

APPROCHE UNIFIEE DES INTERACTIONS ENTRE L'HYDRODYNAMIQUE ET LE MILIEU NATUREL OU CONSTRUIT

Exemples d'applications expérimentales et numériques

Prof. M. Piroton, P. Archambeau, S. Erpicum, S. Detrembleur & B. Dewals¹

*Département d'Hydraulique et de Transport
Hydrodynamique Appliquée et Constructions Hydrauliques (HACH)
Université de Liège, BELGIQUE²
<http://www.ulg.ac.be/hach/>*

1. INTRODUCTION

Même si le contexte contemporain fait évoluer les problèmes qui y sont liés, force est de constater que les défis majeurs attachés à l'eau subsistent ou se radicalisent. De l'écrêtement des crues au soutien d'étiage, du recours toujours croissant à l'eau pour l'activité industrielle au sens large au maintien de ses propriétés écologiques pour la consommation, tout concourt à faire du problème de l'eau un défi du 21^e siècle, bien rare à épargner et à gérer plus efficacement.

Qu'elle s'intéresse à l'origine, à la consommation ou à l'utilisation de l'eau ou encore qu'elle se tourne vers les conséquences possibles des infléchissements que l'homme peut provoquer sur le cycle de l'eau, la gestion actuelle des ressources hydrauliques ne peut plus ignorer les nouvelles potentialités nées de l'accroissement rapide des possibilités numériques qui permettent, avec les acquis théoriques en mécanique des fluides, de développer des outils d'aide à la décision applicables à des situations grandeur nature.

Parmi tous les domaines de l'hydraulique touchés par le numérique, l'intérêt du HACH à modéliser l'ensemble des écoulements à surface libre résulte simplement de leur prépondérance dans les phénomènes hydrodynamiques influents sur lesquels on s'efforce d'agir. A l'échelle du système hydrologique global, le souci de gérer, donc d'anticiper les phénomènes naturels et accidentels, conduit ainsi à couvrir avec des approches physiquement basées les différentes étapes que connaît la goutte d'eau lorsqu'elle frappe la surface terrestre, du ruissellement au gonflement des rus, rivières et zones de stockage, jusqu'aux grands fleuves et voies intérieures de navigation.

Délaissant volontairement le formalisme des équations utilisées et des méthodes numériques de résolution, cet article s'attache à prouver la pertinence du recours au numérique par une illustration chronologique (au fil de l'eau) de quelques situations réelles gérées par la suite des programmes WOLF, complètement écrits au sein du HACH.

¹ Aspirant du Fonds National de la Recherche Scientifique

² Institut du Génie Civil, Chemin des Chevreuils, 1 - Bât.B52/3+1, B4000 Liège - Tél: 4 366 95 36 - Fax : 4 366 95 58

2. WOLF : SUITE INTEGREE DE LOGICIELS HYDROLOGIQUE ET HYDRODYNAMIQUES

2.1. INTERFACE DE TRAVAIL

Il est assez symptomatique de débiter l'illustration de WOLF par quelques mots sur son interface. Il émane en effet d'une expérience de plus de 15 ans en hydraulique numérique que l'expertise de l'hydraulicien face à la quantité toujours croissante d'informations générées ne peut pleinement s'exprimer qu'avec une interface originale et conviviale de pré- et post-traitement, unifiée pour l'ensemble des logiciels.

Cette interface est développée à la fois pour mettre rapidement en œuvre l'ensemble des données relatives à toute simulation complexe (génération automatique de maillages ou de conditions limites) ainsi que pour visualiser et animer (vidéos) en temps réel les résultats en deux ou trois dimensions pour chaque maille de discrétisation (hauteurs, débits, vitesses, Froude, charge totale, pistage de particules...).

Entièrement développée au sein du HACH (Figure 1), cette interface s'apparente aujourd'hui à un véritable Système d'Information Géographique (gestion de cartes multicouches), tout en tirant pleinement parti de la convivialité d'utilisation que procure l'environnement Windows [1]. Les codes de calcul sont programmés en Fortran 95, lequel procure une rapidité et une puissance de calcul scientifique incontestées.

WOLF offre un environnement de travail unifié et confortable pour tout modélisateur en lui proposant un tableur simplifié (permettant l'édition en interne de toutes les matrices utiles au calcul, l'échange de données avec le tableur Excel, des possibilités de lissage ou d'ombrage), la génération de zooms ou de coupes, la gestion d'une palette de dégradés en vraies couleurs (24 bits) ou la superposition d'informations raster et vectorielles utiles pour visualiser des résultats sur un fond de carte, ...

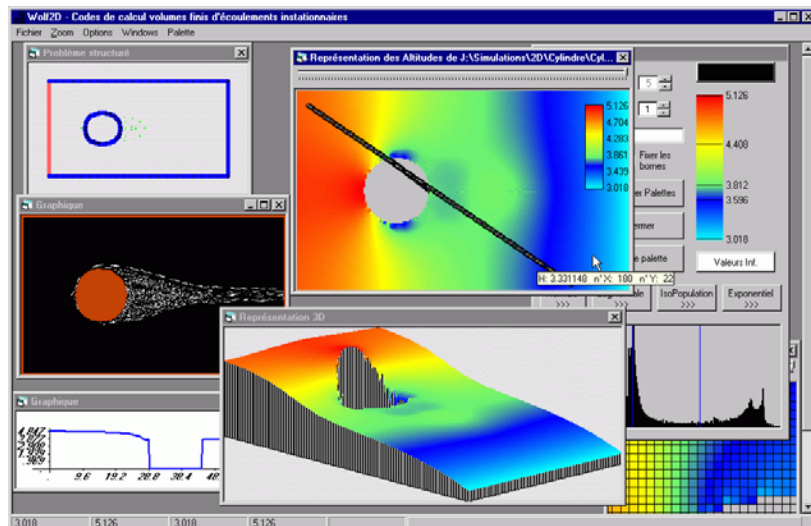


Figure 1 : Capture d'écran d'une fenêtre WOLF personnalisée par l'utilisateur.

2.2. ORGANISATION GENERALE DE L'ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL WOLF

Dans cette interface de travail aux utilités multiples sont offerts plusieurs niveaux de modélisation, de l'hydrologie physiquement basée à l'hydrodynamique quasi-tridimensionnelle en topographie naturelle (éléments immergés et émergés), en passant par les écoulements filaires en réseaux naturels de cours d'eau en sections composées naturelles (lits mineurs et majeurs potentiellement

sollicités), chaque étape étant indifféremment gérée au choix avec évaluation des effets sédimentaires concomitants [2, 3] ou avec prise en compte de processus d'aération [4] de la lame fluide (Figure 2).

L'évolution de concert des différents modules de calcul est rendue possible par la mise au point d'une méthode unifiée de résolution des équations adaptées à chaque phénomène [5]. Cette approche exploite l'idée fondamentale que tout type d'écoulement de surface, à son échelle, présente les mêmes potentialités de développer une coexistence de zones de solutions continues et discontinues dont les limites (ressauts) varient dans le temps et l'espace.

L'aptitude à résoudre ces discontinuités en exploitant la « seule solution faible » des équations est fondamentale quels que soient les phénomènes considérés (depuis une lame ruisselante de quelques millimètres jusqu'à un front de plusieurs mètres consécutif à une rupture) car elle conditionne la précision de toute la solution et, partant, la confiance qu'on peut associer à l'interprétation finale des simulations pratiques réalisées avec WOLF.

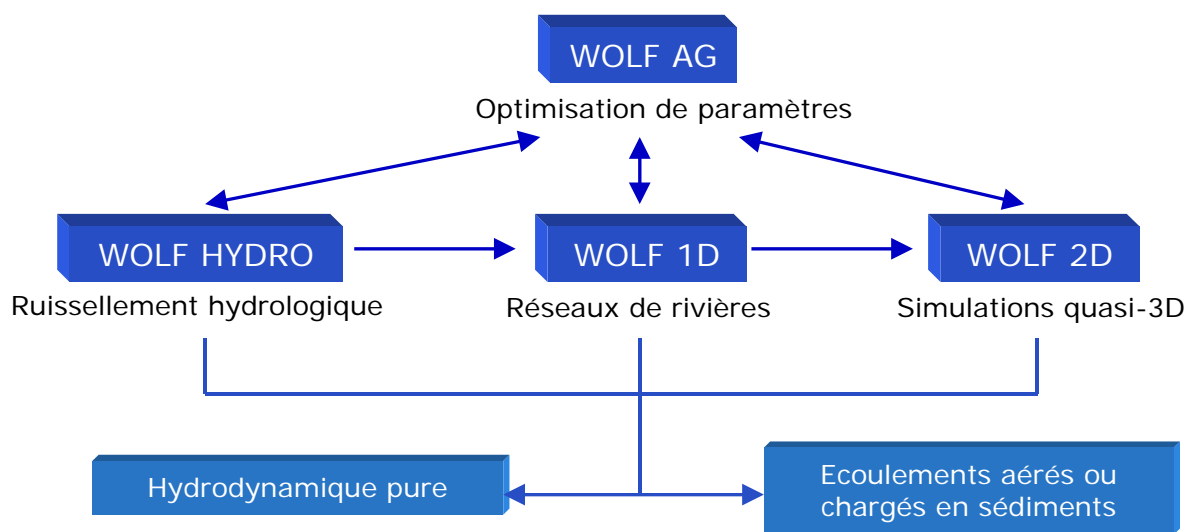


Figure 2 : Organisation générale des modules de calcul de WOLF.

