

<b>Zeitschrift:</b>	Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)
<b>Band:</b>	97 (1999)
<b>Heft:</b>	7
<b>Artikel:</b>	Cartes d'inondation et exigences en matière de précision altimétrique : aspects méthodologiques et application au cours d'eau de la Petit-Glâne
<b>Autor:</b>	Consuegra, D. / Schenk, F. / Metzger, R.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-235562">https://doi.org/10.5169/seals-235562</a>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 19.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Cartes d'inondation et exigences en matière de précision altimétrique

## Aspects méthodologiques et application au cours d'eau de la Petite-Glâne

Les cartes d'inondation constituent la clé de voûte d'une politique cohérente de l'occupation des sols. La délimitation des surfaces submergées et la détermination des profondeurs de submersion est tributaire de la qualité du Modèle Numérique d'Altitudes (MNA) sous-jacent, en particulier en zone de plaine. Désormais, il faut compter avec les nombreuses voies de communication qui, dans la plupart des cas, constituent des entraves à l'écoulement. Cette étude montre que ces obstacles jouent un rôle déterminant dans le processus de propagation des inondations. Malheureusement, en les assimilant à des séries de déversoirs horizontaux, la description «hydraulique» de ces lignes de cassure génère d'importantes incertitudes dont il est nécessaire d'évaluer l'impact sur les cartes d'inondation. Pour parvenir à cet objectif, l'Institut d'Aménagement des Terres et des Eaux (IATE) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), propose une méthode originale permettant de pondérer la probabilité de submersion à un endroit donné par les incertitudes liées à la description et à la modélisation des effets des obstacles.

*Die Überschwemmungskarten bilden den Schlussstein einer kohärenten Politik der Bodennutzung. Die Abgrenzung der Überschwemmungsflächen und die Bestimmung der Überflutungstiefen hängen von der Qualität des darunterliegenden Numerischen Höhenmodells ab, vor allem im Flachgebiet. Von nun an muss man mit den zahlreichen Verkehrswegen rechnen, die in den meisten Fällen Abflussbehinderungen darstellen. Diese Studie zeigt, dass diese Hindernisse eine entscheidende Rolle im Ausbreitungsprozess der Überschwemmungen spielen. Indem man sie einer Reihe von horizontalen Überfällen gleichstellt, erzeugt die «hydraulische» Beschreibung dieser Bruchlinien leider grosse Unsicherheiten, deren Auswirkungen auf die Überschwemmungskarten es abzuschätzen gilt. Um dieses Ziel zu erreichen, schlägt das Institut für Erd- und Wasserbau an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne eine originelle Methode vor, die es erlaubt, die Wahrscheinlichkeit einer Überschwemmung an einer bestimmten Stelle durch die an die Beschreibung und die Modellisierung der Wirkung der Hindernisse gebundene Unsicherheit zu gewichten.*

Le carte d'inondazione rappresentano la chiave di volta di una coerente politica dell'occupazione dei suoli. La delimitazione delle superfici sommerse e la determinazione delle profondità di sommersione dipendono dalla qualità del modello digitale del terreno, specialmente nelle zone di pianura. Ormai bisogna tener conto delle numerose vie di comunicazione che, nella maggior parte dei casi, costituiscono un ostacolo al deflusso. Questa ricerca dimostra che questi ostacoli svolgono un ruolo essenziale nel processo di propagazione delle inondazioni. Purtroppo, assimilandoli a una serie di sfioratori orizzontali, la descrizione «idraulica» di queste linee di rottura comporta ingenti incertezze per cui bisogna valutare l'impatto sulle carte d'inondazione. Per raggiungere tale obiettivo, l'Istituto della gestione del suolo e delle acque (IATE) del Politecnico di Losanna (EPFL) propone un originale metodo che permette di ponderare la probabilità di sommersione di un determinato punto, tenendo conto delle incertezze legate alla descrizione e alla modellizzazione degli effetti provocati dagli ostacoli.

D. Consuegra, F. Schenk, R. Metzger, A. Musy

### 1. Introduction

En matière de protection contre les crues, les mesures les plus efficaces sont celles impliquant l'aménagement du territoire (OFEE, 1997). Les conflits avec la rivière sont particulièrement exacerbés en zone de plaine car l'utilisation des sols y est très intense. C'est également dans ces régions que se concentrent les plus importantes infrastructures de communication. Une politique cohérente d'occupation des sols doit donc s'appuyer sur des cartes d'inondation. En délimitant les surfaces submergées, ces dernières permettent de quantifier les risques encourus par les objets les plus vulnérables (Gilard et Gendreau, 1999).

La figure 1 illustre schématiquement le mode de propagation d'une inondation en zone de plaine. Le déversement latéral par dessus les berges du lit mineur, ou encore la rupture plus ou moins progressive d'une digue, constituent les processus à l'origine du danger. Les rivières se caractérisent par des pentes longitudinales faibles (moins de 1%) et des lits majeurs très larges traversés par de nombreuses voies de communication (autoroutes, routes cantonales, chemins agricoles, chemins de fer, etc.).

Construites le plus souvent en remblai, ces lignes de cassure délimitent des casiers et donnent au relief une apparence maillée. L'inondation se propage de casier en casier en fonction des capacités de stockage.

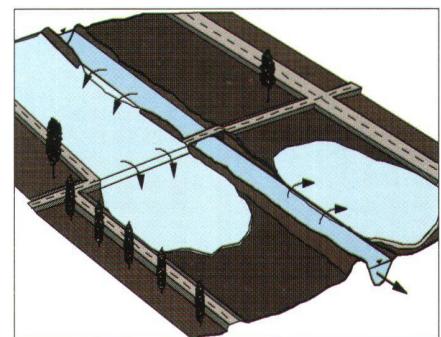


Fig. 1: Représentation schématique de la propagation d'une inondation en zone de plaine.

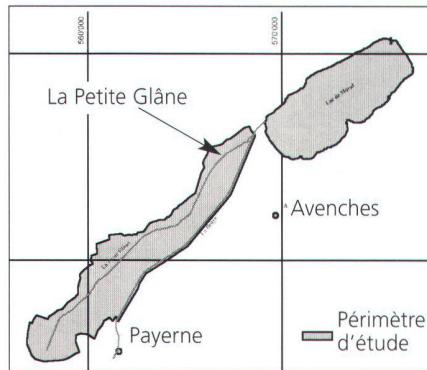


Fig. 2: Situation du périmètre d'étude. Cours d'eau de la Petite-Glâne.

ge de ces derniers. Les écoulements préférentiels dépendent non seulement de la topographie fine mais également des dénivélés des différents obstacles.

