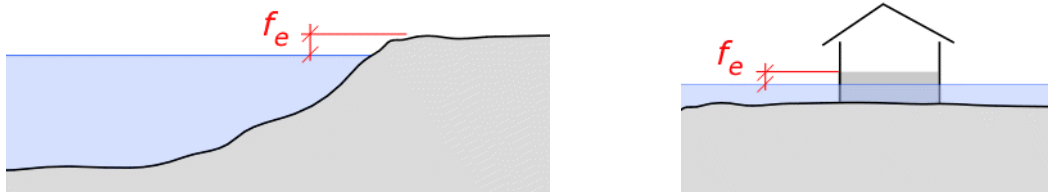


Figure 2 : Illustration de la revanche nécessaire (= f_e)

La revanche nécessaire est d'une part comprise comme une grandeur décrivant les *contours indécis* dans le calcul de la ligne d'eau sur une section transversale donnée, d'autre part il doit prendre en compte également des processus tels que la *formation de vague et la pression dynamique* sur des obstacles.

3.1 Calcul de la revanche nécessaire

La revanche nécessaire (f_e) est composée de différentes revanches partielles. Chaque revanche partielle prend en considération une des sollicitations suivantes :

$$f_{\min} \leq f_e = \sqrt{f_w^2 + f_v^2 + f_t^2} \leq f_{\max}$$

f_e = Revanche nécessaire ;

f_w = Revanche nécessaire due au contour indécis du calcul du niveau d'eau ;

f_v = Revanche nécessaire due à la formation des vagues et le remous aux obstacles ;

f_t = Revanche nécessaire pour un gabarit additionnel sous les ponts pour le matériel flottant. Pour les ouvrages f_t est une dimension fixe comprise entre 0.3 m et 1.0 m. Pour l'établissement des cotes de protection $f_t = 0$ m ;

f_{\max} = Revanche nécessaire maximale est fixée à 1.5 m ;

La revanche due aux incertitudes sur le calcul du niveau d'eau est calculée comme suit :

$$f_w = S_w = \sqrt{S_{wz}^2 + S_{wh}^2}$$

$\sigma_{wz} = 0.25$ m (estimation de la précision du MNT)

$\sigma_{wh} = 0.06 + 0.06 h$

¹ KOHS (2013): La revanche dans les projets de protection contre les crues et de l'analyse de dangers. Recommandations de la Commission pour la protection contre les crues (CIPC, ou KOHS : Kommission für Hochwasserschutz). «Wasser Energie Luft» – 105. Jahrgang, 2013, Heft 2, CH-5401 Baden, p.122-129.

La revanche pour la formation de vague et les remous contre un obstacle est égale au terme de vitesse dans le calcul de la charge de l'écoulement.

$$f_v = \frac{v^2}{2g}$$

3.2 Commentaire sur les valeurs partielles, minimales et maximales

Les revanches partielles déterminantes sont f_w (car le niveau d'eau est imprécis en raison des incertitudes sur le calcul hydraulique et le terrain) et f_v (car la façade d'un immeuble, à l'amont de l'écoulement, peut produire un remous).

La revanche f_t (revanche pour le matériel flottant) n'est déterminante que pour les ouvrages de franchissement (problématique du bois flottant).

Pour permettre une meilleure lisibilité et prendre en compte les différentes incertitudes de calcul, les revanches nécessaires f_e seront arrondies à 0.1 m.

Pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques, la revanche nécessaire minimale est fixée à 0.3 m conformément à la recommandation de la KOHS (2013). Une valeur maximale est également proposée, mais elle peut être ajustée en fonction du contexte local.

Pour la réalisation des cartes de cotes de protection et de dangers, aucune revanche minimale n'est proposée, car c'est la qualité des données topographiques utilisées dans le modèle hydraulique qui permet généralement de définir cette valeur. En général, les calculs hydrauliques réalisés pour l'établissement des cartes de dangers s'appuient sur le modèle numérique de terrain dont la précision est de 25 cm. Si des relevés topographiques détaillés sont disponibles, la revanche peut être revue à la baisse (f_t).

4 Méthodologie pour la réalisation des cartes de cotes de protection

4.1 Secteurs avec modélisation 2D

4.1.1 Description des données de base et approche utilisée

Les modélisations 2D se basent sur un maillage plus ou moins dense. En chaque maille, les résultats hydrauliques sont disponibles. Les valeurs maximales de hauteur et vitesse ont été utilisées pour déterminer les cartes d'intensité. Ces mêmes valeurs seront utiles pour établir la carte de cote de protection et calculer la revanche requise selon les formules du chapitre 3.

En général le MNT (modèle numérique de terrain) sert de base pour réaliser le modèle 2D. Il est admis que la précision moyenne du MNT en ce qui concerne l'altitude est de 0.25 m (σ_{wz}). Les autres facteurs à prendre en compte dans la revanche sont calculés en chaque point sur la base des hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement. La revanche requise est additionnée au niveau d'eau brut calculé. Ainsi on obtient pour chaque nœud de la grille une cote de protection. Si plusieurs scénarios partiels interviennent sur un même secteur, une opération supplémentaire est nécessaire qui consiste à prendre la valeur la plus haute des scénarios partiels.

L'ensemble des mailles représente des points de densités potentiellement non homogènes constituant une surface virtuelle de cote de protection. Sur cette base, on calcule par triangulation des isolignes à chaque 0.25 m. Le résultat étant issu d'une modélisation brute (et non avec interprétation), il doit être adapté et modifié par lissage à la main.

4.1.2 Démarche élaborée pour la cartographie des cotes de protection sur la base des calculs hydrauliques 2D

1. Identifier si une "marge de sécurité" a déjà été intégrée entre le calcul hydraulique 2D et la cartographie de danger. Si cette revanche est équivalente à celle décrite au chapitre 3, le résultat est pris sans revanche supplémentaire. Si la "marge de sécurité" est inférieure à la revanche décrite ci-dessus, une réflexion au cas par cas est nécessaire avec pour objectif de rester dans les règles de l'art.

Pré-traitement, pour l'obtention des résultats bruts :

2. Pour chaque scénario, exporter les points de calculs (XY) avec les résultats – soit les valeurs de hauteur (h) et vitesse (v) – à partir du logiciel de calcul modèle 2D ;
3. Dans un tableur (ou par un outil SIG), calculer pour chaque point, niveau d'eau, la revanche requise (f_e) selon la méthodologie décrite au chapitre 3, et la cote de protection.