3. OPTIMISATION PAR METHODES INVERSES

3.1. INTRODUCTION

L'algorithme d'optimisation WOLF AG a été développé et implémenté pour être à même d'exploiter pleinement les énormes capacités des logiciels de la suite WOLF [6, 7]. Basé sur la méthode des algorithmes génétiques, il permet d'optimiser la valeur d'à peu près n'importe quel paramètre disponible dans les logiciels WOLF HYDRO, WOLF 1D et WOLF 2D en exploitant des événements de référence disponibles. Il permet également d'optimiser des scénarios de gestion paramétrés pour des ouvrages hydrauliques d'un réseau hydrographique quelconque, constituant dès lors un véritable outil d'aide à la décision.

Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes d'exploration fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique qui travaillent sur une population de N représentations codées (chaînes) des paramètres à optimiser. A l'aide d'une fonction objectif qui traduit l'adaptation des valeurs testées par rapport au problème à résoudre, l'algorithme fait évoluer « de façon naturelle » les populations avec comme principe directeur que les chaînes les mieux adaptées, pour lesquelles la valeur de la fonction objectif est la plus grande, ont plus de chance de survivre et de conduire à la solution optimale.

Les AG se situent donc entre les méthodes classiques d'optimisation et les méthodes purement aléatoires ou d'exploration systématique en menant de façon intelligente une exploration pseudo-aléatoire de l'espace de variation des paramètres du problème à optimiser.

Les AG permettent en principe de s'affranchir de la difficulté qu'ont les méthodes plus traditionnelles à étudier des fonctions bruitées et discontinues ou à assurer la convergence vers un extremum absolu, tout en évitant un parcours systématique extrêmement coûteux des espaces de variation des paramètres.

3.2. COMBINAISON DE WOLF HYDRO ET WOLF AG

3.2.1. INTRODUCTION

La rapidité de développement du matériel informatique aiguise l'envie des hydrologistes d'exploiter les potentialités des modèles numériques de terrain basés sur les technologies récentes les plus pointues.

C'est dans cette volonté de remplacer les modèles hydrologiques empiriques globaux par des approches distribuées résolvant plus ou moins complètement les équations de l'hydrodynamique que s'inscrit depuis de nombreuses années le HACH. Ses approches originales de modélisation des écoulements sur et dans la couche superficielle ont déjà montré leurs potentialités tant dans la prévision que dans la gestion des crues, en aidant les gestionnaires dans le choix de politiques d'altération des propriétés du bassin versant.

L'approche physiquement basée présente pour avantage principal de réduire les phases de calage des paramètres sur un bassin déterminé, dès lors que la frange de valeurs de chacun d'entre eux a une signification physique et est beaucoup mieux connue. Toute modification des propriétés trouve par ailleurs aisément son pendant dans une modification adéquate de la valeur des paramètres, ouvrant la porte à une démarche prévisionnelle sur les politiques d'aménagement des bassins.

Résultant d'une filière déjà longue de versions basées sur des approches mathématiques et numériques variées, le module WOLF HYDRO recourt à la technique des volumes finis pour résoudre les équations conservatives dites de l'onde diffusive, calculant les écoulements en fine lame et leurs échanges avec le monde extérieur sur tout modèle numérique de terrain.

L'événement pluvieux peut être considéré en intégrant l'hétérogénéité du terrain, l'évolution temporelle de ses propriétés, l'irrégulière répartition des précipitations et leur évolution spatiale avec le temps, conformément au déplacement des fronts nuageux.

Diverses lois de frottement (Manning, Darcy-Weissbach, Bathurst, Dubois...) sont disponibles de manière à prendre en compte les différentes dynamiques existant dans les écoulements à surface libre et, plus précisément, l'écoulement en macro-rugosité caractéristique du ruissellement.

Le modèle maillé gère explicitement trois couches superposées (Figure 3) modélisant respectivement l'écoulement en fine lame sur le terrain, l'écoulement hypodermique et le transfert vers les nappes profondes. L'évaluation permanente de leurs interactions, couplée au calcul détaillé de leurs mouvements dans le plan $x-y$, permet de simuler de longues périodes sans arrêt du logiciel.

Le traitement d'une information topographique numérisée (MNT) à l'aide du logiciel WOLF HYDRO se réalise en parfaite adéquation tant avec la modélisation hydrologique complète envisagée qu'avec la dynamique spécifique d'écoulement en réseau drainant de rivières.

Les dépressions et zones plates du modèle numérique de terrain sont d'abord traitées par de légères corrections automatiques des altitudes de manière à assurer un cheminement ininterrompu de chaque maille vers un exutoire et à rendre calculable la convergence des écoulements.

La détermination itérative des chemins diffus de ruissellement, de l'emprise du bassin versant drainé par une maille et du réseau hydrographique correspondant est ensuite complètement automatique et ne demande l'intervention de l'utilisateur qu'au moment de définir l'exutoire.

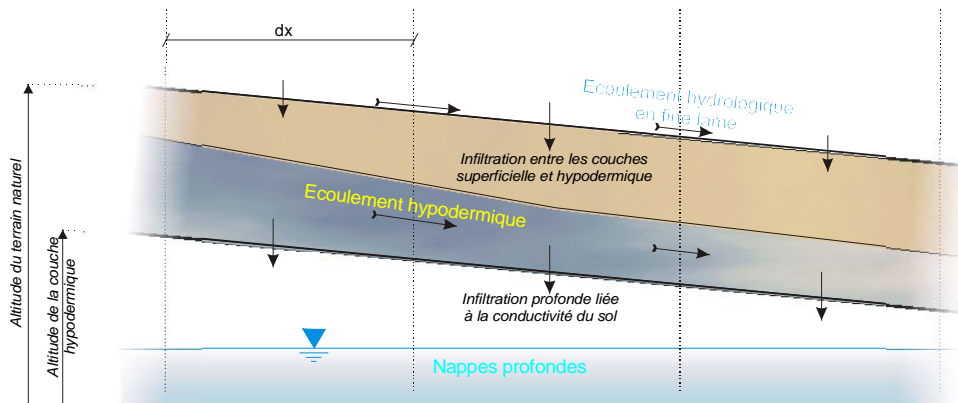


Figure 3 : Représentation des trois couches et des écoulements relatifs.

3.2.2. APPLICATION AU BASSIN SUISSE DE MATTMARK

La Suisse dispose d'ouvrages hydrauliques de stockage parmi les plus remarquables au monde. Leur exploitation sécuritaire doit envisager leur comportement hydraulique pour des épisodes pluvieux extrêmes notamment dans le cadre d'évolutions climatiques. Dans le cadre de l'exemple illustré, ce sont les capacités d'évacuation qui retiennent l'attention dans des conditions extrêmes.

Au départ d'une donnée pluviométrique exacerbée, il s'agit donc de pouvoir déterminer la réaction du bassin dans certaines conditions d'écoulement particulièrement défavorables. Tout l'intérêt d'un modèle physiquement basé et spatialement distribué s'explique d'une part par la possibilité d'agir sur les paramètres physiques du bassin versant afin de présenter le terrain dans des conditions physiques données et, d'autre part, par la possibilité d'envisager un phénomène pluvieux extrême spatialement distribué résultant d'un modèle météorologique sophistiqué.

La base topographique de départ est un modèle numérique d'altitude disponible sur tout le territoire, illustré sur le bassin de Mattmark (Figure 4) par un « pavé » de la carte générale (Figure 5) couvrant une surface globale de 150 km² (maillage d'environ 200.000 nœuds). Une vue en ombré de cette topographie peut être facilement obtenue par l'interface d'utilisateur de WOLF. Le réservoir apparaît clairement au centre de la Figure 7.

La modélisation complète d'un événement extrême consiste en un premier calcul hydrologique (Figure 8). Au terme des phases automatiques de correction topographique et de détermination du réseau drainant (Figure 6), l'étape hydrologique fournit les hydrogrammes latéraux temporellement et spatialement distribués qui se déversent dans le réseau hydrographique.