L'établissement des cartes d'inondation dans des plaines alluviales analogues à celle de la figure 1, demande des développements spécifiques dans le domaine de l'hydraulique bi-dimensionnelle et dans celui des Modèles Numériques d'Altitudes (MNA). Un traitement particulier devra être appliqué aux obstacles compte tenu de leur rôle déterminant dans le processus de propagation de l'inondation. Cette communication décrit les derniers développements scientifiques de l'Institut d'Aménagement des Terres et des Eaux (IATE) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) en la matière.

La méthodologie proposée est appliquée à la plaine alluviale du cours d'eau de la Petite-Glâne, affluent de la Broye en amont du lac de Morat (voir figure 2).

## 2. Modélisation hydraulique

### Equations de base

Pour des inondations qui se développent lentement sur des surfaces à forte rugosité, les changements de vitesse sont relativement faibles. Les termes inertiels peuvent être négligés pour autant que les vitesses ne dépassent pas 9 m/s, soit 32 km/h (Hromadka et al., 1985). Des processus comme ceux de la figure 1 peuvent donc être bien décrits par les équations de l'onde diffusante (Cappelaere, 1997; Fathi-Maghadam et Kouwen, 1997). La méthode des volumes finis s'appuie sur une schématisation maillée du périmètre d'étude analogue à celle de la figure 3 (Zhao et al., 1994). Le découpage en polygones de Thiessen permet de simplifier la discrétisation des équations de base, de bien épouser les formes du terrain, et de suivre les cassures imposées par les différents obstacles. Pour chaque cellule, on pourra écrire le bilan général:

$$\sum_{j \in \Gamma} Q_{ij} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \Delta t [q_i^{t+1} + q_i^t] = V_i^{t+1} - V_i^t = S_i \cdot (h_i^{t+1} - h_i^t)$$

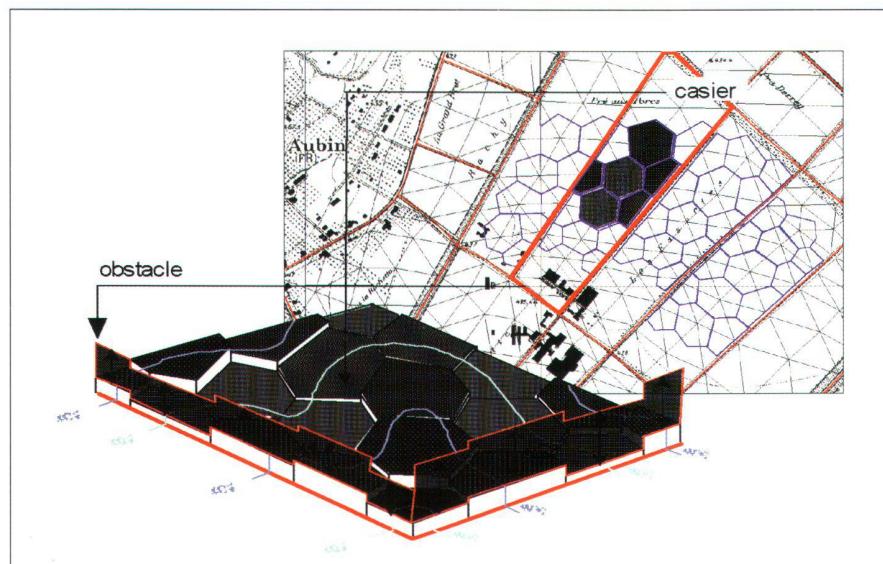


Fig. 3: Représentation schématique du terrain pour les calculs hydrauliques.

Où l'on a:

$Q_{ij}$  = le débit échangé entre les cellules  $i$  et  $j$  ( $m^3/s$ ) pendant le pas de temps  $\Delta t$ ,

$\Delta t$  = pas de temps entre  $t+1$  et  $t$  en secondes,

$\Gamma$  = l'ensemble des cellules connectées à la cellule  $i$ ,

$h_i^t$  = profondeur d'eau dans la cellule  $i$  ( $m$ ) au temps  $t$ ,

$V_i^t$  = le volume d'eau contenu dans la cellule  $i$  ( $m^3$ ),

$S_i^t$  = la surface au sol de la cellule  $i$  ( $m^2$ ),

$q_i^t$  = apport externe à la cellule  $i$  ( $m^3/s$ ) au temps  $t$ .

L'équation décrit un bilan de continuité puisque les variations de volume dans une cellule sont égales aux différences entre les débits entrants et sortants. Les flux échangés se calculent au droit des faces de chaque cellule. Ils dépendent du niveau d'eau au point  $i$  et de ceux de toutes les cellules  $j$  connectées à  $i$ ,  $[j=1, \Gamma]$ . Un schéma itératif de type «prédicteur-correcteur» est utilisé pour résoudre l'équation ci-dessus. Sur la base des niveaux d'eau  $H_i^t$  et d'une prévision de leur évolution à  $t+\Delta t$ , on détermine les flux  $Q_{ij}$  qui, à leur tour, fournissent des estimations corrigées des  $H_i^{t+\Delta t}$ . Les itérations s'arrêtent quand les correcteurs prennent des valeurs égales à celles des prédicteurs. La figure 3 illustre également l'avantage principal d'un maillage polygonal puisque la notion de face permet d'attribuer à chaque connexion la loi hydraulique la plus appropriée. Dans le cas qui nous occupe, il s'agit essentiellement des formules de Manning-Strickler et du déversoir à seuil épais, appliquées respectivement aux cellules sises en plaine et à celles séparées par un obstacle.