Génération des isolignes à l'aide d'un logiciel SIG :

4. Importer les points de calculs bruts sur la base du fichier issu du tableur décrit ci-dessus ;
5. Éliminer les valeurs absurdes déjà identifiées ;
6. Trianguler les points entre eux pour générer une surface de type Raster (matrice de valeur) ou TIN (réseaux triangulés irréguliers) ;
7. Générer les courbes de niveau ou isolignes selon la distance requise (en général tous les 25 cm) ;
8. Couper les isolignes selon l'extension de la carte d'intensité ;
9. Nettoyer et lisser le résultat brut à la main et suite à la visite de terrain ;
10. Vérifier la cohérence du résultat avec le MNT et valider sur site si besoin ;
11. Vérifier la cohérence entre les cartes d'intensité et les cotes de protection; adapter les couches d'intensité si nécessaire. La cohérence de ces différents produits est très importante, il n'est toutefois pas exigé de garantir des produits identiques. Il est par exemple possible que dans la zone à la limite entre l'intensité faible et moyenne, la hauteur de protection soit supérieure à 50 cm.

Un exemple sur un cas pratique est illustré à l'annexe 2. Il présente l'approche 2D avec quelques commentaires sur les résultats, en mettant en évidence les points clés dans l'application de la méthode.

4.2 Secteurs avec modélisation 1D

4.2.1 Description des données de base et approche utilisée

La modélisation 1D donne des résultats bruts pour chaque profil analysé à travers la rivière.

Selon le logiciel utilisé, une décomposition de la vitesse moyenne de la rive gauche, du chenal et de la rive droite est possible (15-30 points de vitesse par profil en travers par exemple). Cette décomposition est une approximation plus ou moins bonne selon la situation d'écoulement de la propagation en lit majeur. Suite à des tests préliminaires il est préconisé d'utiliser les valeurs moyennes de hauteur d'eau et vitesses de l'ensemble du profil en travers (sans distinction lit-mineur/majeur,...).

Si le débordement se déconnecte du cours d'eau, la propagation devra soit se faire à l'aide de la modélisation 1D du chenal de débordement, soit à l'aide de l'approche « sans modélisation » décrite ci-après.

Dans la phase préparatoire, il est à mentionner que les profils en travers doivent être géoréférencés. La position exacte des profils en travers permet de gagner en précision de manière à valoriser au mieux les modélisations. En cas d'utilisation du logiciel HEC RAS, l'outil RAS Mapper et l'extension ArcGIS HEC GEORAS facilitent les étapes de prétraitement nécessaires pour l'obtention d'une surface de cote de protection.

4.2.2 Démarche élaborée pour la cartographie des cotes de protection sur la base des calculs hydrauliques 1D

La méthodologie pour la cartographie des cotes de protection pour les calculs hydrauliques 1D est la suivante :

1. Identifier si une "marge de sécurité" a déjà été intégrée entre le calcul de propagation et la cartographie de danger. Si cette "marge de sécurité" est équivalente à celle décrite au chapitre 3, le résultat est pris sans revanche supplémentaire. Si la "marge de sécurité" est inférieure à la revanche décrite ci-dessus, une réflexion au cas par cas est nécessaire avec pour objectif de rester dans les règles de l'art.

Pré-traitement :

2. Dans le logiciel hydraulique, exporter la vitesse moyenne de l'écoulement et la profondeur hydraulique, ainsi que la cote ;
3. Lisser éventuellement les niveaux d'eau sur les profils en travers où le calcul semble imprécis, de manière à avoir une adéquation entre la cartographie des dangers et la cote d'inondation ;
4. Calculer la revanche requise et les cotes de protections effectuées par profil en travers soit dans un tableur (type Excel), ou directement dans l'outil SIG.

Génération des isolignes à l'aide d'un logiciel SIG

5. Importer/créer des profils en travers dans la couche « paramINO_* » (cf. §4.1). Il s'agit d'importer ou de créer uniquement les profils en travers qui permettent une bonne interpolation des niveaux d'inondation, selon la manière de cartographier les inondations utilisée dans l'étude des cartes des dangers ;
6. Un TIN ou Raster des cotes de protection est produit par interpolation des données importées dans la couche « paramINO_* ». Des isolignes sont produites (par méthode des contours) en intervalle de 25 cm ;
7. Générer l'enveloppe de la zone d'inondation ;
8. Découper les isolignes selon l'extension de la zone inondée.

Lisser manuellement les cotes de protection pour qu'elles correspondent aux processus en jeu. Vérifier la cohérence entre la carte d'intensité et les cotes de protection; modifier les cartes d'intensité si nécessaire et la carte des dangers. Une attention particulière pour le lissage est requise pour les zones de confluence. La cohérence de ces différents produits est très importante, il n'est toutefois pas exigé de garantir des produits identiques. Il est par exemple possible que dans la zone à la limite entre l'intensité faible et moyenne, la hauteur de protection soit supérieure à 50 cm.

Mise en forme du rendu

9. Renseigner les profils en travers, les cotes de protection et les étiquettes pour les différents scénarios dans les couches appropriées de la géodatabase (cf. §4.6.1) ;
10. Ajuster l'emplacement des étiquettes ;
11. Mettre en format la carte et imprimer ;
12. Remplir les tables attributaires de la géodatabase ;
13. Si besoin, valider sur le terrain (d'entente avec le maitre d'ouvrage).

Astuces

14. Une vérification manuelle de la cohérence des cotes de protection est souhaitable. Il faut vérifier que la cote de protection est bien au-dessus du niveau du terrain et que les isolignes décroissent en allant vers l'aval ;
15. Si l'isoligne à l'amont ou à l'aval est loin du bord de la zone d'inondation, une isoligne est créée au bord pour faciliter la lecture ;
16. Des étiquettes pour les isolignes sont générées pour faciliter la lecture de la carte sans trop la charger.