La deuxième étape consiste en une propagation de ces apports jusqu'à la retenue avec WOLF 1D. Le résultat de cette filière est un hydrogramme simulé pour une pluie uniforme extrême, temporellement variable.

Sur base d'un hydrogramme reconstitué comme comparaison, les paramètres de simulation ont enfin été optimisés à l'aide de WOLF AG. Les valeurs trouvées sont en parfait accord avec celles observées sur site lors de la mesure, tout en conduisant à un hydrogramme calculé en très bonne concordance avec celui mesuré. L'intérêt d'une telle approche objective est de conforter la pertinence de la modélisation physiquement basée puisqu'on retrouve « automatiquement » des valeurs de paramètres dans la frange des valeurs physiques, tant au niveau des propriétés des sols que des valeurs de frottement. Ainsi, le calage tend au niveau de la dynamique à des valeurs de

perméabilité des sols tout à fait conformes à la situation de référence, avec une contribution hypodermique peut marquée et un ruissellement en macro-rugosité exacerbé.

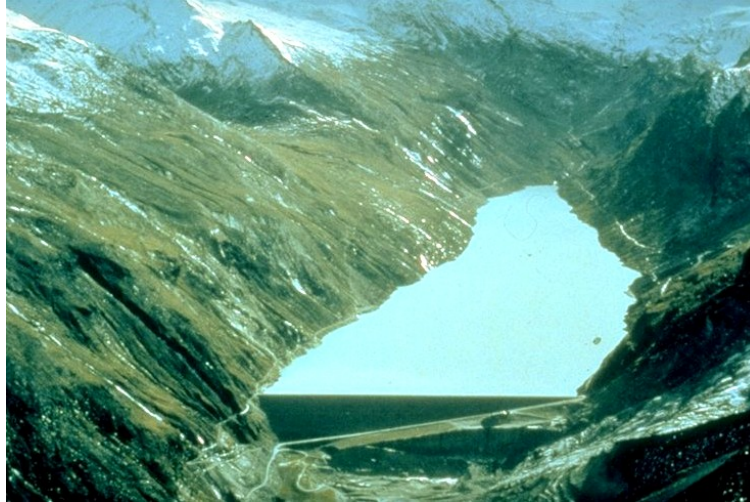


Figure 4 : Vue générale de la digue et du réservoir de Mattmark.

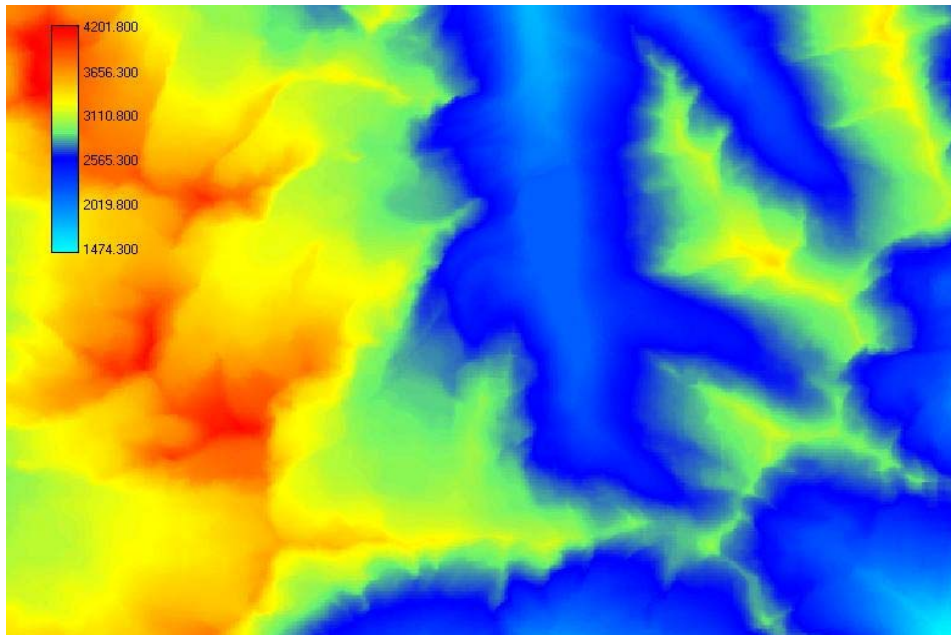


Figure 5 : « Pavé » du modèle numérique de terrain englobant le bassin étudié.

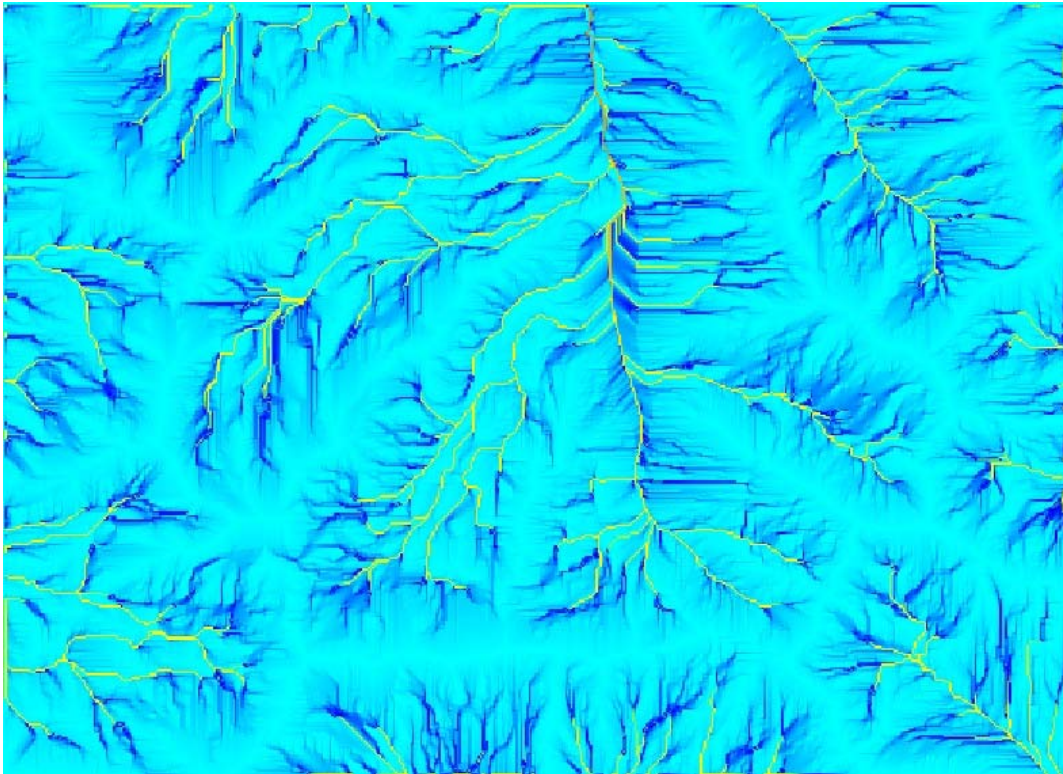


Figure 6 : Carte des convergences relative au « pavé » numérique de la Figure 5.

