

L'utilité de modèles numériques intégrés en hydrodynamique de surface

P. Archambeau, B. Dewals, S. Erpicum, Th. Mouzelard et M. Pirotton

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.

La gestion actuelle des ressources hydrauliques, qu'elle s'intéresse à leur origine, à leur consommation ou leur utilisation, ou encore qu'elle se tourne vers les conséquences possibles des infléchissements que l'homme peut provoquer sur leur cycle, 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 grande nature.

Parmi tous les domaines de l'hydraulique touchés par le numérique, l'intérêt du HACH (Service d'Hydrodynamique Appliquée et des Constructions Hydrauliques) 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.

Mots clés

Modèle numérique, algorithmes génétiques, hydrologie, inondations, transport en sédiments, rupture de barrages

Nutzung von integrierten, numerischen Modellen für die Oberflächenhydrodynamik

Einleitung

Auch wenn sich durch die aktuellen Zeitläufe die damit verbundenen Probleme weiterentwickeln, bestehen die Herausforderungen im Bereich Wasser weiter oder vermehren sich sogar. Vom Brechen von Hochwasserspitzen zum Erhalt eines Niederwasserabflusses, vom steigenden Wasserverbrauch für industrielle Zwecke im weitesten Sinn zum Aufrechterhalten der ökologischen Eigenschaften des Trinkwassers erstrecken sich die Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Wasser. Wasser, die Herausforderung des 21sten Jahrhunderts, da es selten ist und somit nachhaltig und effizient genutzt werden muss.

Die heutige Wasserwirtschaft, ob sie sich nun für die Herkunft des Wassers, für Trink- oder Brauchwasser oder sogar für die anthropogenen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt interessiert, kann die neuen Möglichkeiten nicht ignorieren, welche durch die rasche Entwicklung von numerischen Methoden entstehen. Diese können, basierend auf den theoretischen Grundlagen der Fluidmechanik, zu Entscheidungshilfen für reale Situationen werden.

Aus den Bereichen der Hydraulik, welche von der Numerik erfasst werden, in-

teressiert sich das HACH (Service d'Hydrodynamique Appliquée et des Constructions Hydrauliques) schwerpunktmäßig für jegliche Art von Oberflächenabfluss, jenen hydrodynamischen Phänomenen, welche der Mensch zu lenken versucht. Der Versuch, natürliche Phänomene oder Unfälle zu beeinflussen oder vorherzusagen, führt zur Darstellung des Laufes eines Tropfens im gesamten hydrologischen System anhand von physikalischen Basisgleichungen, von seinem Aufprall auf die Erdoberfläche über das Anschwellen des Oberflächenabflusses, der Fließgewässer und der Speicherzonen bis zu den großen Flüssen und Wasserstrassen.

Die Form der Gleichungen und die numerischen Lösungsansätze werden im vorliegenden Artikel bewusst beiseite gelassen, um die Effizienz von numerischen Methoden zur Beschreibung einiger realer Situationen des Wasserzyklus anhand von Beispielen aufzuzeigen. Das Computerprogramm WOLF, welches hier verwendet wurde, ist in seiner Gesamtheit am HACH entwickelt worden.

Keywords

Numerisches Modell, Genetischer Algorithmus, Hydrologie, Überschwemmung, Sedimenttransport, Sperrbruch

2 WOLF: suite intégrée de logiciels hydrologiques et hydrodynamiques

2.1 Interface de travail

Il est assez symptomatique de débiter l'illustration appliquée de WOLF par quelques mots sur son interface. Il ressort pourtant 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

