

## **NOMOS - HIGH DEFINITION 2D MODEL FOR FLOODING HAZARD ASSESSEMENT**

### **NOMOS - UN MODÈLE BIDIMENSIONNEL À HAUTE RÉOLUTION POUR L'ÉTABLISSEMENT D'UNE CARTE DE DANGER**

Jérôme Dubois<sup>1</sup>, Niki Beyer Portner<sup>2</sup> et Didier Morard<sup>3</sup>

#### **RÉSUMÉ**

L'Office Fédéral de l'Environnement et du Paysage (OFEP) demande à toutes les communes suisses d'établir des cartes des dangers naturels. La commune de Bagnes a fait l'expérience que la carte des dangers hydrologiques actuelle n'offre pas une résolution et une précision suffisante pour juger efficacement la situation de danger des nombreux projets de construction dans la fameuse station de Verbier. Cette carte étant basée sur des calculs unidimensionnels et des visites de terrain, le Service routes et cours d'eau de la Commune de Bagnes décida d'établir une nouvelle carte de danger basée sur une restitution photogrammétrique et sur une modélisation hydraulique bidimensionnelle de haute définition.

La nouvelle carte délimite plus précisément les zones de danger. Par conséquent, les zones classées en danger moyen et élevé sont moins nombreuses et plus petites. La carte des profondeurs d'écoulement sous format numérique permet en outre d'établir un concept de protection d'objet adapté à chaque projet de construction. Les résultats des simulations permettent également d'observer les différents effets des constructions sur l'écoulement et les intensités des débordements.

**Mots-clés :** Modélisation bidimensionnelle, Dangers crue, Gestion des risques.

#### **ABSTRACT**

The Swiss Federal Office of the Environment (FOEN) requests all communities to establish hazard assessment maps. The community of Bagnes made the experience that the existing flooding hazard map, based on 1D computation and site inspections, was not detailed enough to settle on local construction projects in the famous mountain village Verbier. Therefore, the technical service of Bagnes decided to establish a new flooding hazard map based on a high definition terrain model and a 2D hydraulic model.

The new hazard assessment map allows a more precise delimitation of the hazard areas. In consequence, the areas with mean and high risk are smaller and less abundant. A numerical map of flow depth can be used to design customized flood protection measures for any new construction. The computation results also allow observing the influence of buildings on the behaviour and intensity of the flooding.

**Keywords:** 2D modelling, flood hazard, risk management.

#### **INTRODUCTION**

Conformément aux recommandations de l'OFEN, la commune de Bagnes a établi une carte de danger pour la station de Verbier en 2004.

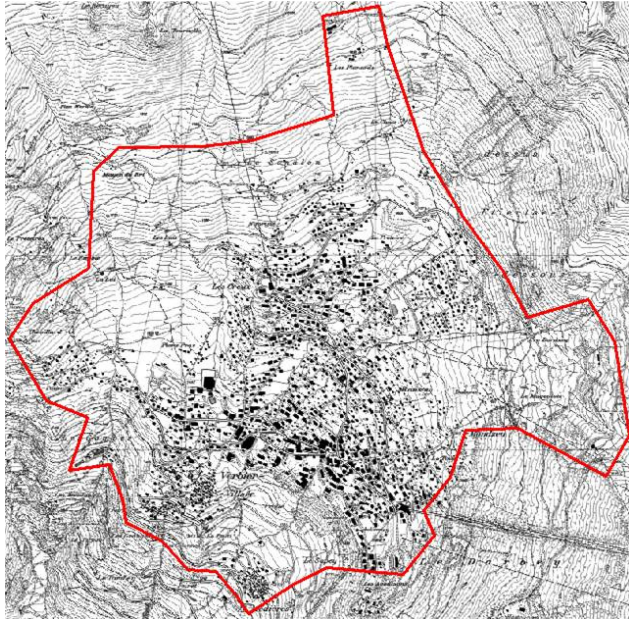
Cette carte de danger était basée sur l'évaluation de la capacité hydraulique des torrents, en particulier les passages sous routes et les ponts. La comparaison avec les débits de pointe de différentes périodes

---

<sup>1</sup> Dr. Jérôme Dubois, HydroCosmos SA, Suisse

<sup>2</sup> Dr. Niki Beyer Portner, HydroCosmos SA, La Petite Croix 21, 1681 Billens, Suisse (e-mail: info@hydrocosmos.ch)

<sup>3</sup> Didier Morard, Commune de Bagnes, Travaux Publics, Suisse



**Fig. 1** Périmètre d'étude.  
**Fig. 1** Study perimeter.

de retour donne un débit probable de débordement. Par des visites sur terrain, les zones touchées par les débordements et l'intensité du débordement ont été estimés en vue de l'établissement de la carte de danger.