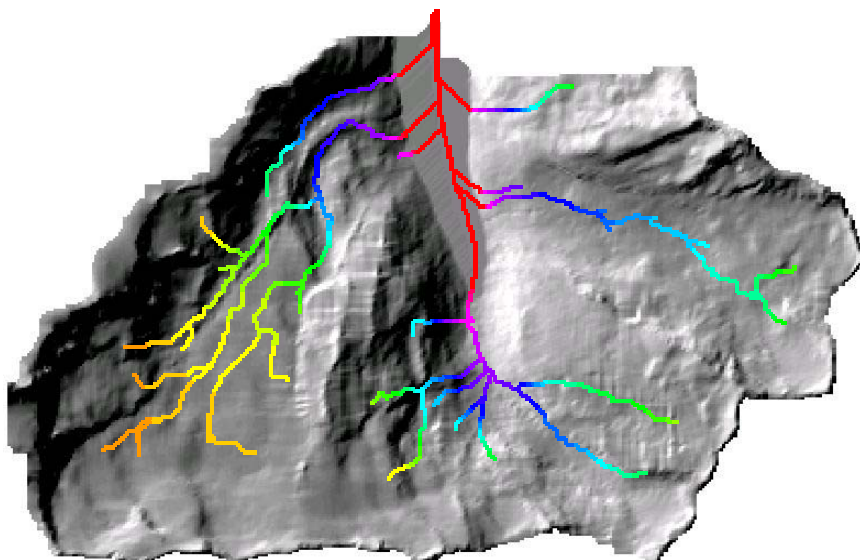
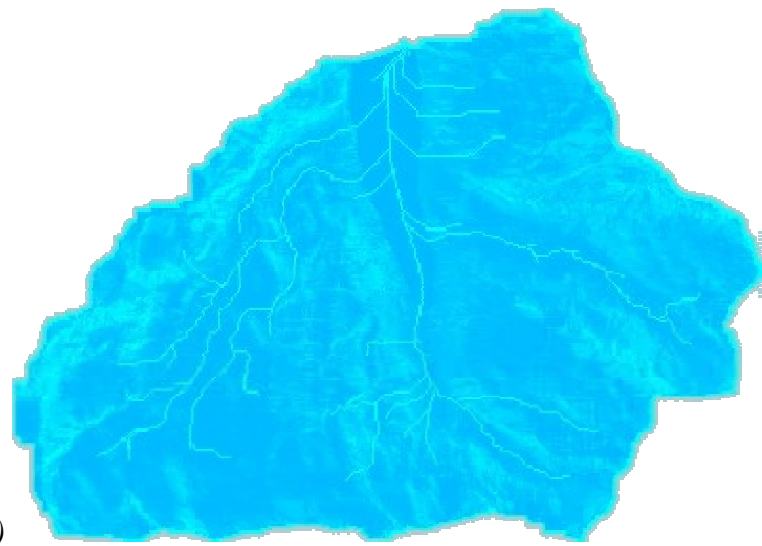
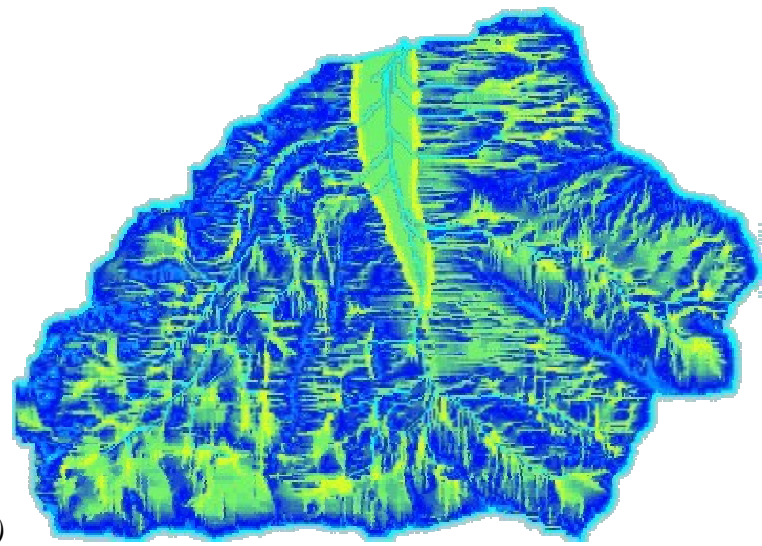


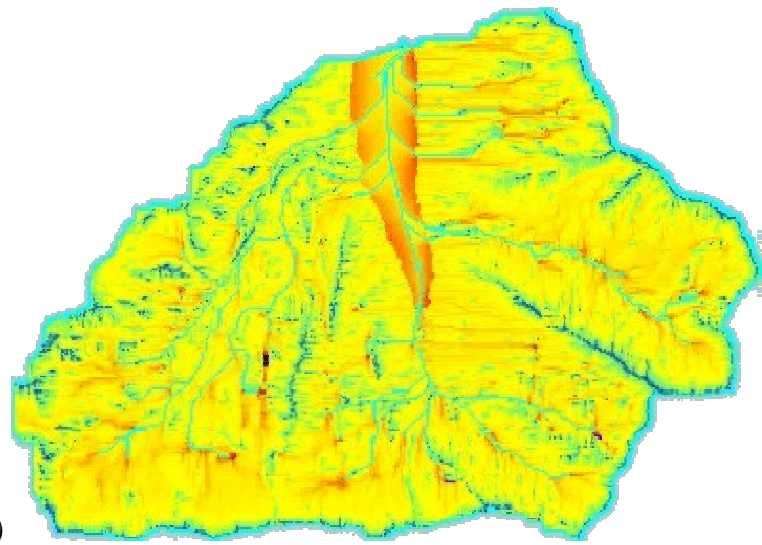
Figure 7 : Bassin versant et réseau drainant automatiquement généré par WOLF HYDRO.



(a)



(b)



(c)

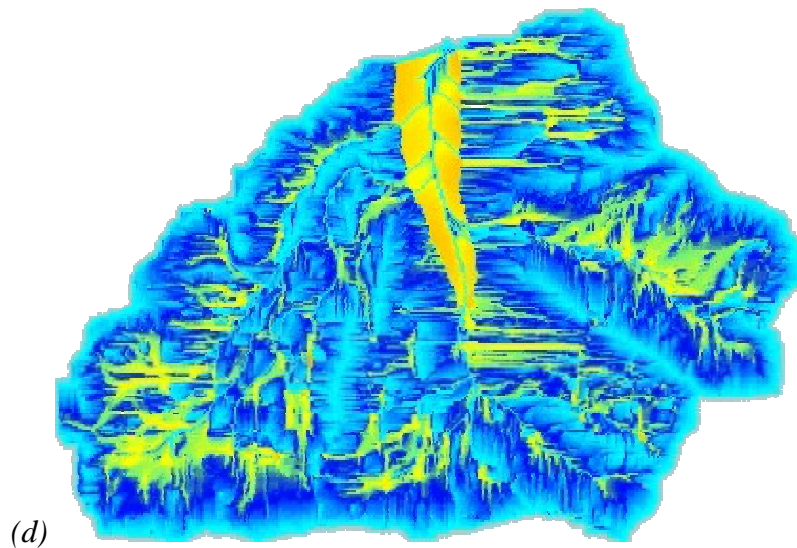


Figure 8 : Instantanés des hauteurs de ruissellement sur le bassin. (a) Bassin sec, (b) début de la pluie, (c) pendant la pluie, (d) concentration du ruissellement après la fin de la pluie. Des visualisations similaires sont disponibles pour les deux autres couches également.

3.3. COMBINAISON DE WOLF 1D ET WOLF AG : OPTIMISATION D'UN PLAN DE TURBINAGE D'UNE CASCADE DE CENTRALES HYDROELECTRIQUES A FAIBLE CHUTE

WOLF AG est également appliqué à l'optimisation contrainte du plan de turbinage de réseaux de centrales hydroélectriques, telles que celles implantées sur le complexe hydrographique belge formé par la Warche et l'Amblève (Figure 9 et Figure 10).

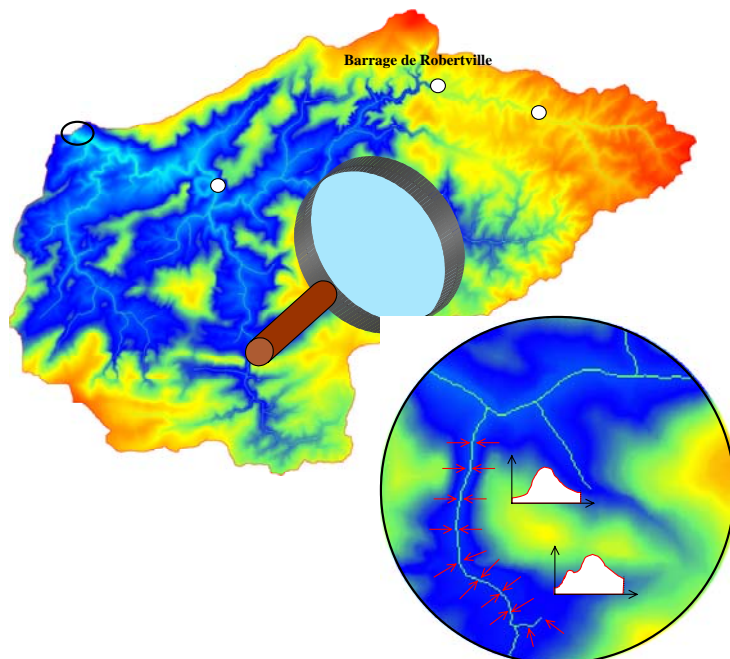


Figure 9 : Topographie du bassin de l'Amblève (Belgique et) et schéma du mécanisme d'apports latéraux dans le réseau de rivières.