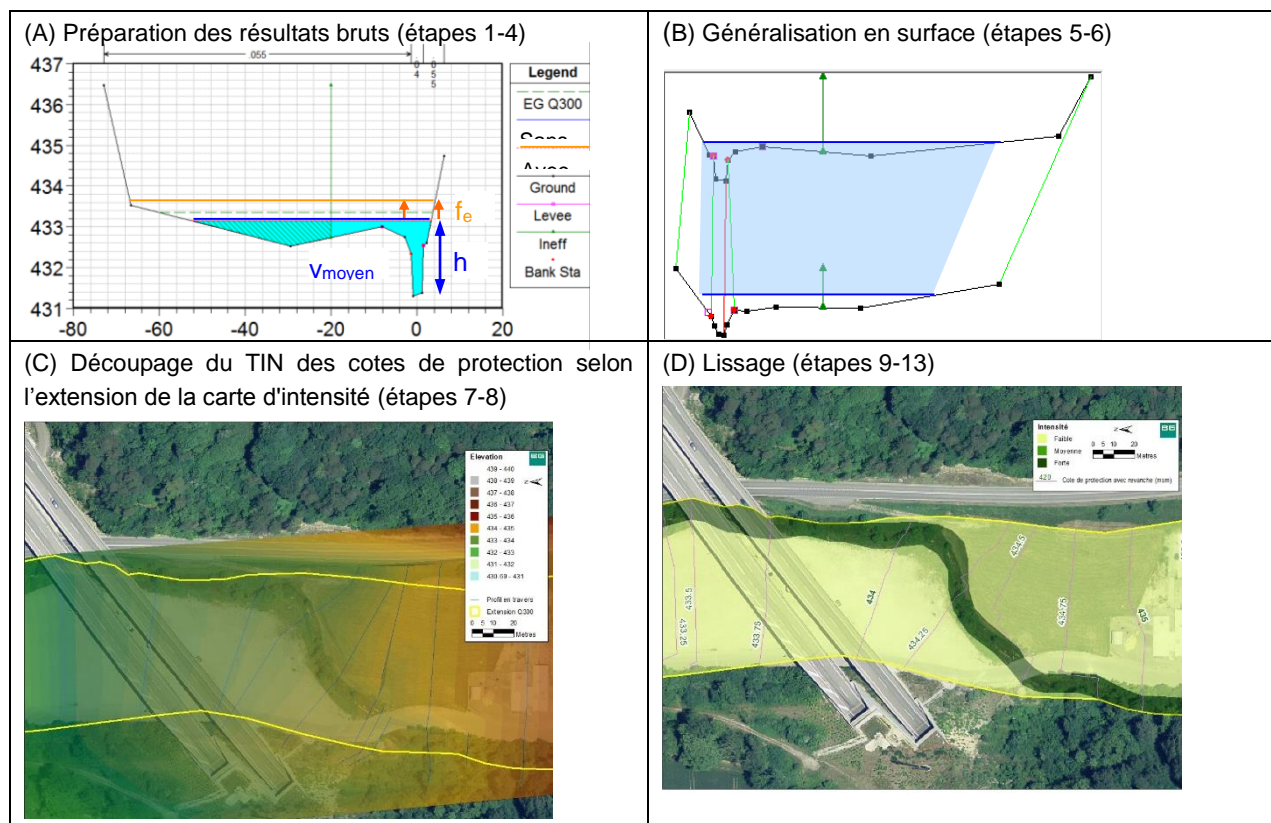


Figure 3: Description des différentes étapes pour aboutir à la cartographie de cote de protection

Un exemple détaillé est disponible à l'annexe 3. Il présente l'approche 1D commentant les résultats, et en mettant en évidence les points clés de l'application de la méthode.

4.3 Secteurs sans modélisation

Attention cette approche permet de donner une indication. Toutefois elle est souvent très conservatrice au vu des incertitudes en jeu.

4.3.1 Description des données de base et approche utilisée

La cartographie des dangers dans les secteurs cartographiés sans modélisation, avec une « approche de terrain », se base en principe sur le déroulement suivant :

- Détermination du débit débordé Q [m^3/s] sur la base d'une approche simple (Strickler) ;
- Calcul du débit spécifique q [$m^3/s \cdot m$] à différents points. Cette valeur équivaut à l'intensité d'inondation $v \cdot h$.

Dans ces secteurs, on ne connaît pas les conditions d'écoulement hydraulique en détail, si le produit $v \cdot h$ est connu, on ne connaît ni la vitesse ni la hauteur d'eau. On ne peut donc pas calculer la revanche tel que présenté au chapitre 3 sans devoir faire un important travail pour déterminer la pente locale, le coefficient de frottement (Strickler) est ainsi v et h .

Une analyse paramétrique de la hauteur de protection en fonction de la pente du terrain a été effectuée. On n'observe pas de tendance qui permettrait de relier directement la hauteur de protection à la pente ou à l'intensité.

Il est donc proposé de simplifier l'approche à l'aide de classes de hauteur de protection en fonction de l'intensité d'inondation. Les limites de classes sont les suivantes :

Intensité q [m^2/s]	Hauteur de protection [m]
$q > 0$	0.3 m (à la limite de l'intensité faible, erreur sur MNT et hauteur d'eau)
$q = 0.5$	0.6
$q = 1$	0.9
$q = 2$	1.3
$q > 2$	A déterminer au cas par cas

Tableau 1 : Hauteur de protection en fonction de l'intensité d'inondation

Entre ces valeurs, la hauteur de protection est interpolée. Attention, dans ce cas, c'est la hauteur de protection qui est déterminée et non la revanche seule.

La classe d'intensité moyenne au sens des cartes des dangers (soit $0.5 < q \leq 2$) est séparée en 2 classes car elle est trop étendue. Ceci permet d'éviter de trop surestimer la hauteur de protection.

La classe d'intensité $q=0$ ne s'applique que sur la limite entre la zone d'intensité faible et la zone non inondée selon la carte des dangers. Les 0.3 m de hauteur de protection représentent l'erreur sur le MNT et le calcul de la hauteur d'eau selon la KOHS.

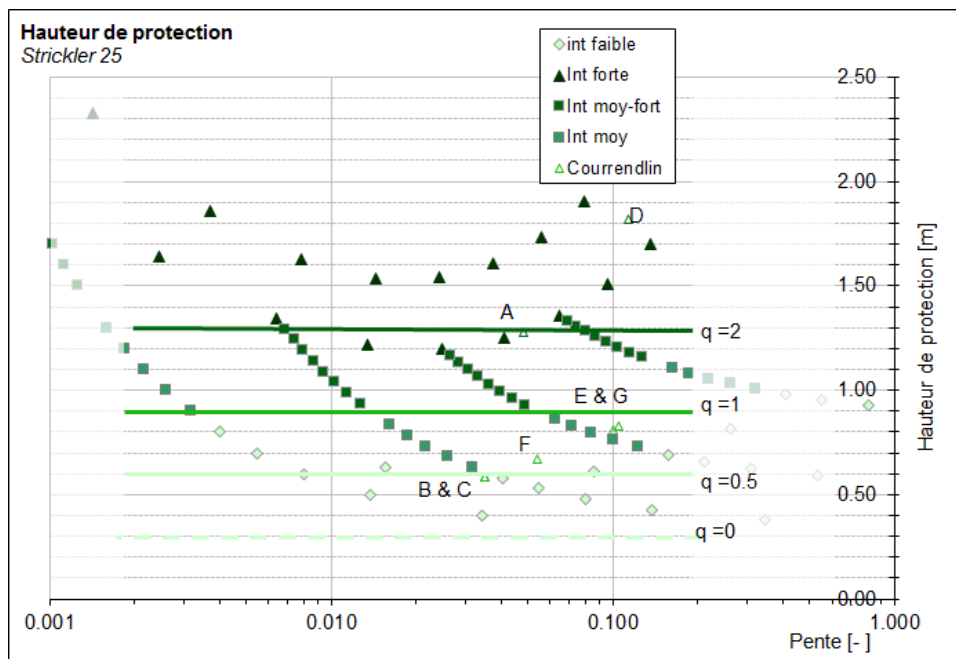


Figure 4 : Hauteur de protection en fonction de la pente et de l'intensité d'inondation (pour un coefficient de Strickler de 25)

Pour cette approche en particulier, il est souhaitable de ne pas surenchérir les revanches : si durant la cartographie des dangers une marge de sécurité équivalente à la revanche, telle que présentée au chapitre 3 est intégrée, il n'est pas souhaitable d'ajouter une revanche supplémentaire pour le calcul de la cote de protection.