Une importante activité de constructions de nouveaux chalets et commerces a montré le besoin de faire une analyse de danger locale plus détaillée pour chaque projet. La commune de Bagnes a alors décidé de mandater HydroCosmos SA pour la simulation des crues à Verbier à l'aide d'un modèle numérique de haute résolution.

Le périmètre d'étude concerne toute la station de Verbier soit une surface de 4.8 km<sup>2</sup> et sept cours d'eau avec leurs affluents principaux.

La méthodologie de l'étude peut être résumée comme suit :

1. Constitution d'un modèle numérique de terrain (MNT) détaillé de toute la zone d'étude. La technique utilisée est la photogrammétrie.
2. Constitution d'un modèle hydrodynamique 2D sur la base du MNT.
3. Simulation de chaque scénario de débordement, pour la crue centennale et la crue extrême, à chaque endroit critique de chaque cours d'eau, sur la base des informations contenues dans la carte des dangers.
4. Etablissement d'une carte d'intensité pour chaque scénario.
5. Etablissement d'une « carte des dangers à haute définition » sur la base de l'ensemble des scénarios.

## LA MAQUETTE NUMÉRIQUE

La maquette numérique est basée sur un modèle numérique de terrain détaillé. Ce modèle a été établi sur la base d'une photogrammétrie réalisée par PAT Photogrammétrie Aérienne et Terrestre SA à Sion. Sur la base des orthophotos prises à cette occasion, PAT a déterminé des points d'altitude et des lignes de ruptures avec une précision de quelques centimètres. Une attention particulière a été portée aux éléments qui peuvent canaliser les écoulements des débordements tels que :

1. les cours d'eau ;
2. routes avec les dévers ;
3. bord de route ou trottoir ;
4. murs de jardin et autres murs ;
5. maisons.

Pour établir une maquette numérique bidimensionnelle à partir d'un modèle numérique de terrain, il faut diviser le domaine d'étude en petite maille carrée de calcul. Les altitudes doivent donc être connues dans une grille régulière et les espaces entre les points correspondent à la taille de la maille de calcul.

Pour arriver à cette grille régulière de points d'altitude, les points relevés et les lignes de ruptures ont été intégrés dans un réseau de triangles. Les lignes de ruptures sont des lignes imposées et correspondent obligatoirement à des arrêtes des triangles. La figure 2 montre un extrait de ce modèle triangulé.

Ce modèle numérique de terrain à maille carrée régulière forme la base de la maquette numérique bidimensionnelle pour calculer les scénarios de crue. Ce modèle numérique de terrain ne contient pas de mailles à l'intérieur des bâtiments existants. Les bâtiments constituent en fait des obstacles aux

écoulements et ils ne sont en général pas traversés par l'eau. Ils ont donc été « sortis du domaine de calcul » comme le montre la partie droite de la figure 3.



**Fig. 2** Relevé photogrammétrique : à gauche les points, à droite les lignes de rupture.

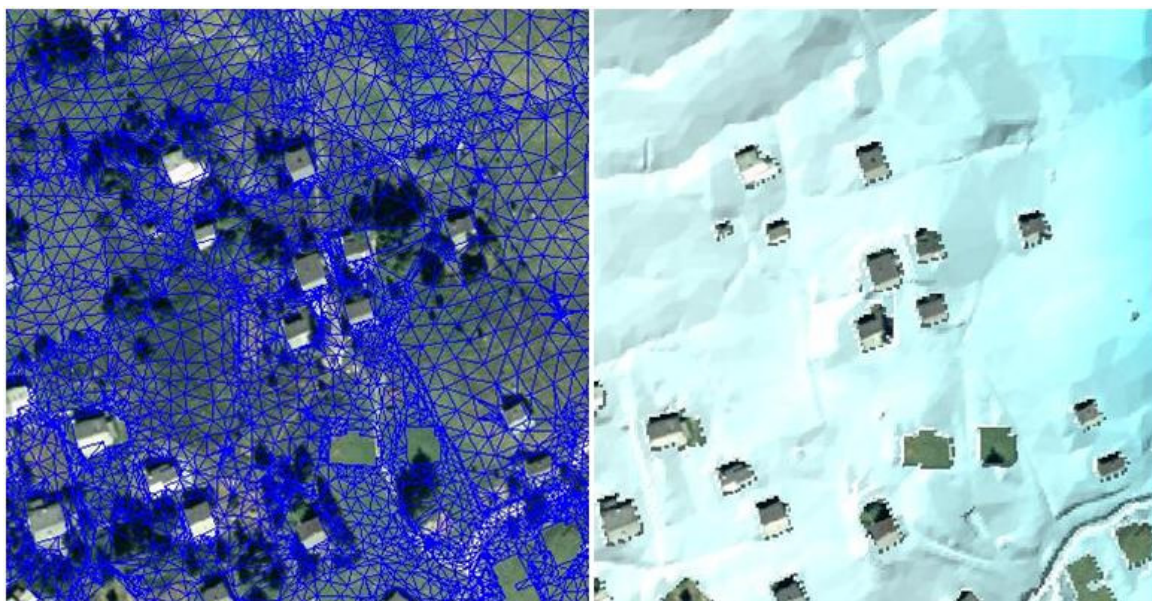
**Fig. 2** Photogrammetric survey: on the left hand side the points, on the right hand side the break-lines.