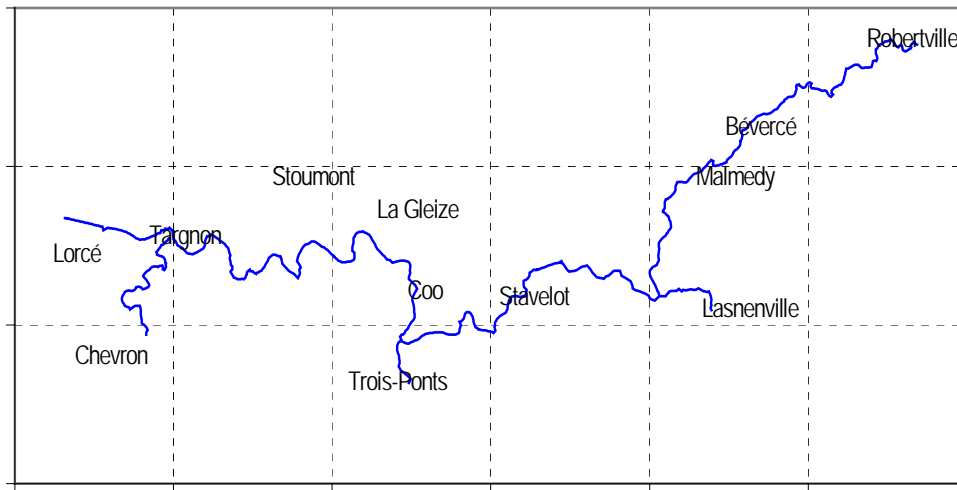


Figure 10 : Réseau de rivière modélisé.

Le but de cette étude consiste à déterminer les paramètres optimums de l'hydrogramme lâché au barrage de Robertville de façon à maximiser le profit total généré par son exploitation aux différents outils de production présents sur le réseau, tout en modifiant le moins possible les conditions d'écoulement actuelles afin de ne pas perturber la faune présente dans le réseau ni induire des perturbations d'écoulement.

La Figure 11 illustre l'hydrogramme paramétré à l'aide de quatre valeurs caractéristiques et injecté à l'amont du modèle 1D, puis propagé dans le réseau par le logiciel WOLF 1D sur une période de 48 heures. L'hydrodynamique résultant de la combinaison de chaque tentative de lâcher suggérée par WOLF AG et des apports hydrologiques précédemment évalués est ainsi calculée par WOLF 1D le long des 60 kilomètres de rivières utiles discrétisés. L'encodage des données topographiques exactes du lit mineur explique partiellement la fiabilité constatée des hydrogrammes de rivière au droit de chaque installation, qui permettent une évaluation précise de sa production.

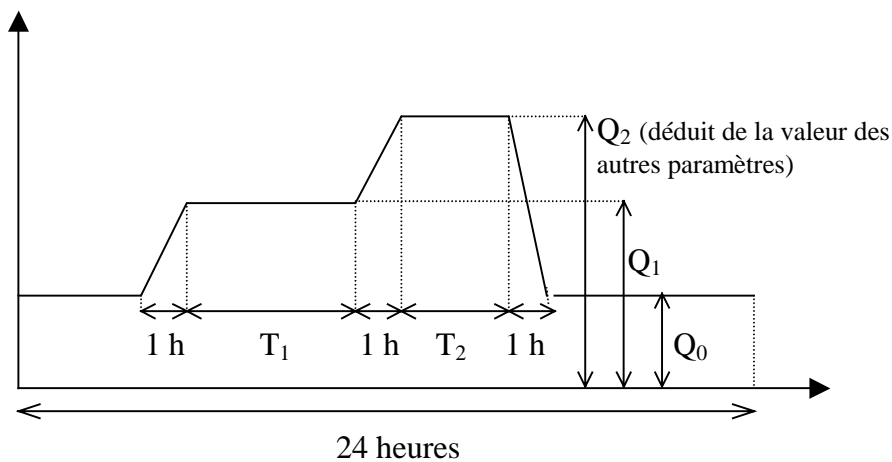


Figure 11 : Hydrogramme paramétré.

Les contraintes sur les paramètres imposent que Q_1 soit supérieur à Q_0 , que le débit maximum turbinable ne soit pas dépassé, que la durée de l'hydrogramme injecté n'excède pas les 24 heures correspondant à une période complète de turbinage et bien entendu que les débits minimum et maximum soient respectés.

La maximisation s'opère sur le profit, pour un volume lâché fixé, à partir des courbes adimensionnelles de rémunérations du kWh, convertissant la production potentielle des centrales hydroélectriques étudiées.

L'optimum suggéré par l'algorithme génétique procure une amélioration relative de plus ou moins 2,5 % de la production et de 6 % du profit généré par rapport à la situation réelle dans la simulation présentée ici (Figure 12 et Figure 13). Au-delà d'un gain sensible constaté sur une série de situations atmosphériques récurrentes, il est intéressant de souligner que les politiques optimisées, difficilement prévisibles sans outil adapté, réconcilient souvent les différents acteurs du cours d'eau en rencontrant des objectifs moins antagonistes qu'escomptés.

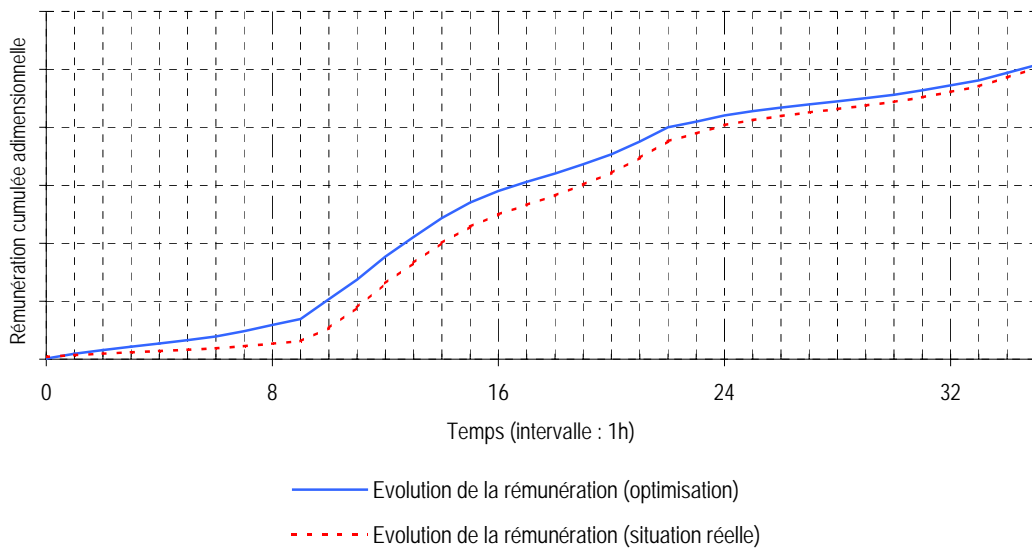


Figure 12 : Résultats de l'optimisation en terme de puissance fournie cumulée.

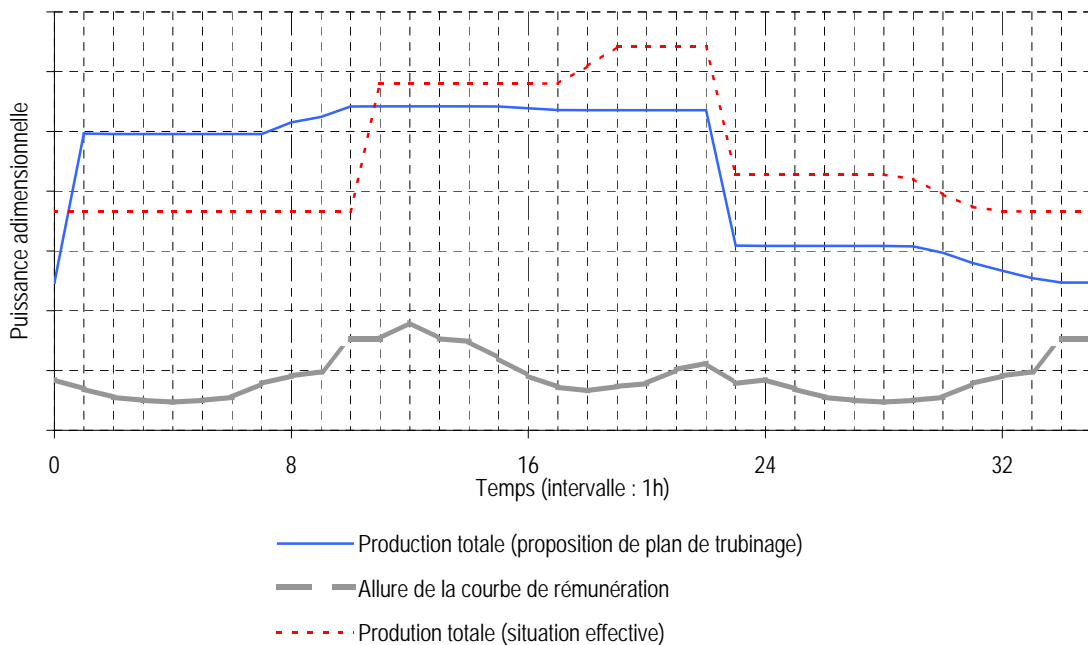


Figure 13 : Résultats de l'optimisation en terme de puissance fournie.