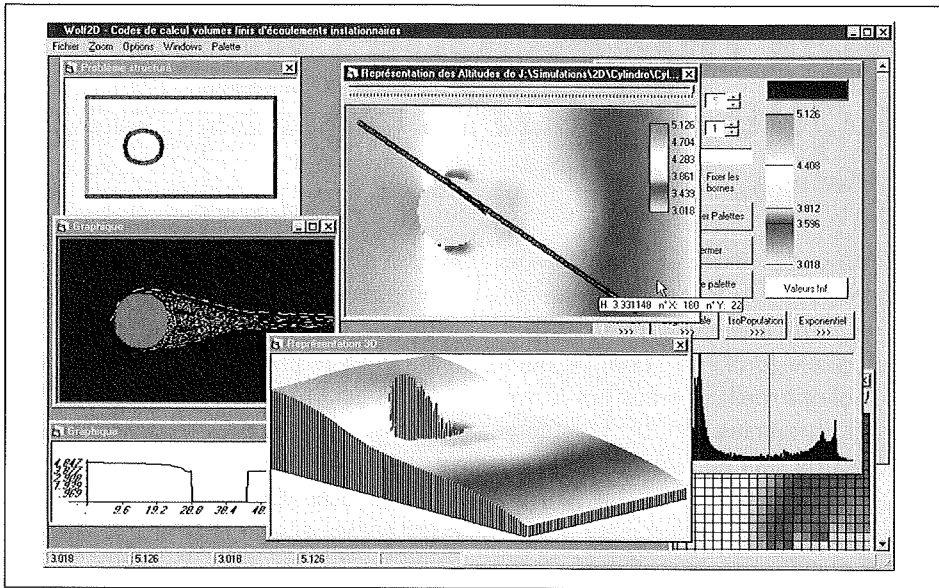


Figure 1: Capture d'écran d'une fenêtre WOLF personnalisée par l'utilisateur.
Abbildung 1: Ansicht eines vom Anwender personalisierten WOLF-Fensters.

et conviviale de pré- et post-processing, 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, tracking de particules ...). Elle est entièrement écrite en VisualBasic (Figure 1) de manière à profiter des capacités qu'offre l'environnement Windows tandis que les codes de calcul sont

programmés en Fortran95 qui 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'exportation vers le tableur Excel, des possibilités de smoothing 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 utile pour visualiser des résultats sur un fond de carte, ...

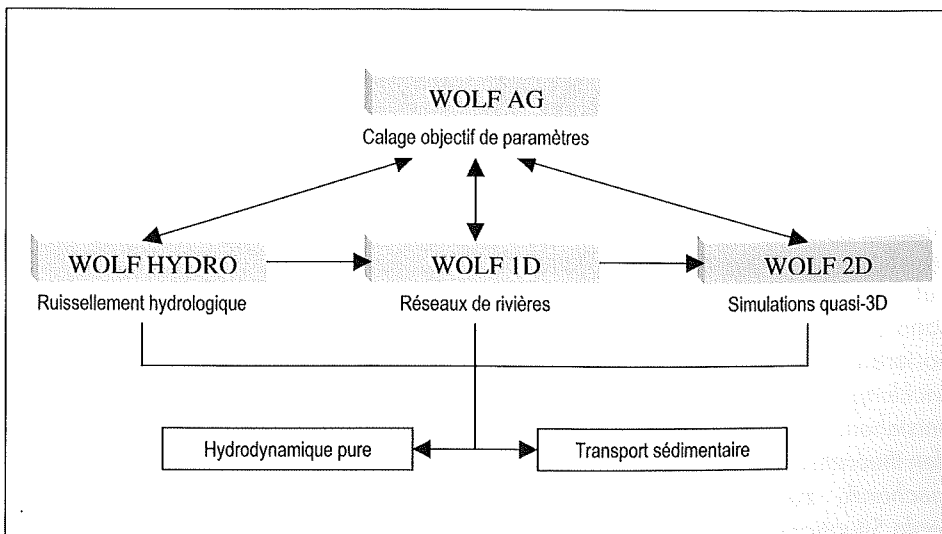


Figure 2: Organisation générale des modules de calcul de WOLF.
Abbildung 2: Allgemeine Organisation der Rechenmodule von WOLF.

2.2 Organisation générale 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 couvrants-découvrants), 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 (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. 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.