La maquette bidimensionnelle est établie à l'aide du logiciel Dunamic 2D qui a été développé par HydroCosmos SA. Il résout les équations complètes de St-Venant par la méthode des volumes finis. Les récents développements de l'hydraulique numérique y sont intégrés. Les flux aux interfaces des éléments sont résolus avec l'algorithme HLL (Harten, Laax, van Leer) modifié par Toro (Jihn-Sung et al. 2005 ; Roberts and Zoppou 2000). Les termes sources sont traités de manière particulière pour permettre une simulation sur topographie réelle. Les pertes de charge sont calculées à l'aide de la formule de Bathurst (Dubois 1998) qui se base sur la rugosité équivalente de sable comme paramètre, et permet de déterminer également le frottement des écoulements sur macro-rugosité.

Le logiciel Dunamic 2D autorise l'analyse non-stationnaire de tous les écoulements bidimensionnels. La numérique utilisée permet évidemment l'étude des écoulements en régime mixte (fluvial, torrentiel) et le positionnement automatique des ressauts, mais également l'analyse de la propagation de fronts sur un terrain sec. Les résultats du modèle ont été comparés aux solutions numériques de quelques cas tests classiques pour les modèles bidimensionnels. Il s'agit de la rupture de barrage dans un canal rectangulaire fermé, d'une rupture de barrage sur fond plat et d'un plan d'eau au repos sur un fond variable ou incliné (Boes et al, 2011). La comparaison a été satisfaisante et le modèle a ainsi pu être validé.

La base du modèle est un modèle numérique de terrain à maille carrée comme décrit ci-dessus. Les résultats primaires sont les profondeurs d'écoulement et le débit unitaire (ou produit vitesse • profondeur) en chaque point du modèle. Ces résultats correspondent aux paramètres utilisés pour l'établissement des cartes d'intensité et de danger. Ils permettent également de calculer la vitesse de l'écoulement, le temps d'arrivée du front, le niveau d'énergie, la force de frottement et d'autres caractéristiques d'un écoulement.





**Fig. 3** Modèle numérique de terrain : à gauche la triangulation, à droite les mailles carrées de calcul.

**Fig. 3** Numerical terrain model: on the left hand side the triangulation, on the right hand side the computation mesh.

La maille carrée choisie fait un mètre sur un mètre. Cette taille de maille constitue un optimum entre la précision du modèle numérique de terrain et le temps de calcul pour la simulation d'un scénario de crue.

La rugosité a été admise à 3 cm, ce qui constitue une bonne moyenne entre les terrains herbeux et les routes dont la majorité du périmètre modélisé est couvert. La condition initiale correspond à un terrain sec. Les conditions aux limites sont des bords imperméables pour tous les pourtours des bâtiments et les limites amont du modèle. A la limite aval, l'eau doit pouvoir sortir, sinon le modèle se remplit avec de l'eau, comme une retenue. Comme le terrain à Verbier a une forte pente en générale, un nombre de Froude égal à un peut être imposé. Cela correspond à imposer une section de contrôle à la sortie du modèle.