4. WOLF 2D : MODELISATION QUASI-TRIDIMENSIONNELLE D'ÉCOULEMENTS COMPLEXES

4.1. DIMENSIONNEMENT DE LA STRUCTURE DE DISSIPATION D'UN ORGANE D'ÉVACUATION DE CRUE

La perspective d'une évolution climatique ou la meilleure connaissance de l'hydrologie des sites exploités tendent à pousser à la hausse les paramètres hydrauliques de dimensionnement des structures de régulation. La vérification des marges sécuritaires, des capacités d'évacuation ou l'optimisation de gestion de ces ouvrages s'imposent dès lors comme des préoccupations reconnues internationalement.

Le barrage de Nisramont (D. 241 - MET) s'inscrit dans ce contexte, d'autant que son rôle a considérablement évolué depuis sa construction, en tant que batardeau d'un ouvrage plus imposant. La modélisation numérique permet aujourd'hui une analyse globale de l'ouvrage et de ses aménagements éventuels depuis les évacuateurs de crues (capacité, fonctionnement en conditions extrêmes) jusqu'aux ouvrages avals (coursier, bassin de dissipation, restitution à la rivière) en passant par l'aménagement d'organes d'évacuation complémentaires.

Ces modélisations quasi tridimensionnelles s'appuient sur une description très fine de la topographie (Figure 14) tant du barrage que de la retenue ou de son aval direct. Elles ont pour particularité de simuler d'un seul tenant le complexe retenue – barrage – restitution malgré des changements radicaux de régime d'écoulement.

La fiabilité de ce type d'outil performant d'aide au design et à la gestion est illustrée notamment par comparaison des hauteurs d'eau atteintes mais également par le positionnement correct du ressaut hydraulique, dissipateur principal de l'énergie de l'écoulement en aval de l'évacuateur. Cette adéquation est illustrée par une comparaison entre la photo de la Figure 16 et les résultats de simulation représentés à la Figure 15 et la Figure 17.

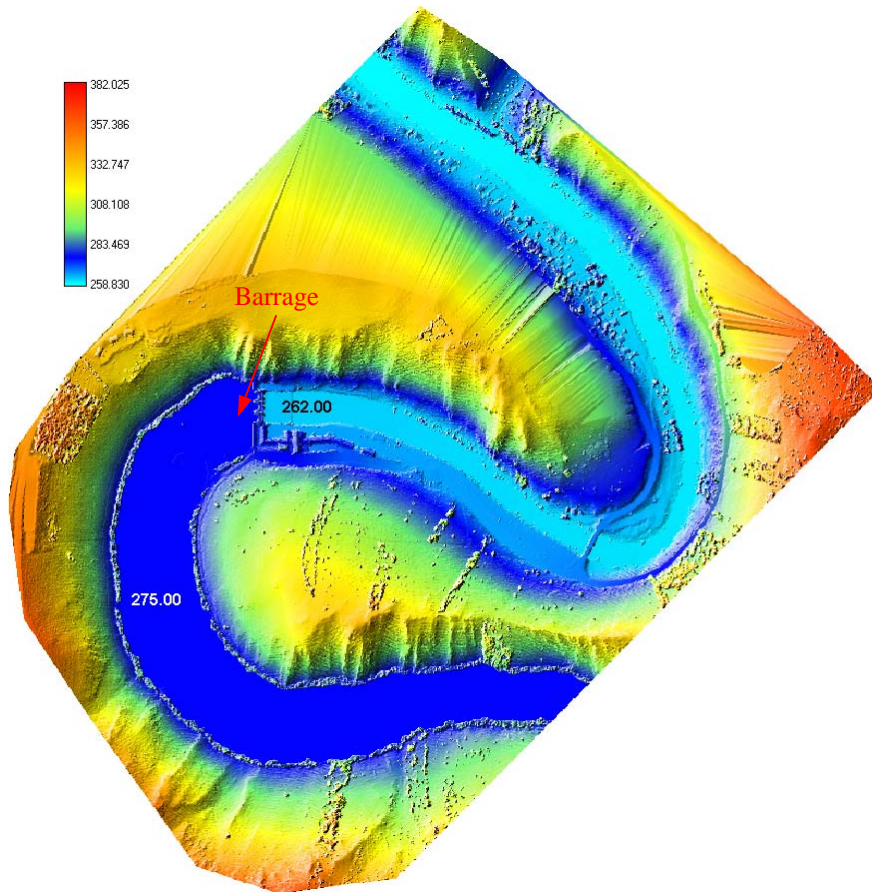


Figure 14 : Topographie complète du site étudié.

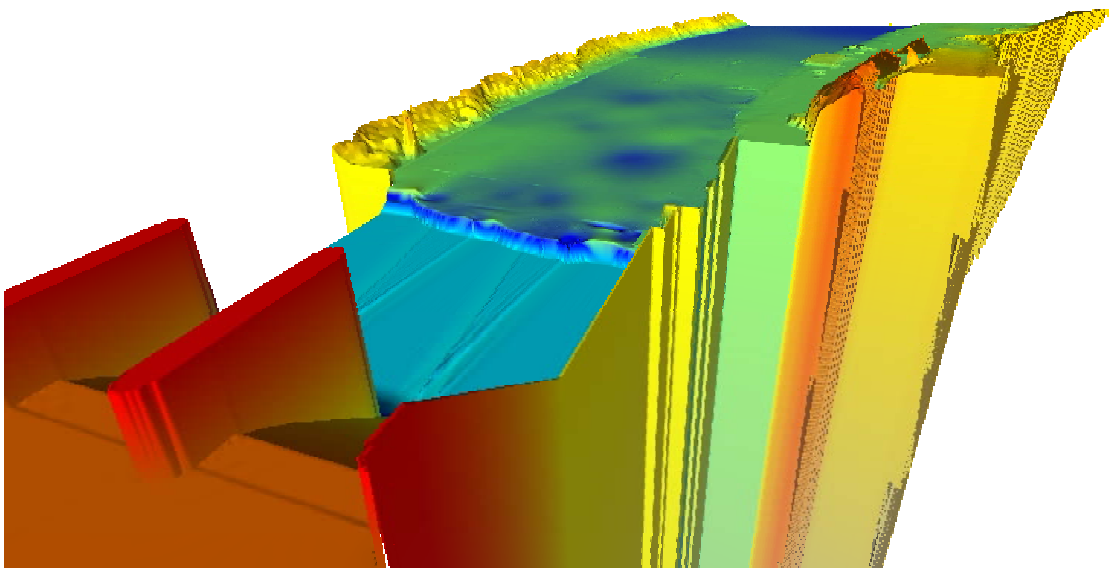


Figure 15 : Résultat de la simulation numérique de l'ouvrage.



Figure 16 : Vue 3D du barrage, de la fosse de dissipation et de l'écoulement sur la structure.

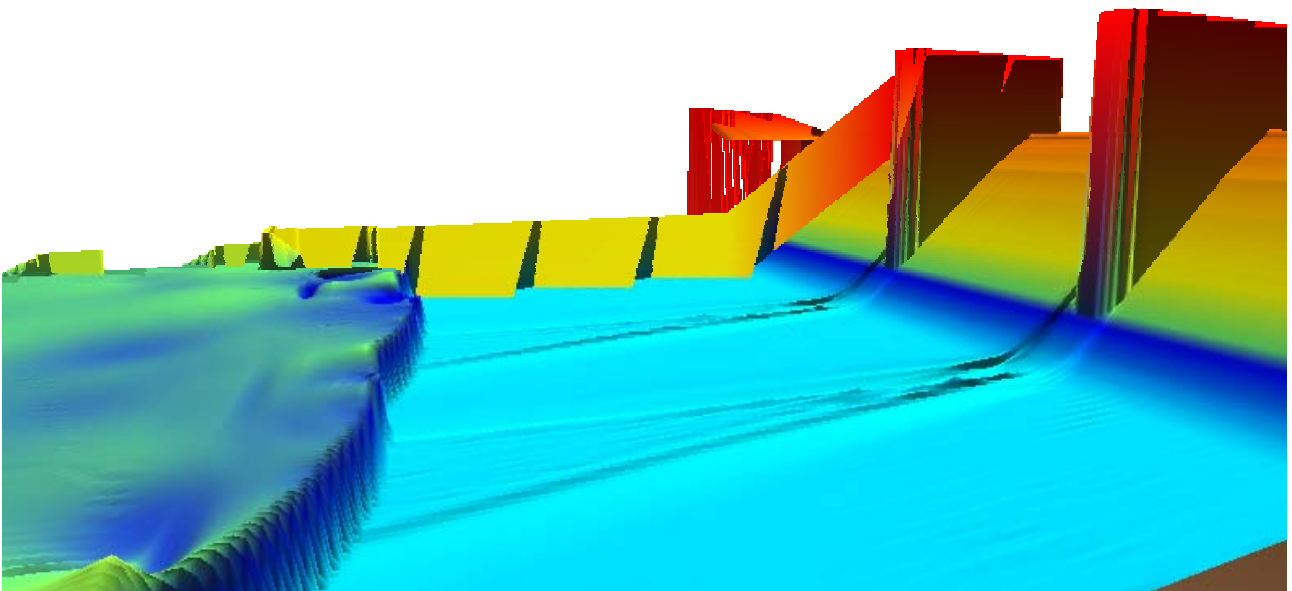


Figure 17 : Vue tridimensionnelle de l'écoulement sur le coursier et dans le bassin de dissipation pour une crue de 175 m³/s.