La figure 4 montre les variables déterminantes pour le calcul des débits échangés entre les cellules  $i$  et  $j$  lorsque l'on applique la loi de Manning-Strickler. Le décentrement du terme de masse  $m$  permet de limiter la diffusion numérique et d'augmenter la précision de la solution (Pantanakar, 1980). On représente mieux les déplacements de fronts abruptes. La partie «vitesse» de l'équation de Manning-

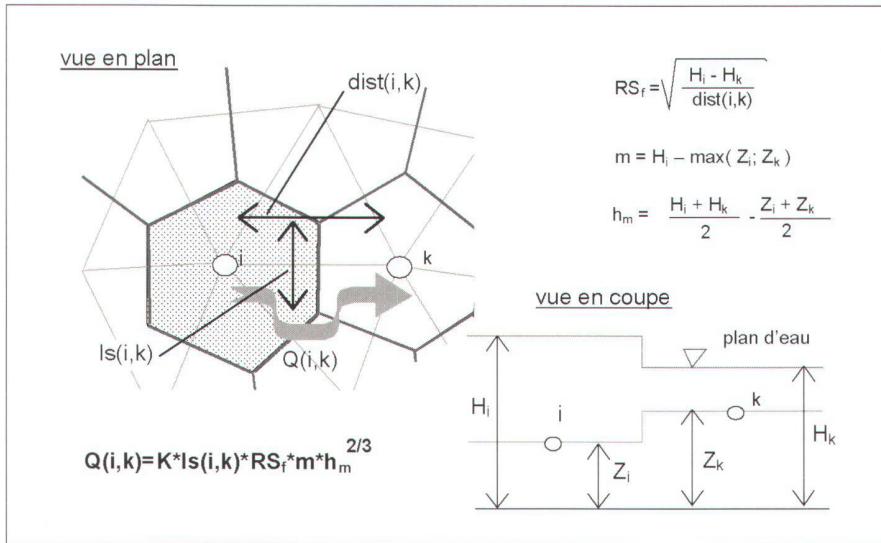


Fig. 4: Calcul des flux selon Manning-Strickler, noeuds sis au fond des casiers.

Où l'on a:

- $Q(i,k)$  = débit échangé entre les cellules  $i$  et  $k$  ( $m^3/s$ ),  
 $H$  = niveau d'eau (profondeur additionnée à l'altitude du fond (m)),  
 $Z$  = altitude du sol (msm),  
 $dist(i,k)$  = distance entre les centres des cellules  $i$  et  $k$  (m),  
 $ls(i,k)$  = largeur de l'interface entre les cellules  $i$  et  $k$  (m),  
 $m$  = terme de masse ou profondeur de propagation (m),  
 $h_m$  = profondeur moyenne au droit de la face (m),  
 $K$  = coefficient de Strickler.

Strickler est calculée au droit de la face sur la base d'une profondeur moyenne obtenue en supposant que le profil de la ligne d'eau entre les centres des cellules  $i$  et  $k$  est linéaire. On partira également du principe qu'au droit de la face, la largueur de l'interface est bien supérieure à la profondeur de l'écoulement. Le rayon hydraulique est donc remplacé par la profondeur  $h_m$ .

La figure 5 présente la schématisation et les formules utilisées pour le calcul des flux au-dessus d'un obstacle où l'on a:

$w$  = dénivélé de l'obstacle (m),  
 $C_d$  = coefficient de perte de charge,  
 $C_w$  = coefficient de submersion (uniquement si  $H_k > W + Z_k$ ).

L'équation de base est celle du déversoir classique, modifiée par un coefficient de submersion pour tenir compte des écoulements noyés. La lame déversante  $X_u$  est calculée au centre de la cellule  $i$  (schéma décentré). Le coefficient de submersion est celui proposé par Sinniger et Hager (1990).

grammes déversés par dessus les berges de la rivière ou provenant de la rupture de ces dernières. Le pas de temps est variable, il est choisi sur la base d'un critère de Courant généralisé à deux dimensions (Schenk, 1995). Ce dernier stipule que dans un même pas de temps, une cellule ne peut se vider que d'une fraction du volume qu'elle contient. C'est la cellule la plus critique qui détermine le choix du pas de temps. On a donc intérêt à construire un maillage formé de polygones homogènes et dans la mesure du possible d'éviter la juxtaposition de cellules avec des tailles trop disparates (Metzger et Consuegra, 1998).

## Tests du modèle

Le modèle ainsi défini a été testé pour vérifier non seulement sa robustesse au niveau numérique (capacité à supporter des conditions initiales extrêmes), mais également la qualité générale des solutions proposées. Un test numérique classique est celui de la rupture de digue. La figure 6 présente les surfaces d'eau après 2.5 et 15 secondes. Les résultats obtenus concordent avec ceux publiés dans la littérature spécialisée (Fenema et Chaudrh, 1989).

On a également effectué le test de la colonne sur un plan incliné à 5%. On vérifie ainsi que le modèle est capable de combiner des pentes élevées du terrain avec de forts gradients de la surface d'eau. La figure 7 montre que le modèle propage la colonne nettement plus vers l'aval que

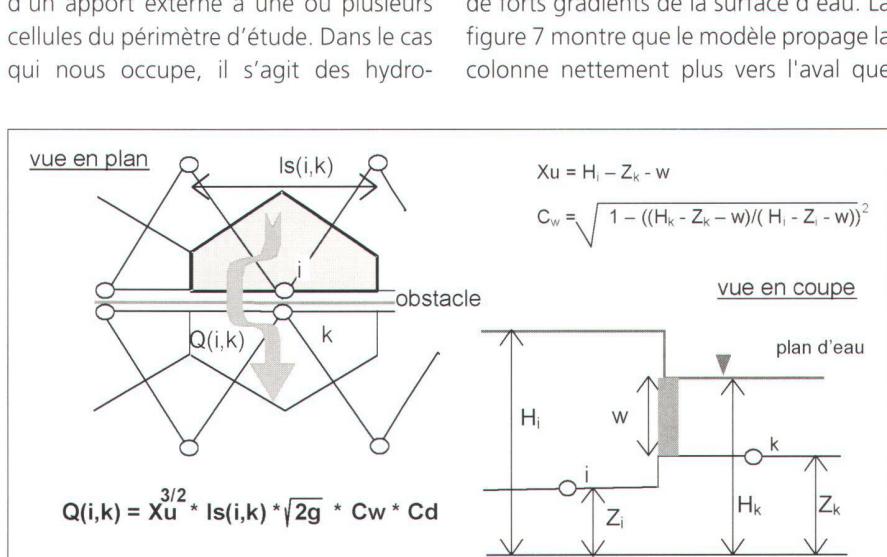


Fig. 5: Calcul des flux selon une loi de déversoir, noeuds séparés par un obstacle.

vers l'amont. Toutefois, la progression de la masse d'eau vers le haut montre sa capacité à gérer des situations de reflux. Les figures 6 et 7 montrent la robustesse du modèle développé et illustrent sa capacité à simuler des situations complexes. D'autres tests de nature mono-dimensionnelle en régime permanent et en canal prismatique ont été envisagés (Schenk et Consuegra, 1999). Les résultats sont satisfaisants. Ils montrent que le modèle hydraulique proposé est en mesure de bien négocier les conditions d'écoulement que l'on rencontre le plus souvent dans un cours d'eau.