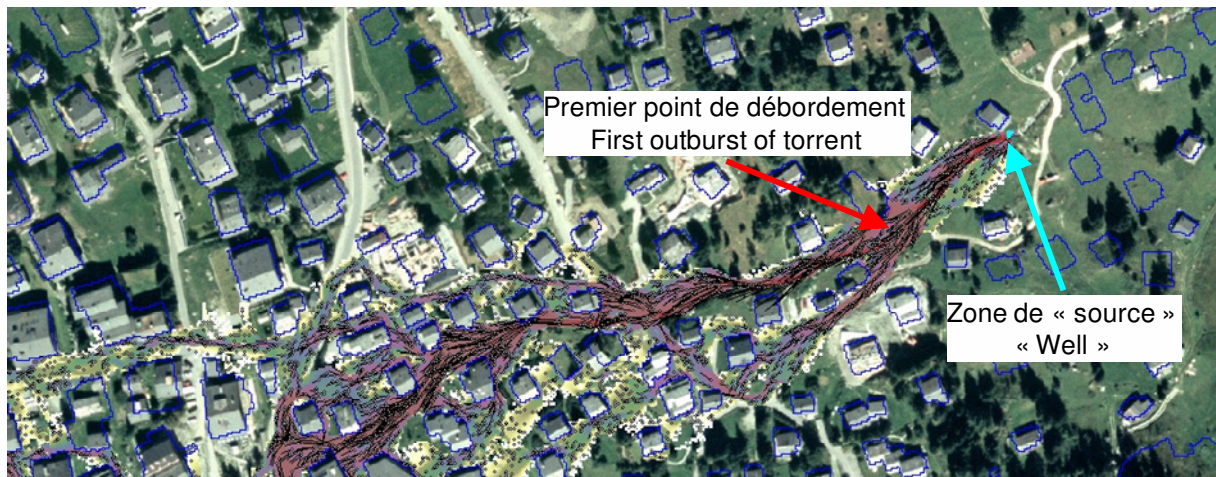
### SCÉNARIOS DE CRUE

Le débit est introduit par des zones de « sources » qui font jaillir l'hydrogramme du fond du torrent. Ces hydrogrammes ont été établis à l'aide de l'équation de Maxwell sur la base des débits de pointe de la carte de danger existante. Le débit de pointe est évidemment variable suivant le cours d'eau et le tronçon du cours d'eau. Uniquement la crue centennale et la crue extrême ont été simulées.

Il est admis que les ponts et les passages souterrains sont obstrués par des matériaux flottants et des sédiments lors des crues extrêmes simulées. Chaque pont constitue donc un barrage qui correspond à sa forme et à son altitude relevées lors de la photogrammétrie. Sur les passages souterrains, le terrain naturel a été relevé. Une exception est faite pour les ponts dont la capacité est suffisante pour évacuer la crue centennale. Ici, le lit du cours d'eau ne contient pas d'obstacle.

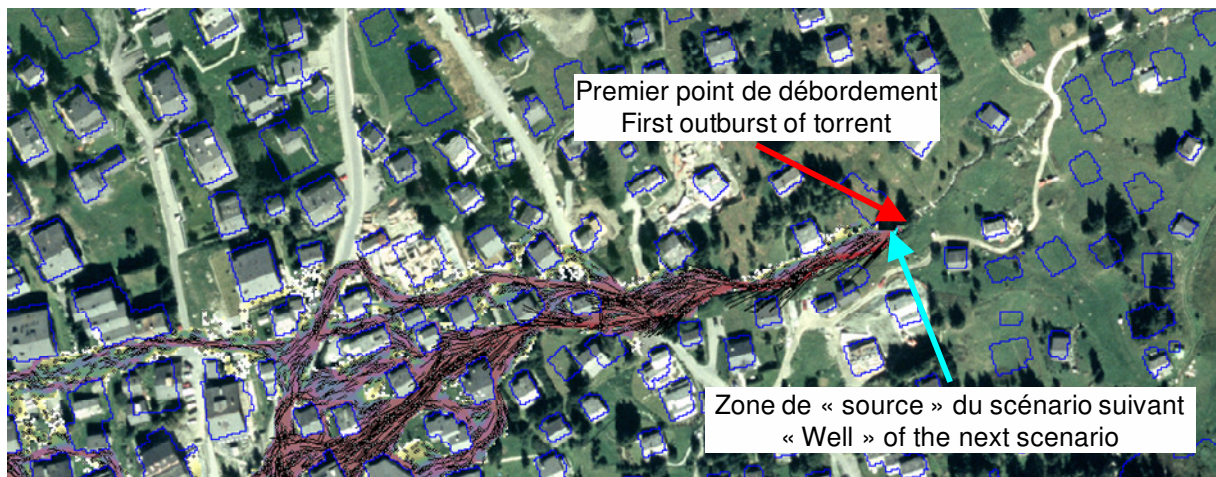
Mise à part l'obstruction des ponts, il n'a pas été tenu compte d'un transport en sédiments. La carte de danger de 2004 n'a mis en évidence aucun torrent à fort potentiel de laves torrentielles. La pente des torrents est très élevée et ne présente pas de tronçons avec une tendance à la déposition qui influencerait la capacité hydraulique.