4.3.2 Démarche

La démarche suivante est proposée :

1. Identifier si une revanche a déjà été intégrée entre le calcul et la cartographie de danger. Si cette revanche est équivalente à celle décrite au tableau 1, le résultat est pris sans revanche supplémentaire. Si la revanche est inférieure à la revanche décrite ci-dessus, une réflexion au cas par cas est nécessaire avec pour objectif de rester dans les règles de l'art ;
2. Choisir les points de calcul, en principe sur les limites d'intensité et aux endroits caractéristiques et les saisir dans la couche " paramINO_* " ;
3. Déterminer q pour chacun des points et en tirer la hauteur de protection ;
4. Calculer la cote de protection sur la base du MNT ;
5. Tracer les isolignes des cotes de protection dans le secteur inondé selon la carte d'intensité ;
6. Renseigner la géodatabase et établir les cartes.

Un exemple détaillé est disponible à l'annexe 4. Il présente l'approche sans modélisation commentant les résultats, et en mettant en évidence les points clés de l'application de la méthode.

4.4 Synthèse des approches

Les approches proposées sont les suivantes :

Carte des dangers	Détermination des cotes de protection en bref	Remarques
2D	Les logiciels de calcul 2D donnent des résultats (raster ou grille de points) avec la vitesse et la hauteur d'eau en tout point du modèle. Sur cette base la revanche est calculée et additionnée à la cote du « plan d'eau » pour donner la cote de protection.	Facile et rapide à mettre en œuvre Le secteur considéré est en général bâti, → l'intérêt de réaliser la carte est donc fort.
1D	Sur la base de la hauteur d'eau et de la vitesse moyenne sur les sections de calcul, on calcule la revanche qui est additionnée à la cote de la ligne d'eau pour donner la cote de protection.	Les résultats sont bons si la vallée est bien marquée. Pour les vallées relativement raides (pente > 8%) des intervalles de 0.25 m peuvent donner des cartes illisibles. Attention dans les secteurs où l'écoulement dans la plaine est approché sur la base du calcul 1D. Un ajustement "à la main" des zones de confluence est nécessaire.
Sans modélisation	Des classes de hauteur de protection sont données en fonction du débit spécifique basé sur la carte d'intensité. Ces hauteurs sont additionnées à l'altitude du terrain en différents points de la zone inondée.	L'application de la méthode nécessite une bonne connaissance du terrain et des phénomènes. Tout le processus se base sur le choix des points de calcul et la détermination du débit spécifique. La méthode donne des résultats souvent très conservatifs. Dans ce cas en particulier, il est conseillé de veiller à ne pas cumuler les revanches.

Tableau 2 : Synthèse des approches décrites

Une interprétation des résultats selon la "méthode sans modélisation" doit être réalisée aux interfaces entre deux méthodes de calcul ou deux modèles différents. Il en va de même si la carte d'intensité est la combinaison de plusieurs processus.

Le tableau suivant présente la fiabilité des cartes des hauteurs d'eau.

Méthode de calculs	Topographie	Fiabilité de la carte des hauteurs d'eau
2D fin Mailles fines, ligne de ruptures		Très bonne
2D grossier Basé sur le MNT brut, mailles grossières de calcul		Moyenne à bonne
1D pseudo 2D (1D dans le chenal et autre 1D en plaine avec calcul de l'échange de débit entre les deux)	Débordement déconnecté du cours d'eau	Moyenne à bonne
1D	Secteur plat	Moyenne
1D	Fond de vallée encaissée	Moyenne à bonne
Sans modélisation		Faible

Tableau 3 : Évaluation de la fiabilité des résultats

4.5 Visites de terrain

Des visites sur le terrain permettent de vérifier la plausibilité cartographique. Ces visites ne permettent par contre pas de vérifier ou de valider les hauteurs d'eau, mais elles permettent de s'assurer de la cohérence des zones cartographiées avec la réalité du terrain. Le cas échéant, des modifications d'extension des inondations ou des réserves sur la carte des cotes de protection peuvent être faites. Ces visites permettent avant tout d'identifier les erreurs grossières. Un rendu concis sous forme de compte-rendu est demandé pour présenter les modifications apportées suite à la visite de terrain, dans la fiche de métadonnées (cf. annexe 1).

4.6 Formalisation du rendu

4.6.1 Structuration des géodonnées

Le rendu SIG se concentre dans une base de données. La structuration des géodonnées ci-contre s'inscrit en coordination avec la géodatabase des cartes des dangers et avec le projet d'audition des directives techniques des « Géodonnées de base relevant du droit de l'environnement, Modèle de données pour la cartographie des dangers » (OFEV 2011). Les différentes couches sont sommairement décrites ci-dessous.

Les résultats de hauteurs d'eau sont renseignés dans une base de données indépendante, elle est renseignée uniquement si l'approche 2D est utilisée.