### 3. Modèle Numérique d'Altitudes et traitement des obstacles

Le MNA utilisé pour la cartographie des inondations de la Petite-Glâne est tiré d'un scan «laser» effectué sur l'ensemble de la plaine alluviale (voir figure 8). Sur une surface d'environ 40 km<sup>2</sup>, ce ne sont pas moins de 3 300 300 points qui ont été cotés; ce qui correspond à 1 point tous les 16 m<sup>2</sup> ou encore, à calculer l'altitude représentative d'une maille de 100 m<sup>2</sup> sur la base d'environ 6 à 7 points.

Pour des points sis à l'intérieur des casiers, les altitudes obtenues avec le scan «laser» sont équivalentes à celles issues d'une restitution photogrammétrie précise (voir figure 9). La moyenne et l'écart type des erreurs sont d'environ 0.05 et 0.25 mètres respectivement. Dans 90% des cas, les er-

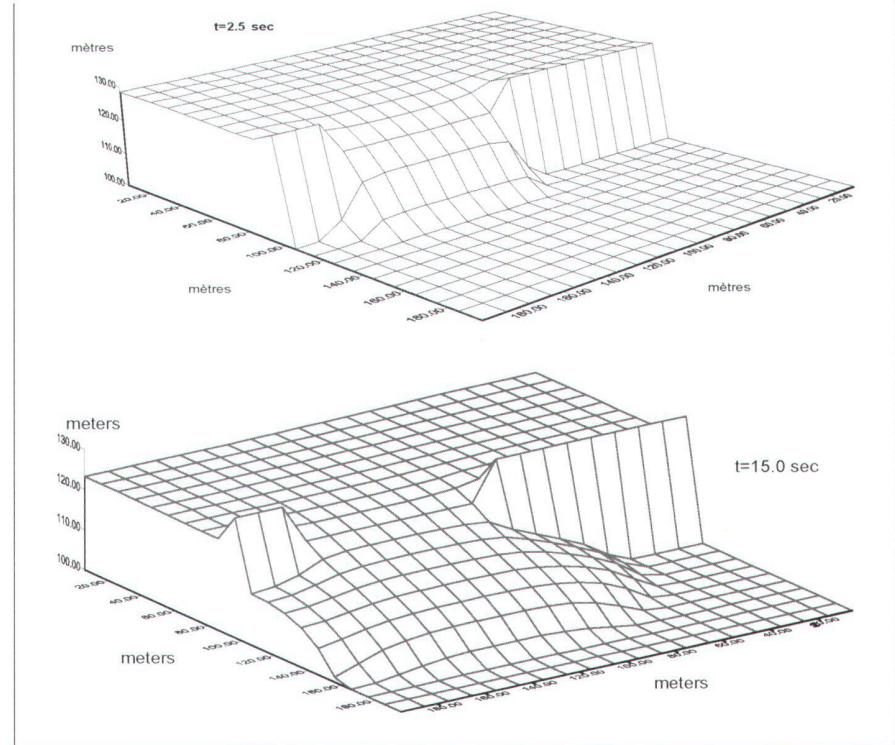


Fig. 6: Test de rupture d'une digue. Deux images successives de l'évolution des niveaux d'eau.

reurs sont comprises entre  $\pm 0.30$  mètres. On peut donc utiliser les données du scan «laser» pour définir les altitudes moyennes des cellules polygonales sises à l'intérieur des casiers (voir figure 3).

Il faut maintenant vérifier si l'altimétrie «laser» restitue également les obstacles avec une précision suffisante. On démontre le besoin impératif d'une définition fine de ces lignes de cassure en comparant les cartes d'inondation de la figure 10. Dans les deux cas, les altitudes des MNA des fonds des casiers sont celles fournies par le scan «laser». A gauche, les obstacles ne sont pas pris en considération. Le débit échangé entre deux cellules séparées par une de ces lignes de cassure, est calculé par la formule du déversoir avec un dénivélé supposé nul. A droite par contre, ce même débit est obtenu avec un

dénivelé égal à la différence entre l'altitude moyenne de l'obstacle et celle du bas-côté. Comme l'illustre la figure 2, le dénivélé est constant le long de l'interface entre deux polygones. En fonction du sens de l'écoulement, on utilisera tantôt le dénivélé associé au bas-côté gauche, tantôt celui au bas-côté droit. Il n'est pas très surprenant de constater que les obstacles ont un effet déterminant sur l'étendue des submersions. Pour le scénario hydraulique considéré, on notera que c'est la capacité de stockage des casiers en amont qui protège le centre industriel contre les submersions.

La densité phénoménale de points cotés par le laser permet de restituer les obstacles de manière précise, en particulier ceux avec des largeurs de 4 mètres ou plus. La figure 11 illustre la méthode appliquée aux données «laser» pour obtenir automatiquement les dénivélés le long d'un obstacle quelconque (Metzger et Consuegra, 1998).

On superpose aux points cotés par le laser, la grille polygonale nécessaire aux calculs hydrauliques. Dans le cas qui nous occupe, cette dernière a été optimisée de manière à assurer un maximum de régularité avec des longueurs d'interface proches de 50 mètres. Les interfaces de part et d'autre de la ligne de cassure délimitent un rectangle. Les points «laser» sis à l'intérieur de celui-ci (en général au nombre de 12), définissent une altitude moyenne pour cette portion d'obstacle.

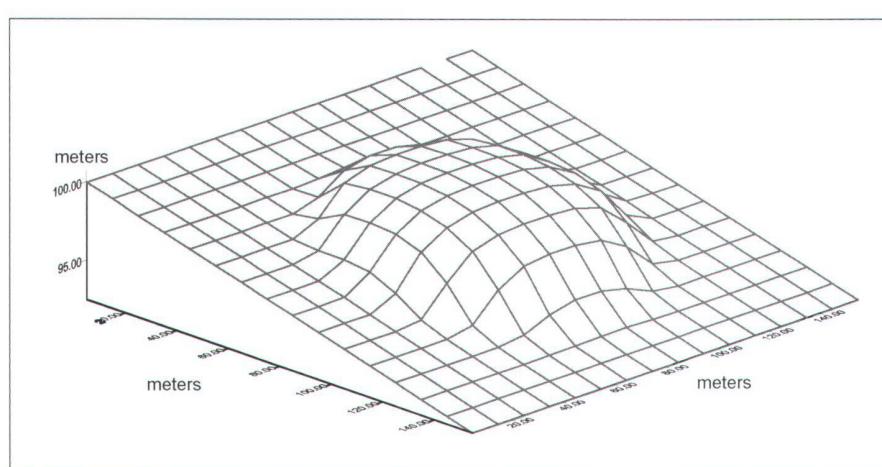


Fig. 7: Colonne d'eau sur un plan incliné.