3 WOLFHYDRO

3.1 Introduction

La rapidité de développement du matériel informatique aiguise l'envie des hydrologistes d'exploiter les potentialités des modèles numériques de terrain et l'information satellitaire au sens large. 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

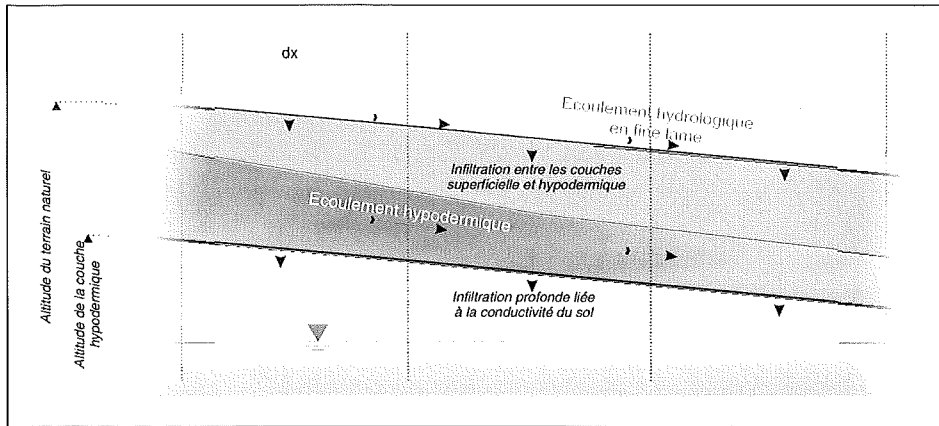


Figure 3: Représentation des trois couches et des écoulements relatifs.
Abbildung 3: Darstellung der drei Schichten und des entsprechenden Abflusses.

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 sur un bassin déterminé, dès lors que la frange de valeurs de chacun de ces paramètres à signification physique 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 WOLFHYDRO 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, ...) sont dis-

ponibles 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 WOLFHYDRO 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 supprimées 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.