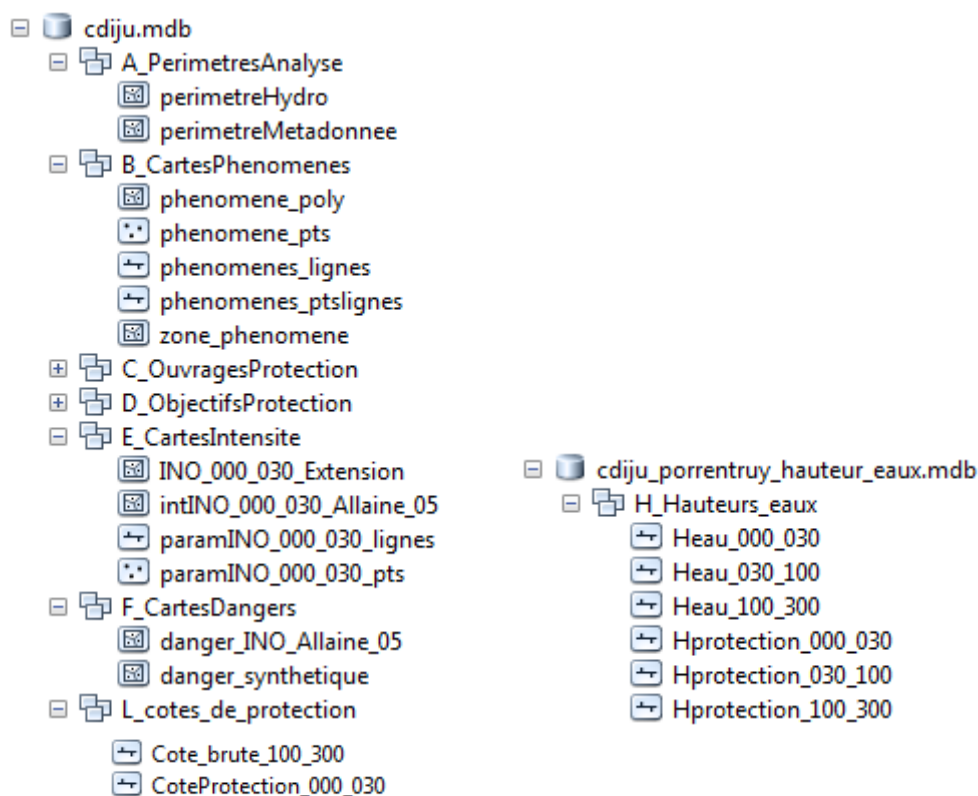


Figure 5: Structure des géodonnées (droite : données ; gauche : complément en cas de 2D)

A) Périmètre analyse		
	perimetreMetadonnee	Identification du périmètre d'étude en distinguant par type d'approche (2D/1D/terrain) – correspond au périmètre décrit dans les fiches de métadonnées
E) Carte d'intensité		
	intINO_XXX_XXX	Rappel des cartes d'intensité avec les éventuelles adaptations par scénario
	INO_XXX_XXX_Extension	Extension maximale pour le temps de retour concerné
	paramINO_XXX_XXX	Renseignent les résultats hydrauliques bruts (h=ProfondeurINO, v=VitesseINO) et les valeurs hydrauliques dérivées nécessaires pour le calcul de la revanche requise (niveau d'eau=CoteINO, revanche requise=RevancheFe, cote de protection=CoteProtINO). Ces couches sont en format « polylignes » ou « points ». Résultats bruts: 2D ou terrain = points de calculs 1D = profil en travers (polylignes)
F) Carte Danger		Rappels des cartes de danger avec les éventuelles adaptations par scénario
L) Cotes_de_protection		Isolignes (écart entre 25-50cm selon l'approche et pente) sous forme de « polylignes »
	Cote_brute_XXX_XXX	Niveau d'eau (sans revanche) pour le temps de retour concerné
	CoteProtection_XXX_XXX	Cote de protection (avec revanche) pour le temps de retour concerné

Données_techniques :

H) Hauteurs_eau	Isolignes (écart entre 25-50cm selon l'approche et pente) sous forme de « polyignes » À renseigner uniquement pour l'approche 2D
Heau_XXX_XXX	Hauteur d'eau (sans revanche) pour le temps de retour concerné
Hprotection_XXX_XXX	Hauteur de protection (avec revanche) pour le temps de retour concerné

4.6.2 Rendu Cartographique

Le cadre suivant est proposé :

- Echelle : 1:1'000 ou 1:5'000 en fonction de la lisibilité des courbes de niveau ;
- Format : A3 ;
- Equidistance : 25 cm en général sauf pour l'approche "sans modélisation" et pour les secteurs à forte pente l'équidistance est alors de 50 cm.

Le rendu cartographique à réaliser se présente comme suit :

- Cartes des cotes de protection avec revanche, rendu avec post-traitement (lissage) ;
- Cartes des cotes de protection sans revanche (rendu brut sans post-traitement) ;
- Cartes des dangers (si adaptées) ;
- Cartes des intensités (si adaptées) ;
- Les couches de travail (MNT de cote de protection, TIN, résultats bruts,...), afin d'optimiser la traçabilité des résultats.

4.6.3 Métadonnées

Pour déterminer la cote de protection, la fiche de métadonnées doit être documentée (cf. annexe 1). Cette fiche a pour but de décrire la qualité des différentes données à l'origine des cartes de danger, ainsi que les données utilisées pour interpoler les cotes de protection. Elles sont les suivantes:

- Topographie du cours d'eau : base du calcul hydraulique ;
- Topographie de terrain : base de la propagation d'inondation ;
- Hydrologie : étude permettant la détermination des débits de projet ;
- Hydraulique et carte de danger.

Au-delà de la qualité des données de base, chaque bureau utilise des approches qui lui sont propres pour retranscrire le résultat hydraulique en cartographie des dangers. La partie "hydraulique et carte de danger" sert à documenter les choix méthodologiques pour les différentes étapes de la démarche.

Dans le cadre d'un calcul hydraulique brut, il est probable qu'une "marge de sécurité" ait été prise dans la détermination du scénario et des dimensions hydrauliques de celui-ci. Cette marge de sécurité est indépendante de la revanche prise en compte dans la propagation du débordement.

En ce sens, si dans la cartographie de danger, une "marge de sécurité" a déjà été prise en compte par rapport au résultat hydraulique brut dans les zones inondées/inondables et que cette "marge de sécurité" est équivalente à la revanche décrite précédemment, alors l'ajout d'une revanche supplémentaire pour le calcul de cote de protection est caduque. Si par contre, la "marge de sécurité" appliquée pour la cartographie est inférieure à la revanche requise décrite ci-dessus, une réflexion au cas par cas est nécessaire pour adapter la méthodologie de calcul de revanche. Toute modification / adaptation de cette méthodologie doit être clairement justifiée dans la fiche de métadonnées.

5 Mise à jour des cartes des dangers

En général, la réalisation des cartes des cotes de protection permet une analyse plus fine de la situation de danger. Dans certains cas, l'analyse des modélisations antérieures peut conduire à une nouvelle interprétation des résultats, grâce notamment à une analyse détaillée de la situation sur le terrain.

Dans le cas où de nouvelles données topographiques sont disponibles, il est nécessaire d'ajuster le modèle pour obtenir des cartes qui correspondent au plus près de la réalité du terrain.

Afin d'obtenir des cartes cohérentes à l'échelle cantonale, il est indispensable que l'ensemble des données relatives aux dangers suivent le processus suivant :

1. Réalisation des cartes des **cotes de protection** sur la base de modélisations existantes ou de nouvelles modélisations ;
2. Mise à jour ou validation des **scénarios** de dangers existants par secteur ;
3. Mise à jour ou validation des cartes des **intensités** existantes par secteur et pour tous les temps de retour ;
4. Mise à jour ou validation des cartes des **dangers** existantes par secteur.