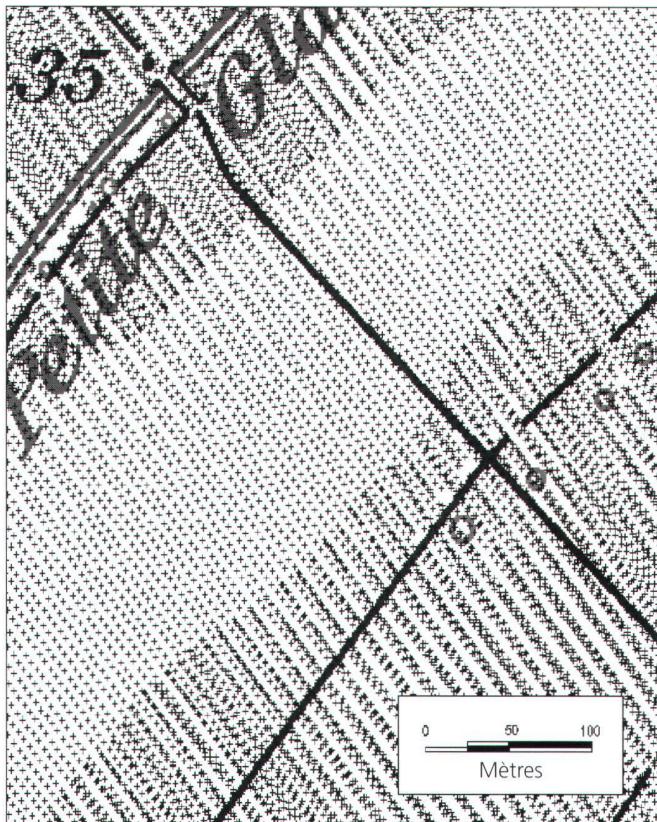


Fig. 8: Données de l'altimétrie «laser».

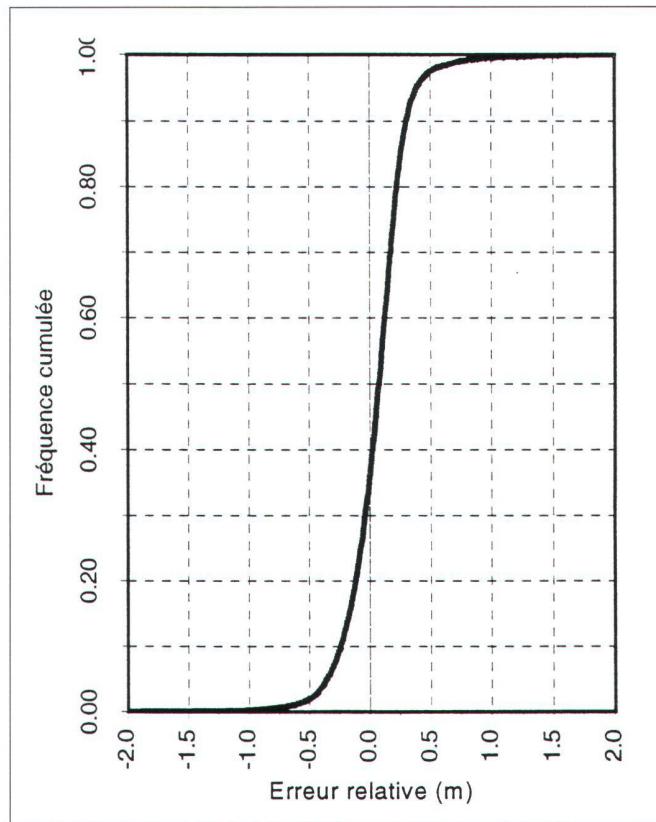


Fig. 9: Différences entre les altitudes «laser» et celles issues d'une photogrammétrie.