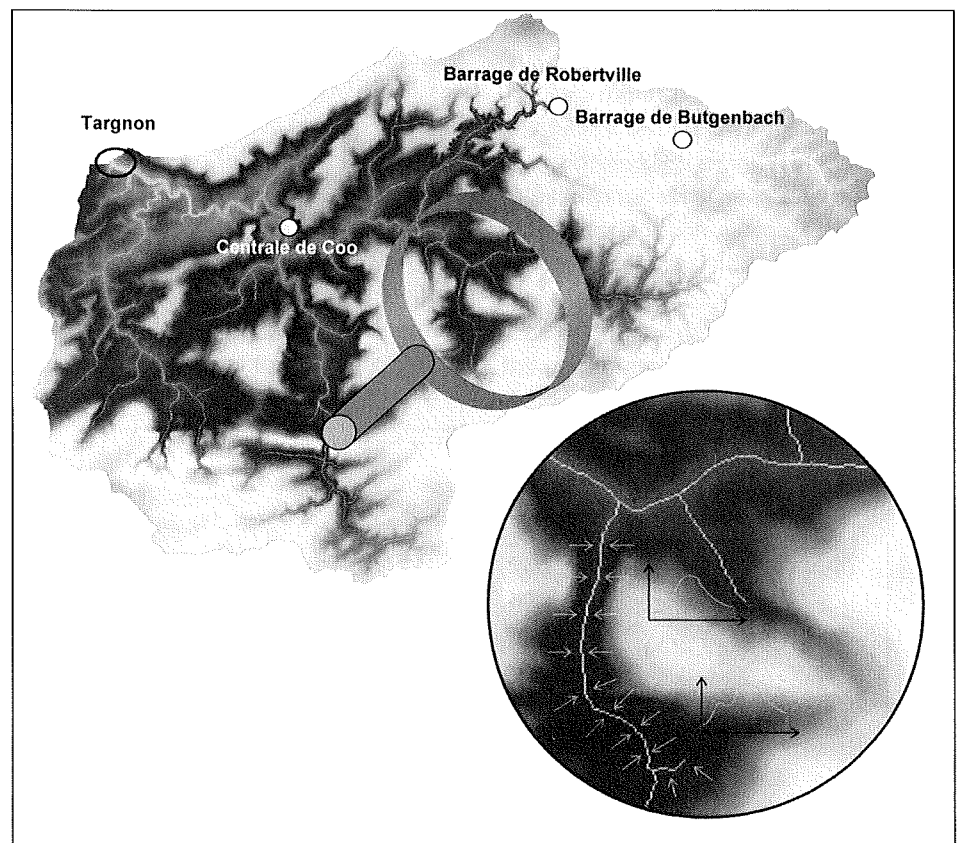


Figure 4: Topographie du bassin de l'Ambève (Belgique).
Abbildung 4: Topografie des Ambève-Beckens (Belgien).

3.2 Précipitations sur un bassin hydrographique regule

La Belgique dispose d'un modèle numérique de terrain complet d'une résolution spatiale moyenne de 30 mètres. Il a été exploité sur le bassin de l'Amblève, situé à l'est de la Belgique, dans le cadre scientifique d'une modélisation en cascade avec les différents logiciels de la suite WOLF.

A l'aval des deux grands barrages construits sur la Warche, un affluent de l'Amblève, est installée une série de centrales hydroélectriques à faible chute essentiellement gérées dans leur production par un programme de lâchers aux retenues.

L'objectif global de l'application consiste à prouver la pertinence d'une optimisation multicritères de la production hydroélectrique, respectueuse d'impératifs à la fois écologiques et de niveaux maxima au droit des zones habitées. Cette analyse ne peut ignorer l'hydrologie globale du bassin qui alimente le filaire des rivières et grossit les flots lâchés en amont, finalement exploités énergétiquement. La chronologie de ces modélisations consiste donc à reconstituer, pour des événements pluvieux mesurés, l'hydrologie du site afin d'obtenir la distribution temporelle et spatiale des apports latéraux dans le chevelu des rivières du bassin (WOLFHYDRO). Sur ces bases, une politique de lâchers peut être optimisée en calculant l'hydrodynamique du réseau drainant (WOLF1D et WOLFAG).

La figure 4 illustre le bassin versant drainé par la ville de Targnon, résultat

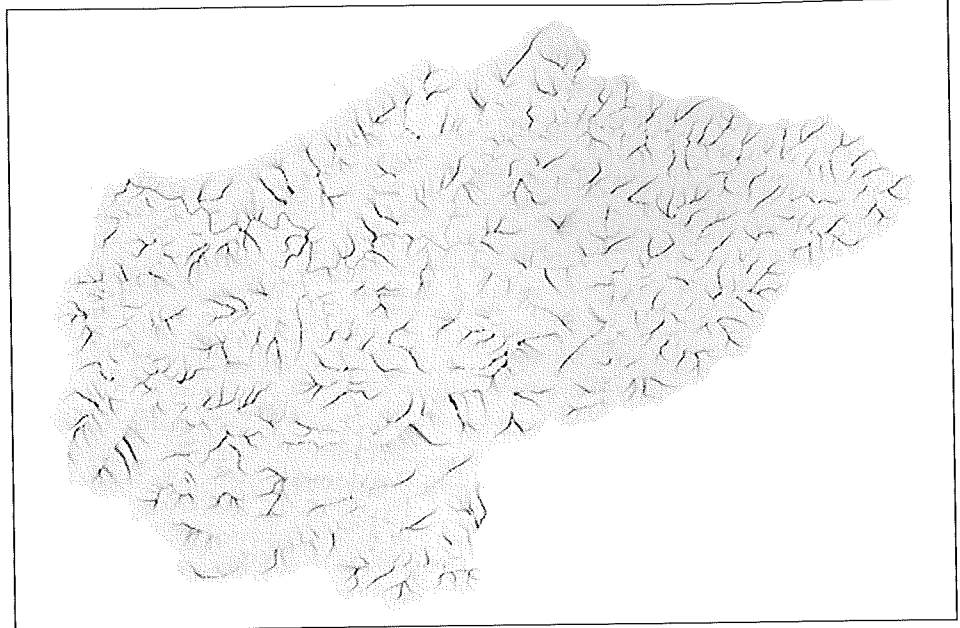


Figure 5: Convergences hydrauliques.
Abbildung 5: Hydrographisches Netz.

ultime d'une phase de traitement topographique qui délimite automatiquement cette superficie de 976 km² sur base de la carte des convergences représentées sur le bassin à la figure 5. En donnant un seuil de convergence critique amont, le réseau hydrographique est automatiquement généré avec 9 000 tronçons.