Les scénarios ont été simulés depuis le haut vers le bas. L'hydrogramme correspondant a été injecté dans chaque cours d'eau séparément tout à l'amont du domaine de l'étude. Après analyse des résultats de la simulation, le prochain scénario a été simulé juste à l'aval du premier point de débordement. De cette manière, la totalité des débits se trouve toujours dans le cours d'eau, comme cela est de coutume pour l'établissement des cartes de danger. 93 scénarios ont ainsi été définis et simulés (44 pour la crue extrême).



**Fig. 4** Un scénario de crue sur le torrent de la Tinte.

**Fig. 4** One flood scenario of the torrent Tinte.



**Fig. 5** Le scénario de crue suivant sur le torrent de la Tinte.

**Fig. 5** The next flood scenario of the torrent Tinte.

## POTENTIEL DE LA MAQUETTE NUMERIQUE

Les résultats des simulations doivent d'abord permettre l'établissement des cartes d'intensités et de la carte de danger. Avec 93 scénarios pour la crue centennale et 44 scénarios pour la crue extrême, cette analyse a dû être automatisée.

1. L'intensité d'un débordement correspond au maximum des deux paramètres suivant dans une maille de calcul : la profondeur d'écoulement ou le produit de la profondeur d'écoulement fois la vitesse d'écoulement. Pour chaque scénario, il faut d'abord déterminer lequel des deux paramètres est prédominant.

$$\text{Intensité du scénario } i. I_i = \max \{ h_{\max}, (h \cdot v)_{\max} \}$$

2. Pour obtenir ensuite une carte d'intensité pour une période de retour donnée, il faut déterminer, pour chaque maille de calcul, quel scénario de crue de cette période de retour produit l'intensité maximale et sera donc le scénario prédominant.

$$\text{Intensité pour la période de retour } T \text{ avec } n \text{ scénarios : } I_T = \max \{ I_1, I_2, \dots, I_n \}$$

3. La carte de danger analyse ensuite les intensités de différentes périodes de retour pour déterminer une zone de danger pour chaque maille.

$$\text{Zone de danger : } Z = \text{fonction de } \{ I_{\text{fréquente}}, I_{\text{rare}}, I_{\text{très rare}}, I_{\text{extrême}} \}$$

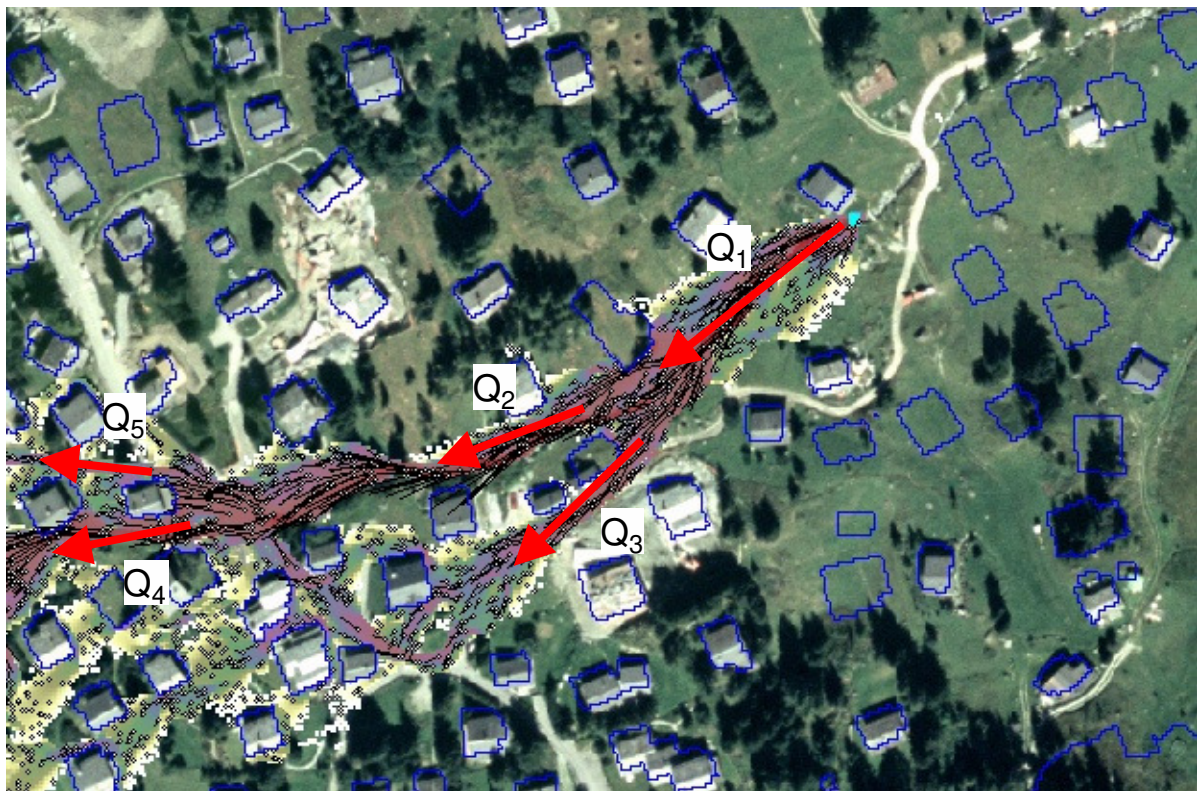
4. Pour faciliter l'analyse des résultats, chaque cellule garde en mémoire, de quel paramètre ou scénario elle a obtenu la valeur maximale. La carte d'intensité d'une période de retour contient donc le code du scénario gagnant dans chaque cellule.