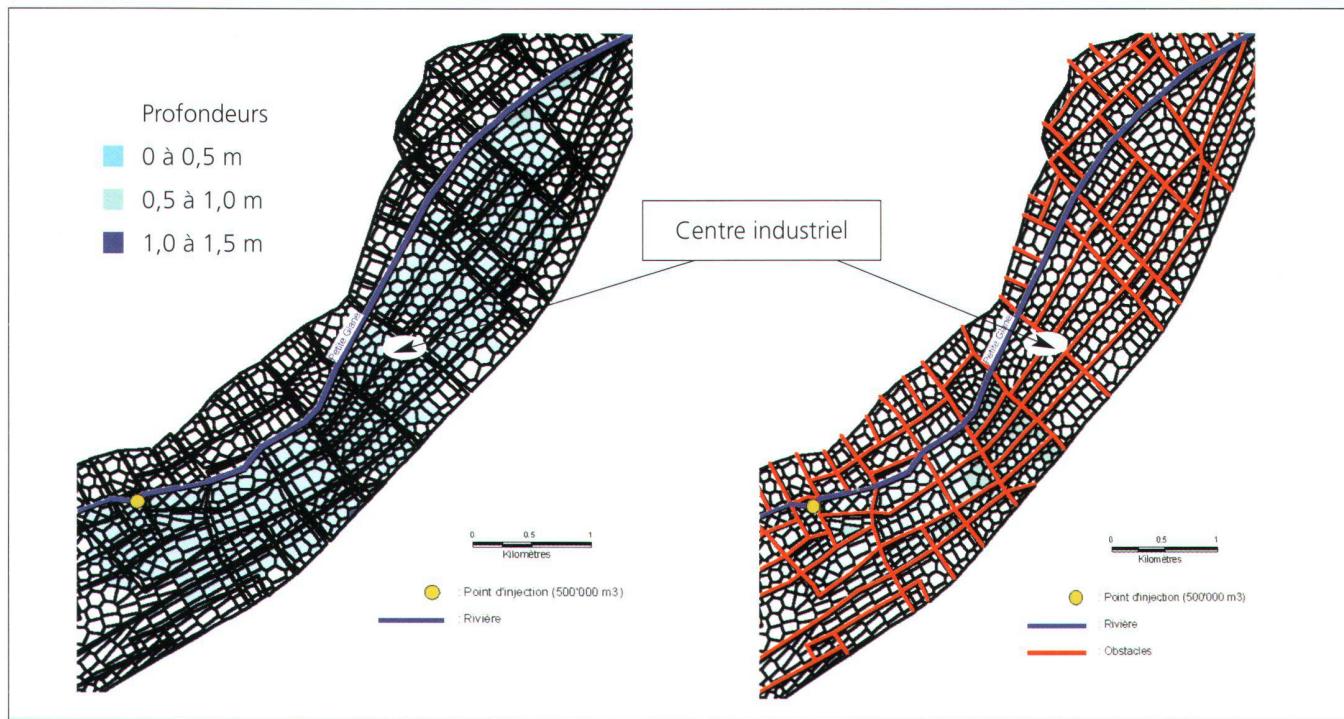


Fig. 10: Effet des obstacles sur l'étendue des zones submergées (Scénario hydraulique:  $\frac{1}{2}$  millions de  $m^3$  déversés pendant 1 heure à l'amont de la zone d'étude).

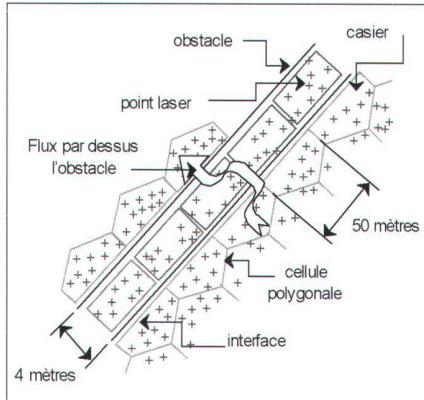


Fig. 11: Restitution des obstacles à partir des points «laser».

Une procédure analogue a été implantée pour trouver l'altitude moyenne des polygones dans les bas-côtés correspondants.

Malheureusement, la dispersion autour des altitudes moyennes des obstacles peut être très importante (voir figure 12). Par endroits, elle atteint 0.40 mètres. On retrouve ainsi une mesure de l'erreur commise en décrivant l'obstacle comme un alignement de murets horizontaux. Pour réduire la variabilité des cotes des sommets des obstacles, il faudrait envisager des cellules polygonales très petites. A la lumière de la figure 12, force est de constater que des longueurs d'interface de 50 mètres uniquement, sont encore beaucoup trop grandes. En imaginant les étendues potentielles des inondations du Yangtze en Chine, de l'Oder en Pologne ou encore de la partie Suisse du Rhône, on hésitera à affiner excessivement les maillages.

Ne pouvant contrecarrer la perte de précision associée à la description «hydraulique» de l'obstacle, il est par contre envisageable de quantifier la sensibilité des étendues et profondeurs de submersion simulées aux erreurs commises sur l'ensemble des dénivélés. Pour cela, il faudra concevoir les sommets moyens des différents murets comme des variables stochastiques. Les données du scan «laser» permettent de définir les distributions statistiques correspondantes (voir figure 12). Elles sont de nature purement empirique. L'analyse de sensibilité est dès lors pos-

sible à l'aide de simulations «Monte Carlo». A l'image de la figure 12, on générera plusieurs configurations d'un même obstacle. L'amplitude des variations de l'altitude de chaque muret dépend de la dispersion relative. L'analyse de sensibilité ne concerne alors que les portions d'obstacle pour lesquelles l'analogie du déversoir horizontal introduit une forte distorsion par rapport à la configuration réelle du terrain.

Des traitements analogues à ceux de la figure 12 peuvent être facilement généralisés à l'ensemble des obstacles répertoriés dans la plaine alluviale du cours d'eau de la Petite-Glâne. Cette procédure présente l'avantage de dissocier les incertitudes liées à l'estimation de l'altitude des obstacles de celles provenant de l'attribution de cotes moyennes aux cellules sises à l'intérieur des casiers. La priorité a été accordée aux obstacles dans la mesure où les cartes de la figure 10 montrent que ces derniers jouent un rôle prépondérant dans la propagation et l'étendue des submersions.

Il serait naïf de croire que l'attribution de cotes moyennes aux polygones des bas-côtés soit privée d'incertitudes. Bien au contraire, la distribution des profondeurs de submersion et les points de déversement d'un casier à l'autre en dépendent directement. C'est pourquoi, l'inclusion de cette source d'imprécision constitue la

prochaine étape des développements méthodologiques décrits plus hauts. On pourra cependant se rassurer en rappelant, encore une fois, que l'étendue des surfaces submergées dépend en grande partie de la configuration des obstacles.

#### 4. Production de cartes d'inondation

Dans la plaine alluviale de la Petite-Glâne, les inondations sont provoquées par des déversements au-dessus des berges du cours d'eau. Pour illustrer la méthodologie décrite plus haut, on prendra un débordement «fictif» d'environ 415 000 m<sup>3</sup> au droit d'un profil en amont dont la capacité maximale d'écoulement (26.5 m<sup>3</sup>/s) est insuffisante. La figure 13 montre les hydrogrammes déversés en rive gauche et droite. Ils ont été obtenus en couplant une version mono-dimensionnelle du modèle hydraulique décrit précédemment avec la méthode de Hager (1987) qui assimile les berges à des déversoirs latéraux. Les hauteurs des berges sont partout bien supérieures à celles des bas-côtés. Les volumes déversés ne peuvent plus revenir dans le cours d'eau principal.