Les 1 085 000 mailles hydrologiques utiles sont ensuite arrosées par un historique réel de pluies afin de générer sur chacun des tronçons de rivières un hydrogramme d'apports latéraux, donnée de base directement exploitable par le module d'écoulement en réseaux de rivières WOLF1D, comme l'explique le paragraphe suivant.

4 Combinaison de WOLF1D et WOLFAG

4.1 Introduction

L'algorithme d'optimisation WOLFAG a été développé et implémenté pour être à même d'exploiter pleinement les énormes capacités des logiciels de la suite WOLF. 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 WOLFHYDRO, WOLF1D et WOLF2D en exploitant des événements de références disponibles.

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 lesquels 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'ex-

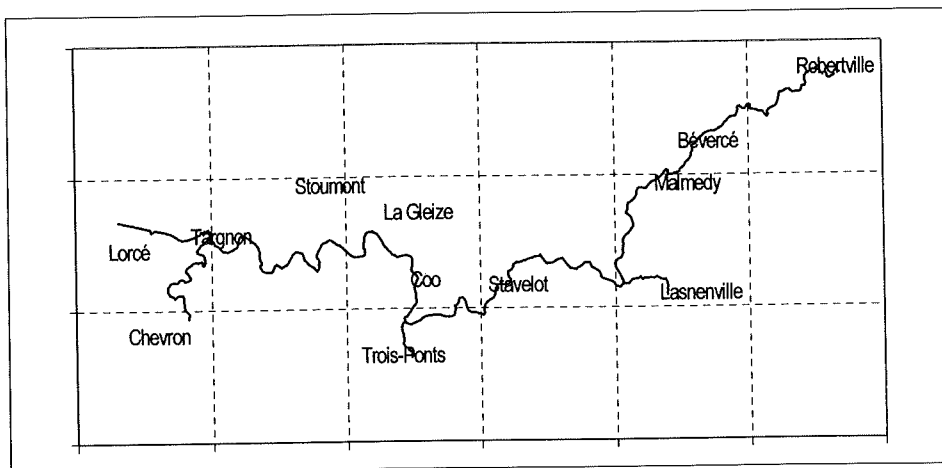


Figure 6: Réseau de rivière modélisé.
Abbildung 6: Modellierter Flussabschnitt.

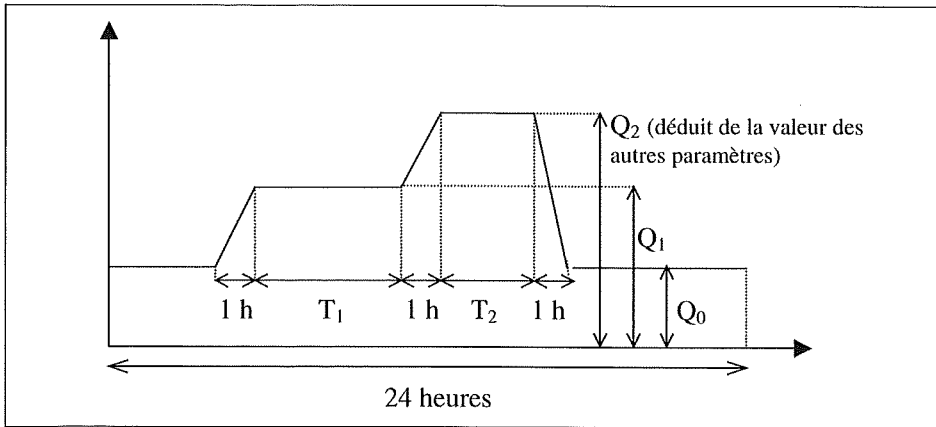


Figure 7: Hydrogramme paramétré.
Abbildung 7: Parametrisierte Abflussganglinie.