L'établissement des cartes d'intensité et de la carte des dangers constitue une première analyse des résultats du projet NOMOS.

Le logiciel d'analyse des résultats permet également d'établir des cartes d'intensité ou des cartes de danger « future ». N'importe quel scénario peut facilement être sorti de l'analyse pour établir les cartes correspondant à la suppression de l'un ou l'autre point faible, donc d'un aménagement pour augmenter la capacité d'un tronçon avec débordements.

Un grand avantage d'une maquette numérique est que l'on ne dispose pas seulement des paramètres nécessaires pour l'établissement des cartes d'intensité et de danger, mais également d'autres paramètres et de leur évolution temporelle pour chaque maille de calcul. Ainsi, il est par exemple possible de déterminer les débits sortant du torrent à un point faible. Ce genre d'analyses peut être intéressant pour un plan d'intervention d'urgence, par exemple.



**Fig. 6** Analyse d'un scénario déterminant dans une zone donnée. Il est possible de calculer les débits débordés dans les différentes directions.

**Fig. 6** Analysis of a dominant flood scenario in a zone of interest. It is possible to compute the flow discharge in different directions.

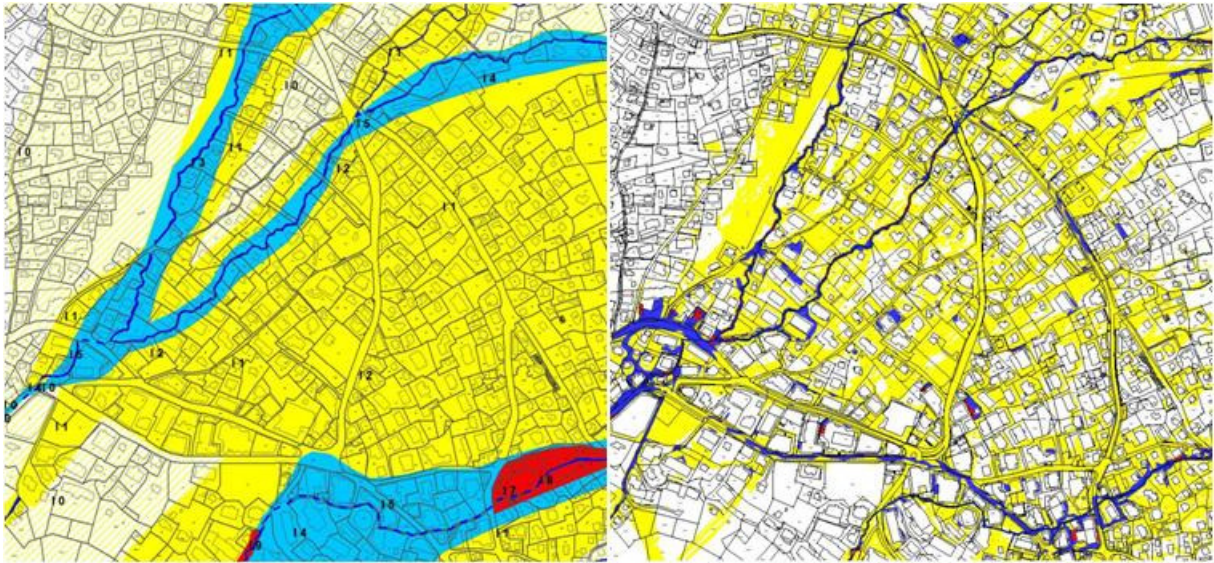
## CONCLUSIONS

Il est indispensable de faire quelques commentaires sur la carte des dangers NOMOS, surtout en comparaison avec la carte des dangers 2004 :