Ces différentes analyses nécessiteront une mise à jour systématique de la base de données cantonale SIG.

6 Conclusions et recommandations

Les méthodologies pour la détermination de la revanche et le calcul des cotes de protection présentées dans ce document se basent sur les approches hydrauliques actuellement utilisées par la majeure partie des bureaux d'ingénieurs. Des adaptations aux méthodologies présentées ici peuvent être apportées dans le cadre de la réalisation d'études spécifiques, mais elles doivent être discutées préalablement avec ENV, puis décrites et justifiées au cas par cas.


Jacques Gerber
Chef d'Office




Sandrine Schmidt
Collaboratrice scientifique

Annexe 1 : Fiche de métadonnées – Cote de protection

Cours d'eau :		Commune :	Localité :
Pk amont :	Pk aval :	Scénario CD :	

Données de base

Topographie cours d'eau	Secteur			
	Source de données utilisées			
	Année			
	Méthode utilisée			
	Densité de données de base	Nb profils en travers / km linéaire	Nb profils en travers / km linéaire	Nb profils en travers / km linéaire
	Date des relevés des profils en travers			
	Précision des données de base	¹ bon (±1 à 5 cm) ¹ moyen (±5 à 25 cm) ¹ faible (> 30 cm) ± cm	¹ bon (±1 à 5 cm) ¹ moyen (±5 à 25 cm) ¹ faible (> 30 cm) ± cm	¹ bon (±1 à 5 cm) ¹ moyen (±5 à 25 cm) ¹ faible (> 30 cm) ± cm
	Auteur / référence			

Topographie terrain	Donnée source ⁽¹⁾			
	Année			
	Validation de terrain			
	Concordance donnée / terrain observée			
	Précision de la donnée	± cm		
	Auteur / référence			

Hydrologie	Données historiques existantes (mention de la station de mesure)			
	Méthodologie de détermination des débits de projet			
	Précision estimée du débit de projet Q ₁₀₀	¹ bon (± 25%) ¹ moyen (± 50%) ¹ faible (±100%) ± m ³ /s	¹ bon (± 25%) ¹ moyen (± 50%) ¹ faible (±100%) ± m ³ /s	¹ bon (± 25%) ¹ moyen (± 50%) ¹ faible (±100%) ± m ³ /s
	Auteur / référence			

Calcul hydraulique	Méthodologie de calcul dans le cours d'eau			
	Méthode de calage			
	Méthodologie de calcul pour la propagation en zones inondées			
	Auteur / référence			

Carte de danger	Prise en compte d'une revanche entre calcul brut et cartographie	
	Si oui, quelle revanche déjà intégrée?	
	Auteur / référence	

Remarques	
------------------	--

Cartographie des cotes de protection

Calcul de la cote de protection	Choix de l'approche (plusieurs réponses possibles)	¹ 2D ¹ 1D	¹ 1D pseudo 2D ¹ Sans modélisation ¹ terrain
	Explication en cas de plusieurs méthodologies		
	Méthode de calcul de la revanche	¹ Revanche selon méthodologie cantonale ¹ Autre : _____	
	Disponibilité des couches de travail (TIN / GRID généré pour les contours)	¹ oui	¹ non

Topographie terrain pour les cotes de protection	Données topographiques utilisées pour la cartographie de cote de protection	¹ Identiques aux données de base utilisées pour les cartes de danger ¹ Différentes des données de base utilisées pour les cartes de danger :	
	<i>Si données différentes renseigner les champs suivants:</i>		
	Donnée source ⁽¹⁾		
	Année		
	Validation de terrain		
	Concordance donnée / terrain observée		
	Précision de la donnée	±	cm
Auteur			

Remarque :	
-------------------	--

Annexe 2 : Exemple - approche 2D

Données de base - carte d'intensité Q_{300} de la Birse à Courrendlin

Pour le cas de la Birse à Courrendlin, la crue de fréquence rare Q_{300} a été utilisée pour développer la méthodologie "cote de protection modèle 2D". Lors de l'élaboration de la carte de danger en 2009, deux scénarios partiels pour la rupture de la digue le long de la Birse ont été définis. Pour chacun de ces scénarios, les secteurs touchés par une inondation de la Birse (respectivement la hauteur h et la vitesse v d'écoulement) ont été déterminées avec une modélisation 2D. Les intensités d'inondation ont été calculées en retenant les valeurs maximales des deux scénarios partiels. La carte d'intensité brute a été vérifiée sur le terrain et lissée en tenant compte des observations de terrain. Certaines surfaces ont donc été ajoutées sans être issues de la modélisation 2D, telles que des surfaces avec intensités fortes le long de la digue ou des surfaces avec danger résiduel.

Détermination des cotes de protection

Sur la base des résultats de la modélisation 2D, la revanche requise est calculée selon les formules du chapitre 3. La démarche décrite au point 4.1.2 est appliquée pour obtenir tout d'abord la surface type modèle numérique de terrain (cf. Figure 6) puis les isolignes lissées.

L'obtention de la surface (type MNT) se fait relativement automatiquement en SIG pour le secteur avec modélisation 2D. Les secteurs de dangers non définis à l'aide du modèle 2D doivent être traités avec une méthode complémentaire.

Dans l'exemple de la Birse à Courrendlin, on observe que la revanche requise est de 0.3 m sur l'ensemble du secteur. La surface de la cote de protection est donc parallèle à celle du niveau d'eau. Ce fait est dû à la topographie plane et aux profondeurs et vitesses d'écoulement modérées. Si la topographie avait été plus accentuée, un résultat différent aurait pu être obtenu.