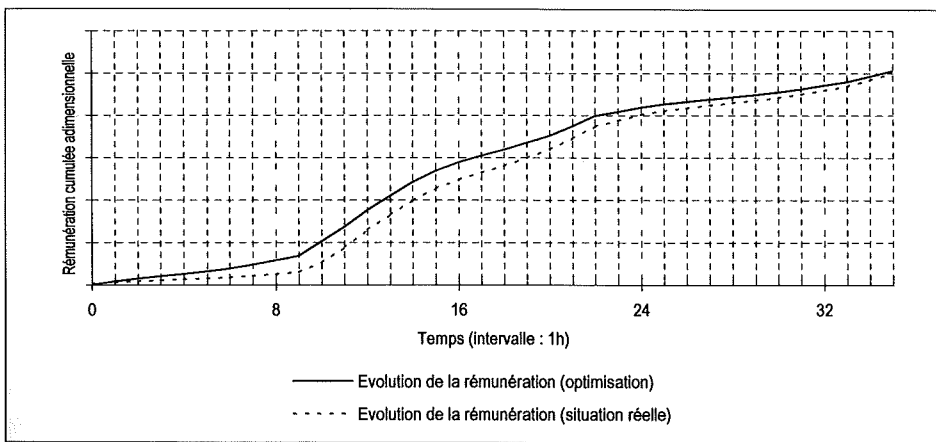


Figure 8: Résultats de l'optimisation en termes de puissance fournie cumulée.
Abbildung 8: Ergebnisse aus der Optimierung der kumulierten produzierten Leistung.

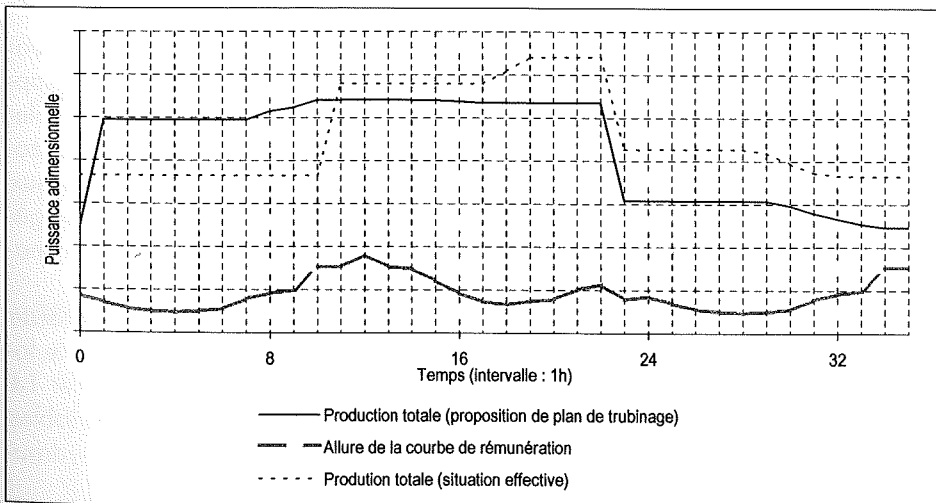


Figure 9: Résultats de l'optimisation en termes de puissance fournie.
Abbildung 9: Ergebnisse aus der Optimierung der produzierten Leistung.

4.2 Optimisation d'un plan de turbinage d'une cascade de centrales hydroélectriques à faible chute

WOLFAG termine la filière de modélisation précédemment décrite en étant appliqué à l'optimisation contrainte du plan de turbinage du réseau de centrales hydroélectriques implanté sur le complexe hydrographique belge formé par la Warche et l'Ambève (Figure 6).