Des analyses analogues à celles des figures 11 et 12 ont été effectuées indépendamment sur les obstacles principaux; on en dénombre 80. Pour chacun d'entre

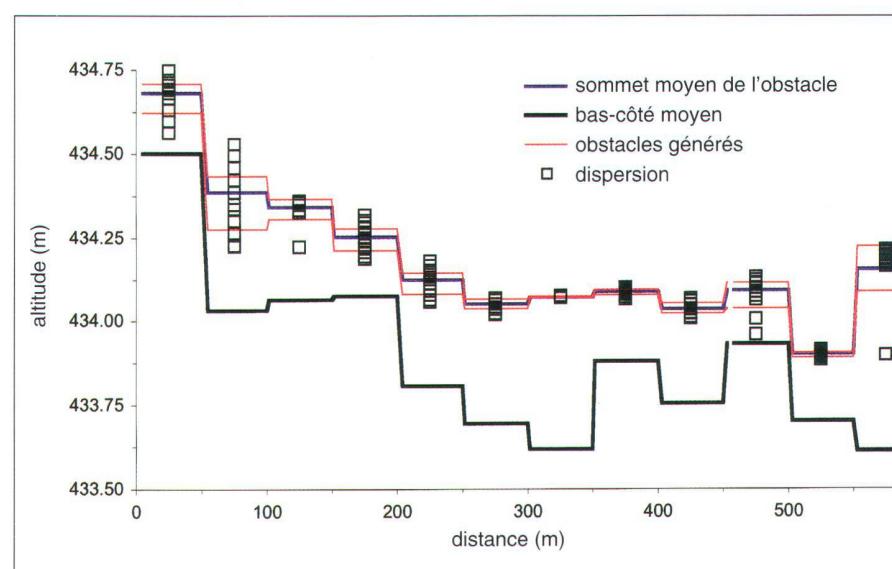


Fig. 12: Illustration des incertitudes liées à la schématisation des obstacles.

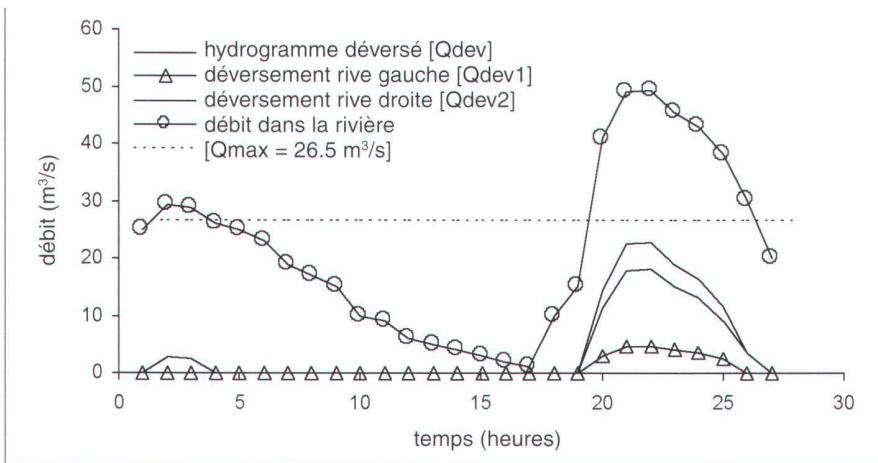


Fig. 13: Scénario hydraulique pour la Petite-Glâne.

européen, on génère individuellement une série de murets à l'image de la figure 12. Les 80 configurations ainsi produites constituent un modèle topographique probable de l'altimétrie des obstacles. Ce dernier est superposé au MNA des fonds des casiers, également tiré du scan laser. Quelques 320 réalisations topographiques des obstacles ont été considérées. Elles résultent d'un échantillonnage «intelligent» basé sur des «hypercubes latins» (McKay, 1988).

A partir du scénario hydraulique de la figure 13, on produit autant de cartes avec les étendues et les profondeurs maximales des submersions. On fournira une meilleure délimitation des niveaux d'exposition au danger en produisant deux cartes de synthèse (voir figures 14 et 15). Pour un point quelconque, la première affiche une probabilité de submersion (voir figure 14) alors que la deuxième donne la profondeur maximale vraisemblable (voir figure 15). La probabilité se calcule en rapportant le nombre de submersions d'une cellule donnée au nombre total de simulations. La profondeur maximale probable correspond au mode de toutes les valeurs non nulles simulées pour les 320 configurations d'obstacles retenues. La probabilité de submersion est assimilable à un indice de vraisemblance puisqu'une valeur de 100% indique que les incertitudes sur les obstacles ne jouent aucun rôle. La profondeur maximale probable est plutôt comparable à un indice d'intensité du phénomène d'où l'on tirera un potentiel de dégâts.

La lecture combinée de ces deux cartes fournit une appréciation du niveau de danger encouru par un point quelconque du périmètre. Pour la plupart des 320 configurations d'obstacles retenues, la rive droite est submergée. L'étendue de l'inondation et les profondeurs maximales

probables dans ce secteur ne dépendent pas des incertitudes liées à l'altimétrie des obstacles. Il est intéressant de constater que les volumes déversés réussissent fréquemment à franchir le premier obstacle. Il faut attendre la deuxième route plus en aval pour retrouver une barrière à l'écoulement. La probabilité de franchir cet obstacle ne dépasse pas 50% et les profondeurs maximales probables en amont sont nettement plus élevées.

## 5. Conclusions

En zone de plaine, la production de cartes d'inondation devra compter avec les nombreuses voies de communication qui, dans la plupart des cas, entravent les écoulements. Dans ces régions, le relief affiche une apparence maillée où se juxtaposent des casiers dont la capacité de stockage dépend des dénivellés des obstacles qui les entourent.

Pour le moment, les obstacles ne peuvent être étudiés qu'à partir de Modèles Nu-

mériques d'Altitudes (MNA) où ils sont visibles, au même titre que les points des fonds des casiers. L'altimétrie «laser» constitue une excellente source d'information puisqu'elle est accompagnée, en plus, d'un niveau de précision très élevé. Des MNA de type «raster» combinés à une altimétrie précise des obstacles, pourraient également être utilisés pourvu que les erreurs sur les altitudes soient inférieures au  $\pm 1/2$  mètre. Au-delà, il n'est plus possible de négliger les distorsions introduites par une altimétrie des casiers de trop mauvaise qualité.

Les modèles hydrauliques nécessitent une représentation schématique du terrain. C'est le cas des obstacles qui sont assimilés à des déversoirs horizontaux. Cette analogie introduit des distorsions d'autant plus fortes que le maillage est grossier. Malheureusement, ce n'est pas en utilisant un MNA très précis que l'on va les éliminer. On peut tout au plus contrer les effets de ces incertitudes avec des mailles très petites. Une telle approche n'est pas raisonnable pour les grands périmètres. Désormais, la taille des mailles devra toujours être adaptée à l'étendue de la zone étudiée. Par conséquent, l'analyse des incertitudes associées à la schématisation du terrain sera toujours pertinente et nécessaire. C'est pourquoi nous proposons une méthodologie originale