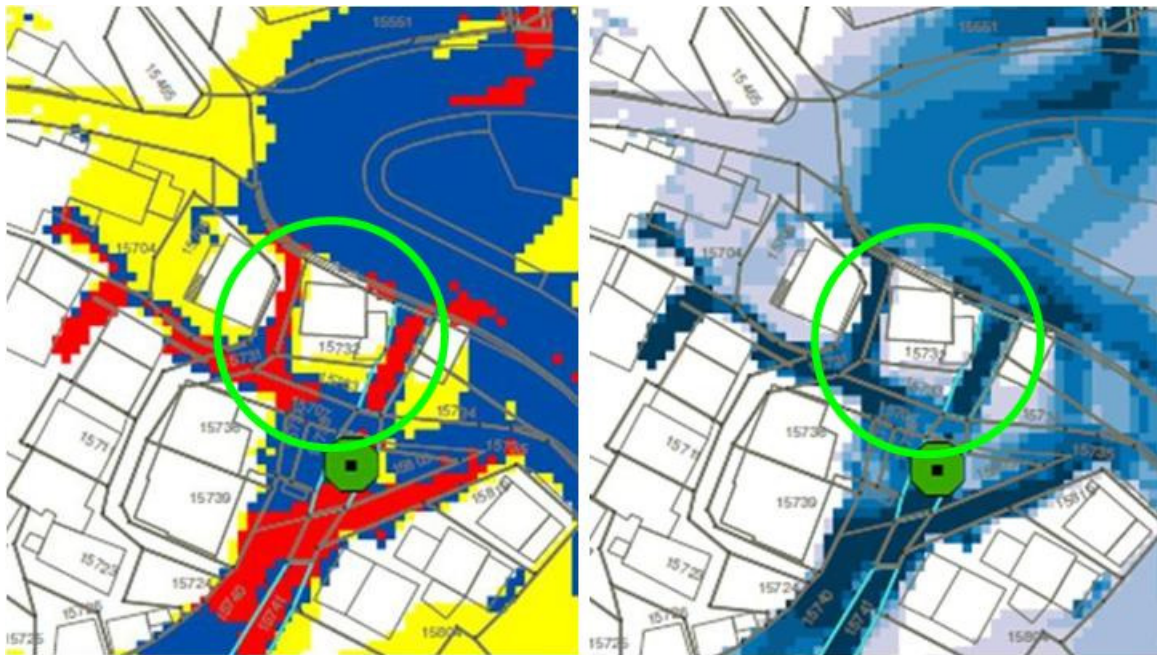
1. La carte des dangers NOMOS présente plus de surfaces sans dangers que la carte des dangers 2004. En fait, les simulations bidimensionnelles permettent de déterminer en détail les cheminements préférentiels de l'eau. L'eau débordée d'un torrent ne se répartit pas uniformément sur le terrain ; elle est très vite canalisée par des petite structures dans la topographie (routes, etc.).
2. La carte des dangers NOMOS présente beaucoup moins de surface bleue et rouge. Ceci est certainement dû en partie aux calculs d'intensités plus précis sur lesquelles elle se base. La carte des dangers de 2004 était basée sur la comparaison entre le débit de crue et la capacité du torrent. Cette méthode est approximative et incitera son utilisateur à surestimer les intensités pour palier les imprécisions de la méthode. Il « se met du côté de la sécurité ». D'autre part, la



crue centennale et la crue extrême sont les seules qui ont été simulées. Mais la crue fréquente peut rajouter des zones de danger bleu, car une faible intensité est déjà classée en bleu.



**Fig. 7** Comparaison de la carte de danger NOMOS (à droite) et de la carte de danger originale (à gauche).  
**Fig. 7** Comparison between the NOMOS flood risk assessment (on the right) and the original map (on the left).