Le but de cette ultime étape consiste à déterminer les paramètres optimaux 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 7 illustre l'hydrogramme, paramétré à l'aide de 4 valeurs, qui est injecté à l'amont du modèle et propagé dans le réseau par le logiciel WOLF1D sur une période de 48 heures. L'hydrodynamique résultant de la combinaison de chaque tentative de lâcher suggérée par WOLFAG et des apports hydrologiques précédemment évalués est ainsi calculée par WOLF1D 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.

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 re-

ploration 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 métho-

des 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.



Figure 10: Photo du tronçon réaménagé de l'Ourthe à Moiricy.
Abbildung 10: Foto des verbauten Abschnittes der Ourthe bei Moiricy.

lative 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 (Figures 8 et 9). 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'es-comptés.

5 Wolf2D: l'hydrodynamique détaillée de l'Ourthe à Moiricy

Au début des années septante, dans le cadre belge de la lutte contre les inondations et la valorisation des terres agricoles, l'Ourthe occidentale a subi d'importantes rectifications qui ont conduit à une uniformisation de son tracé (Figure 10). Depuis quelques années cependant, une valorisation des conditions de vie pour le milieu aquatique (Saumon 2000), indicateur significatif de qualité des cours d'eau, a poussé à rechercher de meilleurs compromis entre objectifs parfois antagonistes, de sorte qu'une gestion plus écologique s'opère sur le réseau hydrographique.

C'est dans ce contexte qu'une série de réaménagements et d'études expéri-

mentales ont été entrepris dans nos rivières, et notamment sur l'Ourthe occidentale à Moiricy. Dès 1998, la Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement (DGRNE) de la Région Wallonne y a testé une série d'obstacles favorables à la création de zones à vitesses et hauteurs d'eau différenciées. Dans le cadre de l'aménagement d'un tronçon expérimental de 115 mètres situé près du village de Jenneville, une simulation numérique de l'écoulement de cette rivière a été entreprise par le HACH. Cette modélisation devait prouver qu'une topographie fidèle et détaillée du site suffisait au logiciel de calcul WOLF2D (écoulements quasi tridimensionnels par la méthode des volumes finis) pour fournir aux gestionnaires toute la fiabilité requise dans la prévision des variables hydrodynamiques et sédimentaires. L'applicabilité

des modèles numériques d'écoulement aux études d'impact locales et à la simulation précise de petits cours d'eau est illustrée ci-après au travers de quelques résultats significatifs.

La simulation a été effectuée avec plus de 30 000 volumes finis, sur base d'un grid structuré à mailles carrées de 20 centimètres de côté sur lequel la topographie détaillée du site a été mesurée (Figure 11).

Plusieurs aménagements spécifiques sont visibles sur la figure 12 qui ont pour vocation d'apporter aux formes du lit de la rivière une certaine diversification favorable à l'enrichissement du biotope aquatique et à l'amélioration de l'habitat des poissons.

Ces aménagements, composés de portes obliques ou latérales, de blocs épars ou de caissons, ... sont autant de difficultés pour le calcul numérique puisqu'ils sont à la base de ressauts, de courants de recirculation et autres zones émergées.

Les simulations ont porté sur la propagation dans le tronçon d'une vaste gamme d'hydrogrammes observés sur site, de façon à circonscrire toutes les conditions d'écoulements susceptibles d'affecter les aménagements et le biotope de l'endroit.

Grâce à l'interface conviviale de visualisation de l'environnement de développement WOLF, les singularités d'écoulement sont observées tandis que les zones calmes et profondes propices aux frayères, les zones perturbées d'oxygénation de l'eau sont efficacement analysables.