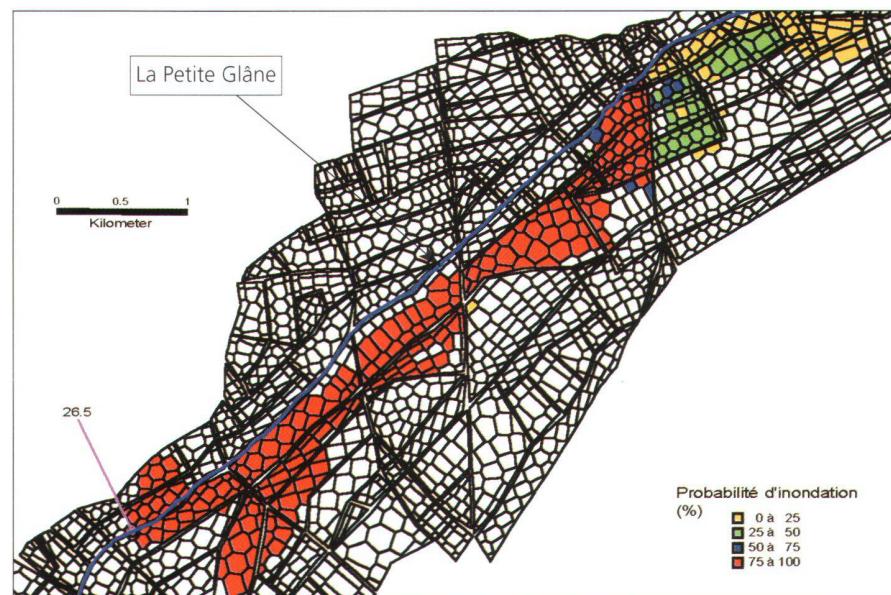


Fig. 14: Probabilités de submersion (en %).



Fig. 15: Profondeurs maximales probables (en mètres).

permettant de traiter les incertitudes liées à la description des obstacles et d'étudier leurs impacts sur les cartes d'inondation. Un résultat majeur est celui de produire une carte illustrant la probabilité de submersion compte tenu des différentes configurations potentielles des obstacles. On en déduira par exemple, les besoins en matière de précision des relevés géodésiques.

#### Remerciements

Ces études ont été partiellement soutenues par le Service des Eaux et Endiguements du canton de Fribourg, le Service de l'Environnement, des Sols et de l'Assainissement du canton de Vaud, et l'Office Fédéral de l'Economie des Eaux à Bienne.

#### Références:

- Beven, K., Binley, A. (1992). «The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction», *Hydrological Processes*, Vol. 6, pp 279–298.
- Cunge, J. A. (1975). «Two dimensional modeling of flood plain flows», in *Unsteady flow in open channels*, eds. Mahmood, K., Yevjevich, V., Water Resources Publications, Fort Collins, CO, USA.
- Cunge, J. A., Holly, F. M., Verwey, A., (1980). Practical Aspects of Computational River Hydraulics, Pitman Advanced Publishing, Boston, MA, USA.
- Cappelaere, B. (1997). «Accurate Diffusive wave routing», *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123 (3), pp. 174–181.
- Fathi-Maghdam, M., Kouwen, N. (1997). «Nonrigid, Nonsubmerged, Vegetative Roughness on Floodplains», *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123 (1), pp. 51–57.
- Fenema, R. J., Chaudhry, M. H. (1989). «Implicit Methods for Two-Dimensional Unsteady Free-Surface Flows», *J. of Hydraulic Research*, Vol. 27 (3), pp. 321–332.
- Gilard, O et Gendreau, N. (1999). «Inondabilité: une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants», *Revue des Sciences de l'Eau* 3, pp. 429-444.
- Hager, W.H. (1987). «Lateral Outflow Over Side Weirs», *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 113 (4), pp. 491–503.
- Harr, M. E. (1989). «Probabilistic Estimates for Multivariate Analysis», *Appl. Math. Modelling*, Vol. 13 (5), pp. 313–318.
- Hromadka, T. V., Berenbrock C. E., Freckleton, J. R. (1985). «A two-dimensional dam-break flood plain model», *Advances in Water Resources*, Vol. 8, March, pp. 7–15.
- McKay, M. D. (1988). «Sensitivity and Uncertainty Analysis Using a Statistical Sample of Input values», *Uncertainty Analysis*, Y. Ronen, Ed., CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- Metzger, R., Consuegra, D. (1998). «Etude Inondabilité: Evaluation des Modèles Numériques d'Altitude en Zone de Plaine». Rapport technique, HYDRAM, IATE, DGR, EPFL. CH 1015 Lausanne.
- Molinaro, P. and Natale, L. (1992). «Modeling Flood Propagation over Initially Dry Areas», *Proceedings of the Specialty Conference co-sponsored by ASCE-CNR/GNDI-ENELspa*, ASCE publication, ISBN 0-7844-0035-0.
- OFEE, Office Fédéral Economie Eaux (1997). «Dangers Naturels. Recommandations. Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire», OCFIM, 3000 Bern, Switzerland.
- Patankar S. V. (1980). «Numerical heat transfer and fluid flow», Hemisphere Publishing Corporation, New York, NY, USA.
- Rajaratnam N., Ahmadi R. M. (1979). «Interaction between main channel and flood plain flows», *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 105, HY5
- Romanowicz, R., Beven, K. (1998). «Dynamic real time prediction of flood inundation probabilities», *Hydrological Sciences*, IHW, Wallingford, UK Vol. 43 (2), pp. 181–196.
- Rossi, G., Harmancioglu, N. and Yevjevich, V. (1992). «Coping with Floods», Kluwer Academic Publishers, NATO ASI Series E: Applied Sciences-Vol 257.
- Schenk, F. (1995). «Cartographie des inondations. Aspects numériques». Travail pratique de diplôme, HYDRAM, IATE, DGR, EPFL. CH 1015 Lausanne.
- Schenk, F., Consuegra, D. (1998). «Etablissement des cartes de danger de la Petite-Glâne», Rapport d'expertise, HYDRAM, IATE, DGR, EPFL. CH-1015 Lausanne.
- Sinniger, R, Hager W. H. (1990). «Traité de Génie Civil, Tome 15: Constructions Hydrauliques», PPUR, Lausanne, Switzerland.
- Zhao D.H, Shen H.W., Tabios, G. Q., Lai, J. S., Tan, W. Y. (1994). «Finite volume two dimensional unsteady flow model for river basins», *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.120 (7), pp. 863–883.
- D. Consuegra, F. Schenk, R. Metzger, A. Musy  
Institut d'Aménagement des Terres et des Eaux  
Département du Génie Rural  
Ecole Polytechnique Fédérale  
CH-1015 Lausanne