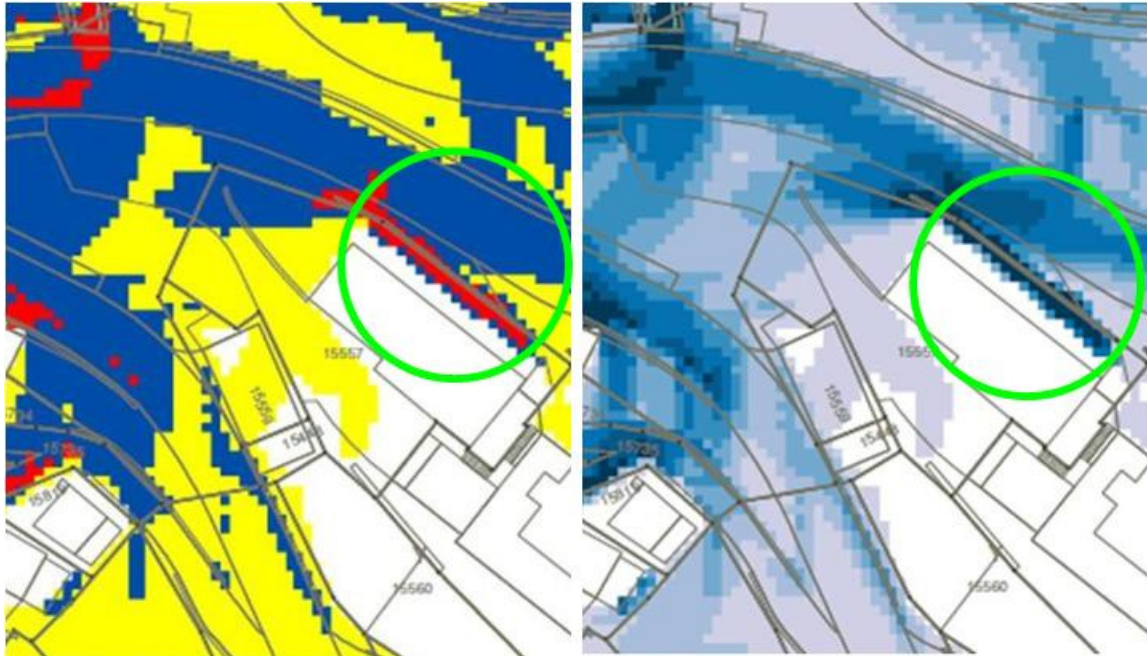
**Fig. 8** Influence des bâtiments sur l'intensité de l'écoulement (à droite) et la zone de danger (à gauche) : accélération de l'écoulement entre deux bâtiments rapprochés.  
**Fig. 8** Influence of buildings on flow and hazard assessment. Flow intensity on the right, hazard on the left: acceleration of the flow between two close buildings.

Outre ces différences entre les cartes de danger, les calculs détaillés de NOMOS montre quelques phénomènes dont l'observation peut être utile lors de la planification d'une nouvelle construction. Entre deux bâtiments rapprochés, la surface d'écoulement est réduite. L'eau doit couler plus vite ce qui peut conduire à une augmentation de l'intensité et du danger. L'étalement de l'eau débordée peut par contre réduire le danger (cf. figure 8).

Chaque construction perpendiculaire à la ligne de plus grande pente constitue un obstacle à l'écoulement potentiel d'un débordement. L'eau s'arrête, pour trouver un autre cheminement. Ceci

conduit à une augmentation de la profondeur d'écoulement contre la façade d'un bâtiment par exemple et par conséquent à une intensité et un danger plus élevé (cf. figure 9).

Ces résultats détaillés montrent également où l'eau peut entrer dans un garage souterrain. Ces entrées excavées se remplissent d'eau et se trouve souvent en intensité forte avec des profondeurs d'eau de plus de 2 m.



**Fig. 9** Influence des bâtiments sur l'intensité de l'écoulement (à droite) et la zone de danger (à gauche) : accumulation contre une façade.

**Fig. 9** Influence of buildings on flow and hazard assessment. Flow intensity on the right, hazard on the left: retention against a building.

Tous les détails qui peuvent être mis en évidence par les résultats d'une simulation de crues à l'aide d'une maque numérique à haute résolution sont très instructifs pour la planification de futures constructions. Ils montrent qu'il faut éviter des sous-sols accessibles à l'eau (garages et parking souterrain avec accès exposé à l'eau, caves avec saut-de-loup). Ils nous conseillent de protéger les façades exposées à l'écoulement et d'étaler les eaux débordées plutôt que de les concentrer afin d'éviter des intensités trop importantes.

## RÉRÉRENCES

- Boes R., Fäh R., Müller R., Rousselot P., Volz C., Vonwiller L. and Vetsch D. (2011). System Manuals of Basement, Version 2.2, July 2011. VAW.
- Dubois J. (1998). Comportement hydraulique et modélisation des écoulements de surface. Communications du LCH N° 8, EPFL, Editeur: Prof. Dr A. Schleiss.
- Jihn-Sung L., Gwo-Fong L. and Wen-Dar G. (2005). An upstream  $\square$ up-splitting finite-volume scheme for 2D shallow water equations. International Journal for Numrical Methods in Fluids 48 : 1149–1174.
- Roberts S. and Zoppou C. (2000). Robust and efficient solution of the 2D shallow water equation with domains containing drybeds. Anziam Journal 42 E : C1260-C1282.