Post-traitement

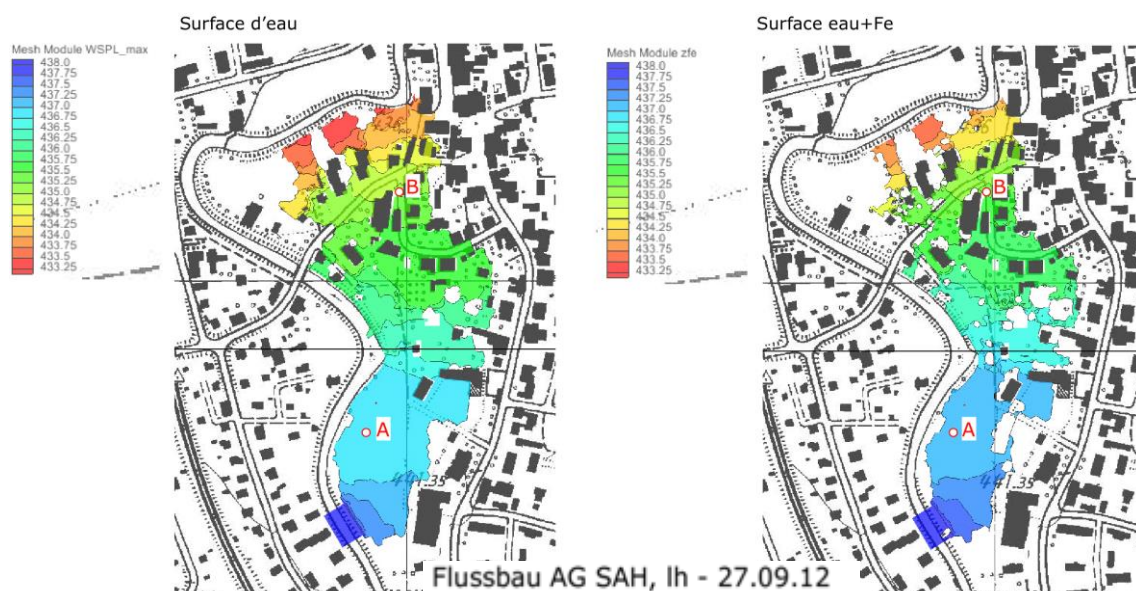


Figure 6 : à gauche: surface d'eau, scénario partiel n° 1 (résultat brut de la modélisation); à droite: surface de cote de protection, scénario partiel n° 1 (résultat brut du post-processing).

Pour passer de la surface aux isolignes, la démarche décrite au point 4.1.2 est appliquée. Le lissage des isolignes peut être une source d'erreur. Il est fait "à la main" et demande une certaine routine dans l'interprétation des résultats numériques.

Néanmoins il faut s'attendre à une précision de la position de ± 10 m à 15 m ce qui correspond à la précision de la délimitation des zones de dangers dans la cartographie.



Figure 7 : Isolignes de cote de protection pour le scénario Q_{300} de la Birse à Courrendlin pour le secteur avec modélisation 2D (délimité par le trait hachuré).

Annexe 3: Exemple approche 1D

Contexte et démarches réalisées pour l'obtention des cartes de cote de protection

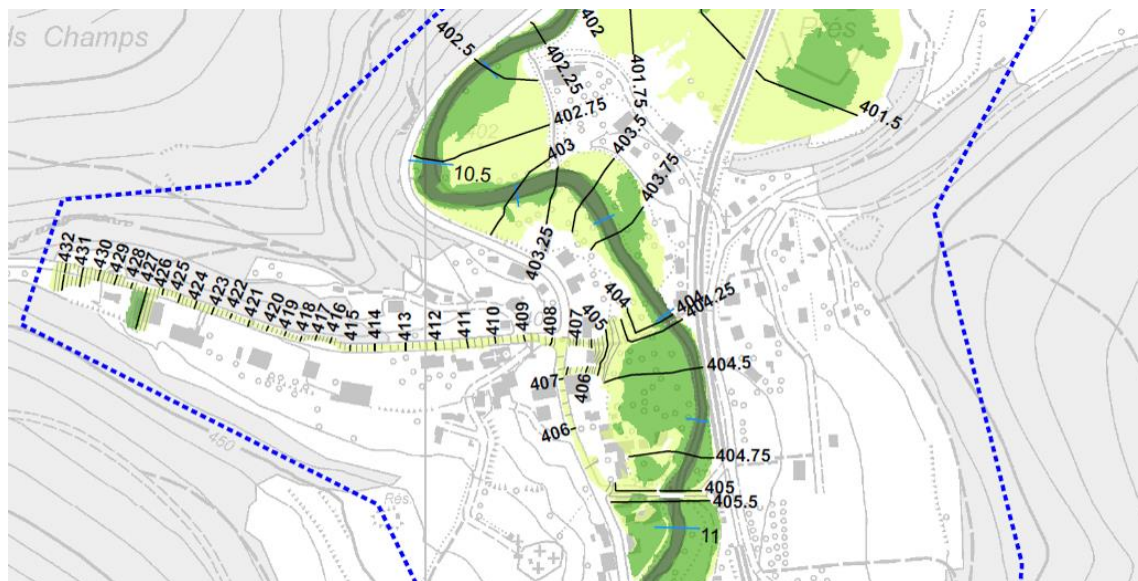
En suivant la méthodologie présentée ci-dessus, une carte des cotes de protection à l'échelle 1 : 5'000, format A3 a été produite pour la Basse Allaine à Courchavon (Figure 9). Deux vallées sèches (Combe Varieux et Combe Mormont) rejoignent l'Allaine dans le village de Courchavon. Les résultats hydrauliques ont été importés dans la couche ArcGIS « paramINO_030_100_lignes ». Les attributs de la revanche, f_e , et de la cote de protection ont été calculés séparément pour les affluents et pour l'Allaine. Un TIN a été produit pour représenter la surface de protection. Ensuite les isolignes des cotes de protection ont été générées à partir de la surface. Ces cotes de protection ont été vérifiées, ajustées et découpées selon la zone d'inondation Q_{100} . Ensuite, elles ont été rassemblées dans la couche « CoteProtection_030_100 » dans ArcGIS. Ces cotes ont été ajustées manuellement à la confluence entre l'Allaine et les vallées sèches latérales. Après la finalisation des isolignes, les étiquettes ont été produites et placées. Les attributs des couches « paramINO_030_100_lignes » et « cotePROT_100 » ont été remplis.

Allaine à Courchavon - km 10.869		
Revanche nécessaire f_e	calculée	Remarque
Ecoulement Q [m^3/s]	82	
Profondeur d'écoul. h [m]	0.95	HEC-RAS 1D
Vitesse d'écoulement v [m/s]	0.97	HEC-RAS 1D
Niveau d'eau [msm]	404.29	HEC-RAS 1D
σ_{wz} [m]	0.25	incertitude topographique
σ_{wh} [m]	0.12	incertitude calcul d'écoul.
f_w [m]	0.28	incertitude niveau d'eau
f_v [m]	0.05	formation des vagues
f_e [m]	0.28	revanche nécessaire
Cote de protection [msm]	404.57	




Figure 8: Exemple du calcul de la revanche

Post-traitement



Pour faciliter la lecture de la carte, les isolignes avec étiquettes sont en noir et les autres sont en gris. La Combe Mormont, au nord, donne l'exemple d'une vallée sèche raide. Le nombre d'isolignes et d'étiquettes est important. Cet exemple a démontré que le travail à faire pour un cours d'eau raide est pratiquement le double que pour un cours d'eau de plaine (par km du cours d'eau). Il est possible, pour un cours d'eau très raide, qu'un espacement des isolignes de 50 cm doive être adopté pour faciliter la lisibilité de la carte.