4.2. CARTOGRAPHIE PRECISE DE L'EMPRISE D'INONDATIONS

S'il est largement utilisé pour l'optimisation du design de structures hydrauliques, WOLF 2D trouve également un large champ d'application dans le domaine de la modélisation instationnaire ou non de phénomènes de crue et d'inondation. Il peut ainsi déterminer, pour une récurrence donnée, les hauteurs et champs de débits en tout point et, le cas échéant, aider à la recherche de solutions efficaces de réduction des effets tant par la modification des propriétés topographiques que par le design d'ouvrages ou par d'autres actions sur les propriétés morphologiques (occupation des sols, par exemple). Le calcul conjoint des effets sédimentaires peut apporter, dans ces situations, des informations précieuses sur des zones particulièrement exposées.

La mise au point d'un plan global et intégré de prévention et de lutte contre les inondations a été adopté par le Gouvernement wallon. Ce plan « PLUIES » prévoit notamment l'établissement de la cartographie des zones inondables. Cette mission a été confiée au pôle d'excellence dans le domaine de l'eau, le centre CRESCENDEAU de l'Université de Liège, au sein duquel le HACH réalisera les modélisations hydrauliques quasi-tridimensionnelles.

Le modèle WOLF 2D est opérationnel puisqu'il a été validé sur de nombreux cours d'eau. Le temps de calcul énorme que nécessite la résolution des équations sur de longs tronçons de rivière munis de leur lit majeur et plaine inondable (plusieurs millions de mailles actives) impose le recours à des méthodes d'accélération des processus. Il est en effet primordial d'obtenir rapidement une condition initiale d'écoulement qui servira de base aux simulations ultérieures.

Une méthodologie employée à cet effet consiste à établir une première ligne d'eau par l'utilisation d'un modèle diffusif, modèle simplifié moins coûteux en temps de calcul [8]. Par la suite, un affinement de la solution est envisagé en utilisant un modèle de calcul complet mais dont la résolution est effectuée sur un maillage d'abord relativement grossier puis subissant un raffinement progressif et automatique (Figure 18).

Des comparaisons avec des zones inondées lors d'événements réels et des photos relatives à la crue correspondante permettent de conclure à une bonne concordance avec les résultats numériques. La Figure 19 présente une zone inondable au sud de Ham-sur-Heure. Les zones immergées observées lors de la crue du 13 février 2002 (Figure 20) sont confrontées aux zones calculées par WOLF 2D. On peut remarquer le respect des accidents topographiques locaux et la bonne coïncidence des zones inondées. La même conclusion s'applique à la Figure 21.

L'utilisation active des champs inondables pour propager le débit de crue, l'orientation complètement différente entre l'écoulement de crue et le lit mineur de la rivière, l'importance de la topographie dans la distribution du champ des débits spécifiques sont autant d'éléments qui justifient le recours à des modèles quasi-tridimensionnels, d'autant que leur utilisation sur des maillages conséquents (de l'ordre du million de mailles potentiellement inondables) pour chaque tronçon traité est aujourd'hui totalement opérationnelle.

Il faut cependant souligner que le succès de l'approche est largement facilité par la qualité des informations topographiques à la base du calcul, données acquises par le MET (Séthy) par des techniques de pointe (laser aéroporté et sonar multi-faisceaux) avec une résolution exceptionnelle sur un maillage très dense d'un mètre de côté.

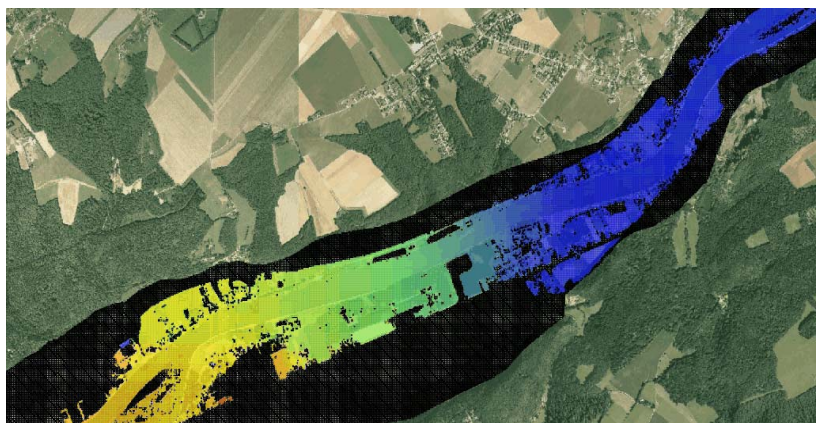
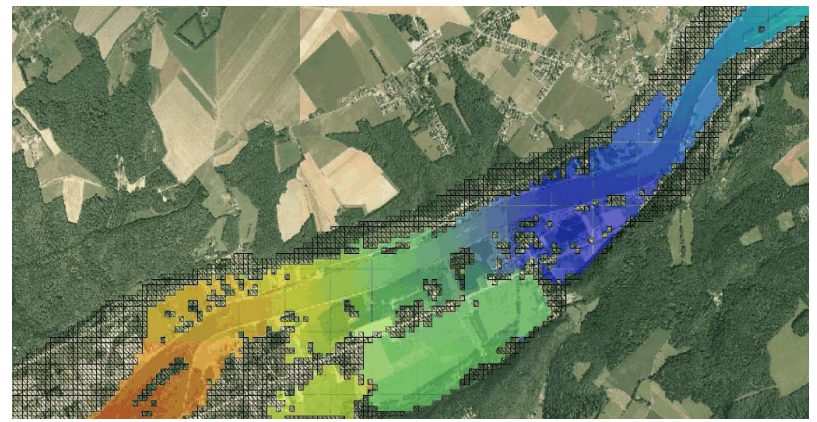
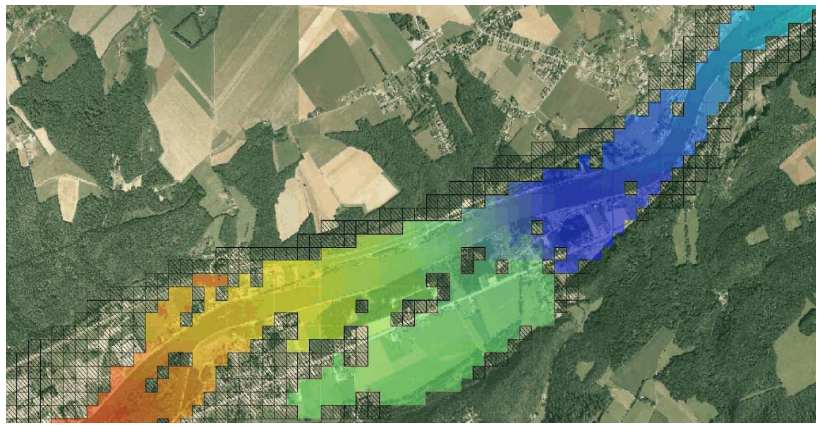
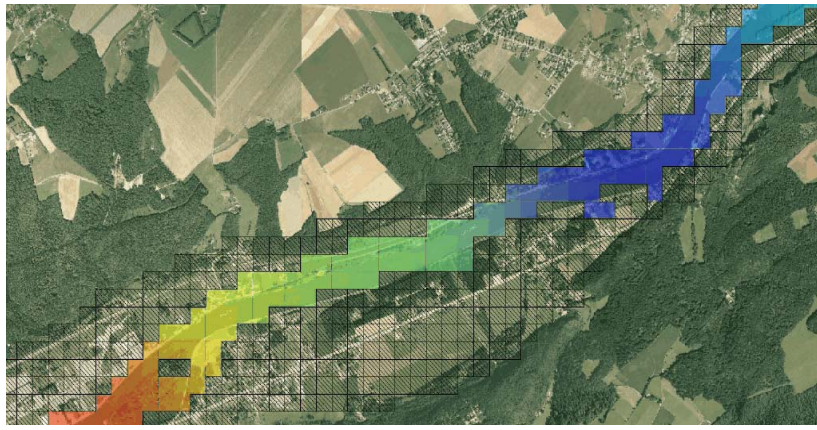


Figure 18 : Quatre maillages successifs illustrant le raffinement automatique mis en œuvre pour la détermination des zones inondées à Bas-Oha sur la Meuse, lors de la crue de 1995.