Légende

-  Kilométrage (chaque 100 m)
-  Limite communale
-  Périmètre d'étude

Cotes de protection

-  400 Isoligne de cote de protection (avec étiquette)
- altitude en msm
-  Isoligne de cote de protection (sans étiquette)
- intervalle de 25 cm

Intensité Q100



-  Faible
-  Moyenne
-  Forte

Figure 9 : Extrait de la carte des cotes de protection Q_{100} de la Basse Allaine

La vérification manuelle de la carte (comparaison de l'altitude du terrain avec la cote de protection) a démontré que la cote de protection est moins précise à mi-distance entre deux profils en travers. L'ajustement manuel des cotes de protection est donc une étape non-négligeable.

La méthodologie pour la cartographie des cotes de protection pour les zones calculées par modélisation hydraulique 1D est efficace pour produire des cotes de protection à intervalle de 25 cm. Pour un cours d'eau très raide ($> 8\%$), un espacement des cotes de protection à 50 cm est recommandé. La cote de protection est moins précise quand elle est éloignée d'un profil en travers du calcul. La vérification et l'ajustement manuel des cotes de protection sont nécessaires.

Annexe 4 : Exemple sans modélisations

Contexte

Cette méthode est développée pour tirer parti des informations de la carte des dangers, qui ont été réalisées sans modélisations par une approche « terrain ». Elle permet d'avoir rapidement une valeur indicative sur les côtes de protection, sans refaire des calculs ou des analyses détaillées sur place.

Pour illustrer cette approche une partie de la carte du ruisseau de Châtillon à Courrendlin est utilisée. La carte ci-dessous présente les points de calcul du secteur test de Courrendlin. À titre de comparaison la hauteur de protection en ces points a été calculée sur la base de la valeur de pente du MNT et du coefficient de Strickler basé sur la couverture du sol.

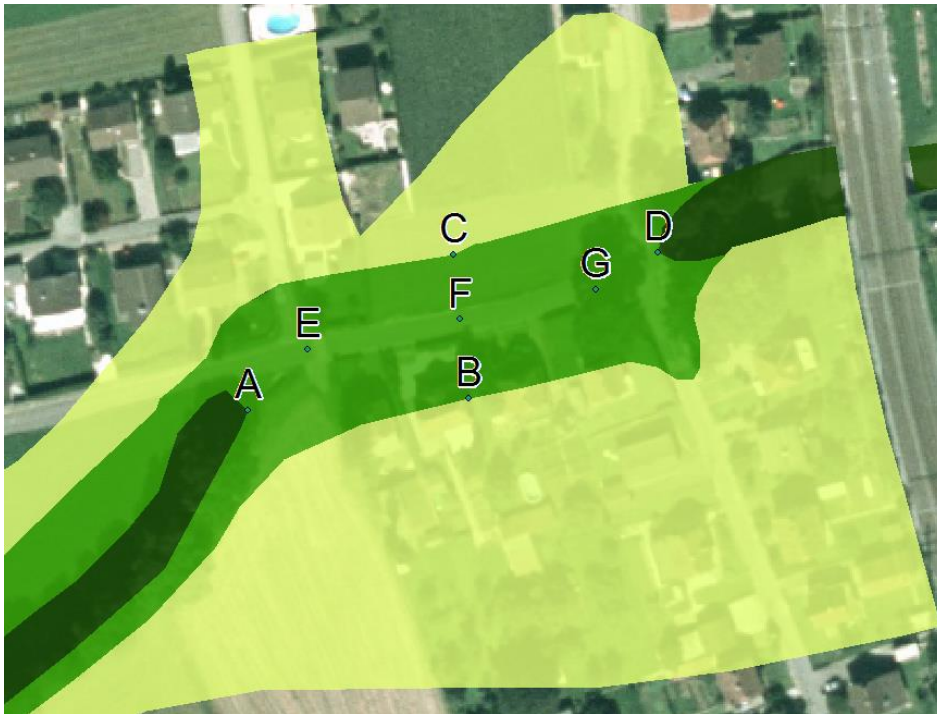


Figure 10 : Secteur test de Courrendlin pour HQ100, avec points de calculs

Validation de la méthode pour le calcul de la revanche

On observe dans le tableau suivant une bonne correspondance entre les valeurs de hauteur de protection calculées avec la méthode telle que présentée au chapitre 2 et les valeurs selon les classes d'intensité. Globalement la méthode surestime raisonnablement la hauteur de protection, sauf pour le point D qui se situe en limite de classe d'intensité forte et pour lequel la valeur est sous-estimée.

Point	intensité d'inondation [m ² /s]	vitesse [m/s]	hauteur d'eau [m]	Hauteur de protection	
				selon Khos [m]	selon classes proposées [m]
A	2.0	3.7	0.5	1.3	1.3
C	0.5	2.1	0.2	0.6	0.6
D	2.0	6.3	0.3	1.8	1.3
B	0.5	2.1	0.2	0.6	0.6
E	0.5	3.5	0.1	0.8	0.9
F	0.5	2.9	0.2	0.7	0.9
G	0.5	3.5	0.1	0.8	0.9

Figure 11 : Comparaison des résultats pour le secteur test

La figure ci-dessous présente la carte avec les cotes de protection (voir également annexe 3).



Légende









	Cours d'eau		400	Isoligne de cote de protection (avec étiquette) - altitude en msm		Faible
	Limite communale			Isoligne de cote de protection (sans étiquette) - intervalle de 50 cm		Moyenne
	Périmètre d'étude					Forte

Figure 12: Résultat cartographique de l'exemple selon la méthode sans modélisation tirée de la carte des dangers.

La méthode permet facilement d'avoir une évaluation cohérente de la cote de protection. Cependant les réserves suivantes peuvent être formulées :

- La cote de protection est fortement dépendante de la valeur locale du MNT ;
- La cote de protection est très conservatrice (valeur relativement importante, plutôt surestimée) ;
- Des isolignes plus rapprochées que 50 cm induisent un faux niveau de précision pour les secteurs avec une approche de terrain.

La méthode développée permet de conduire à des cotes de protection sans avoir à refaire trop de calcul ou retourner sur le terrain. La marge de sécurité est relativement importante. Dans certains cas particuliers (par exemple projet de construction dans un secteur vulnérable), des études de détails sur le terrain seront indispensables pour affiner la valeur des cotes de protection.

ⁱ⁽¹⁾ Précision admise de 0.25m pour les MNT selon le document suivant: Modèle numérique de terrain laser SIT Jura, novembre 2008