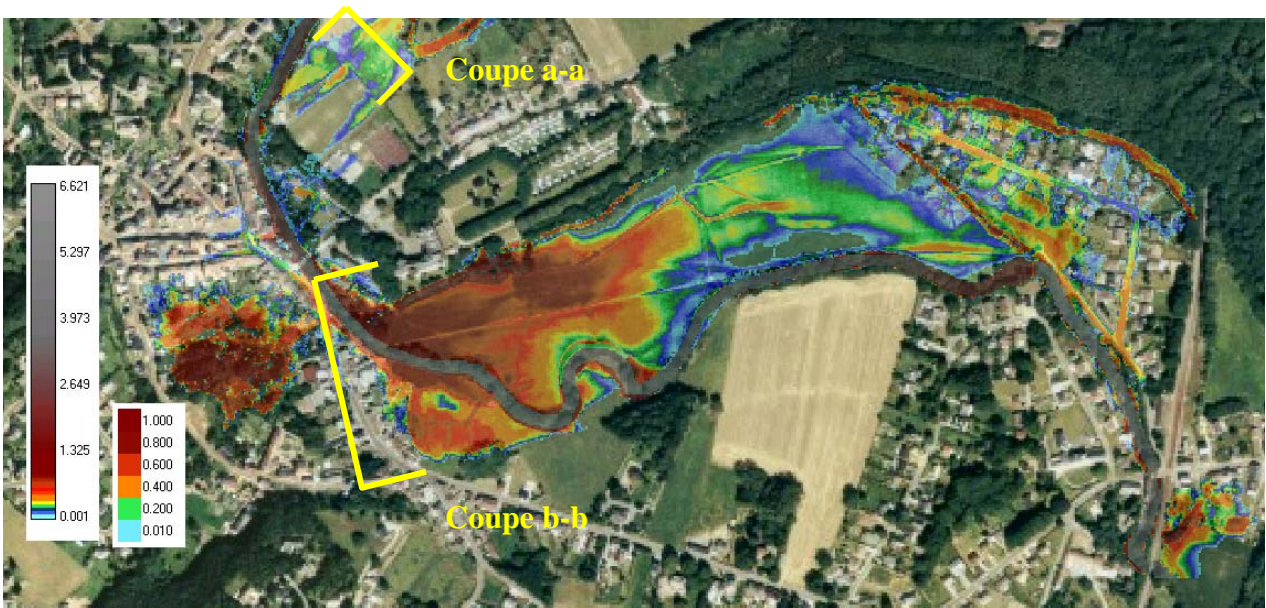
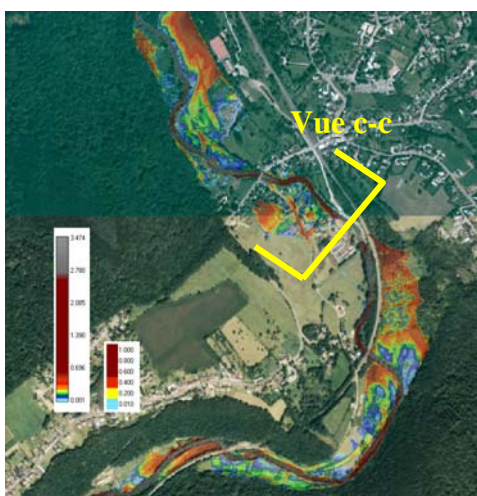


Figure 19 : Zone inondée déterminée par le modèle hydrodynamique 2D à Ham-sur-Heure.



Figure 20 : Inondation observée à Ham-sur-Heure.



(a) (b)

Figure 21 : Emprise d'une zone inondée déterminée par WOLF et photo aidant à la validation.

5. IMPORTANCE DE LA MODELISATION PHYSIQUE

Les énormes progrès réalisés en terme de qualité et de rapidité des outils de modélisation en hydrodynamique numérique ne remettent pas en cause son incontournable complémentarité avec l'expérimental, qu'il faille préciser les lois d'interaction avec le monde extérieur (lois de frottement, par exemple), alimenter en valeurs les nombreux paramètres de modélisation ou encore quantifier certains phénomènes complexes que le numérique n'est pas encore à même de reproduire avec une fiabilité suffisante.

L'évolution de ces rapports expérimental – numérique au HACH tend vers une complémentarité sans cesse accrue, permettant de mieux cerner, par une approche numérique préalable, les zones d'intérêt à reproduire à l'échelle et d'augmenter l'expertise numérique par une confrontation systématique avec les modèles physiques réalisés [9].

6. CONCLUSION

Si les principes fondamentaux qui régissent l'hydrodynamique moderne sont connus de longue date, la résolution efficace de leur formalisme mathématique s'est longtemps heurtée à plusieurs écueils fondamentaux. L'impossibilité d'établir des solutions analytiques applicables à des solutions réelles a reculé leur exploitation efficace jusqu'à l'ère informatique qui a vu le foisonnement de schémas de résolution applicables à des discrétisations progressant en taille au gré des évolutions du matériel. Il a fallu par ailleurs que les approches modernes de l'hydrodynamique de surface prennent le pas sur le clivage habituel continu-discontinu pour réconcilier dans un formalisme mathématique unifié tout phénomène, soulignant ainsi le génie de Newton lorsqu'il les énonçait en toute généralité dans ses « *Principia* » .

Aujourd'hui, puissance de calcul et schémas numériques efficaces, gérant tout écoulement avec ressauts instationnaires éventuels, s'allient au quotidien pour multiplier les démonstrations indiscutables d'une potentialité dans l'aide à la décision pour une meilleure gestion des ressources hydrauliques, défi ancestral et futur.

7. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le MET pour les autoriser à publier les illustrations générées dans le cadre d'études qui leur ont été commandées, en particulier le SETHY (D.212) ainsi que la Direction des barrages de l'Est (D.241).

8. BIBLIOGRAPHIE

1. Archambeau, P., et al. *New trends in flood risk analysis: working with 2D flow models, laser DEM and a GIS environment (Provisionally accepted for publication)*. in *Second International Conference on Fluvial Hydraulics: River Flow 2004*. 2003. Naples, Italy.
2. Dewals, B., et al. *Coupled computations of highly erosive flows with WOLF software*. in *5th International Conference on Hydro -Science & -Engineering*. 2002. Warsaw University of Technology.
3. Dewals, B., et al., *Dam-break hazard mitigation with geomorphic flow computation, using WOLF 2D hydrodynamic software*, in *Risk Analysis III*, C.A. Brebbia, Editor. 2002, WIT Press.
4. André, S., et al. *Quasi 2D-numerical model of aerated flow over stepped chutes*. in *XXX IAHR Congress*. 2003. Thessaloniki, Greece: IAHR.

5. Piroton, M., *Modélisation des discontinuités en écoulement instationnaire à surface libre. Du ruissellement hydrologique en fine lame à la propagation d'ondes consécutives aux ruptures de barrages*. 1994, Université de Liège.
6. Erpicum, S., et al., *Optimising a cascade of hydroelectric power stations with the WOLF package*, in *Water Resources Management*, C.A. Brebbia, Editor. 2003, WIT Press. p. 65-74.
7. Bollaert, E., et al., *Genetic algorithm optimization of transient two-phase water pressures inside closed-end rock joints*, in *Rock Scour due to falling High-Velocity Jets - Proceedings of the International Workshop, Lausanne, Switzerland, 25 - 28 September 2002*, E. Bollaert, Editor. 2002, A.A.Balkema Publishers.
8. Archambeau, P., et al., *A set of efficient numerical tools for floodplain modeling*, in *Shallow Flows*, W.S.J. Uijttewaal, Editor. 2003, IfH & TU Delft: Delft. p. 141-158.
9. Piroton, M., et al. *Numerical – experimental interaction in hydrodynamics: an integrated approach for the optimal management of hydraulic structures and hydrographic basins*. in *The 9th International Conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science*. 2003. University of Macau, Macao.