D'un point de vue numérique, l'efficacité de la méthode implémentée dans le logiciel est illustrée aux figures 13 et 14 par la sélectivité du champ des variables calculées malgré les problèmes hydrau-

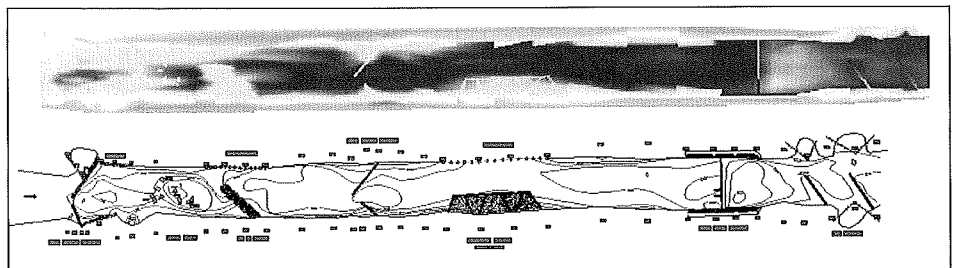


Figure 11: Topographie relevée sur le site.
Abbildung 11: Vor Ort erhobene Topografie.

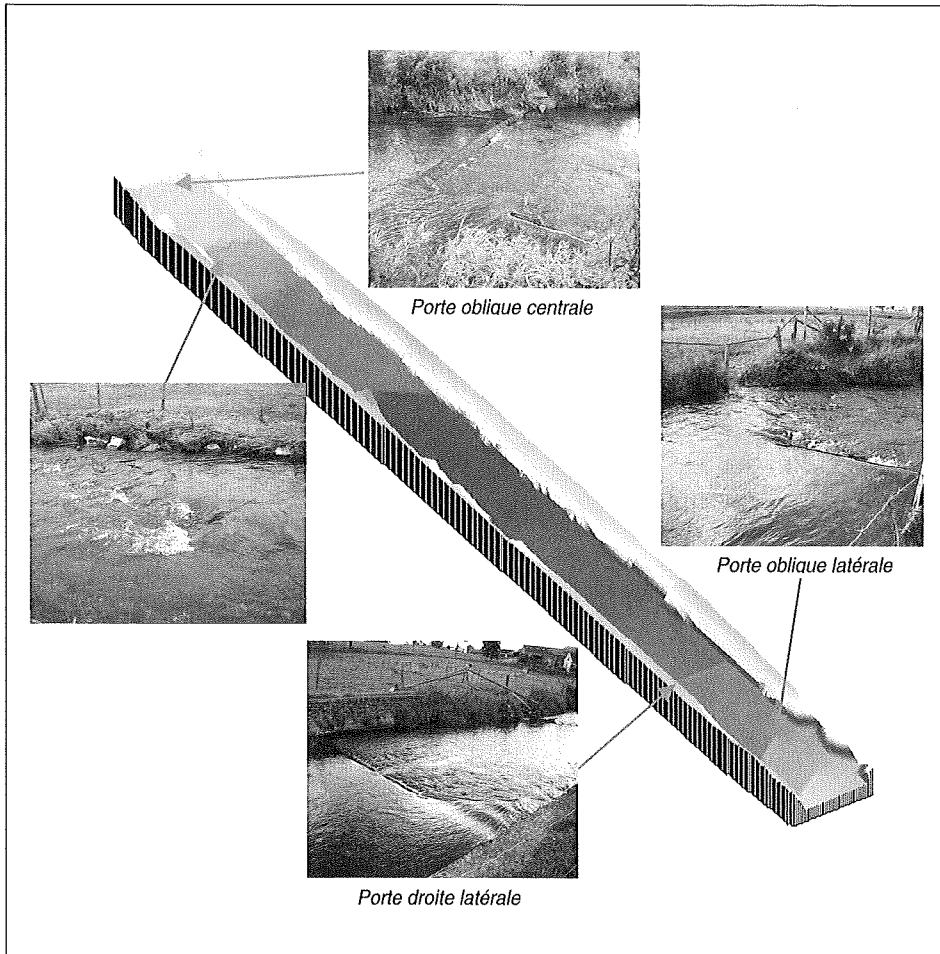


Figure 12: Quelques aménagements et visualisation 3D du tronçon de la modélisation.
Abbildung 12: Einige Bauwerke und eine dreidimensionale Ansicht des modellierten Abschnittes.

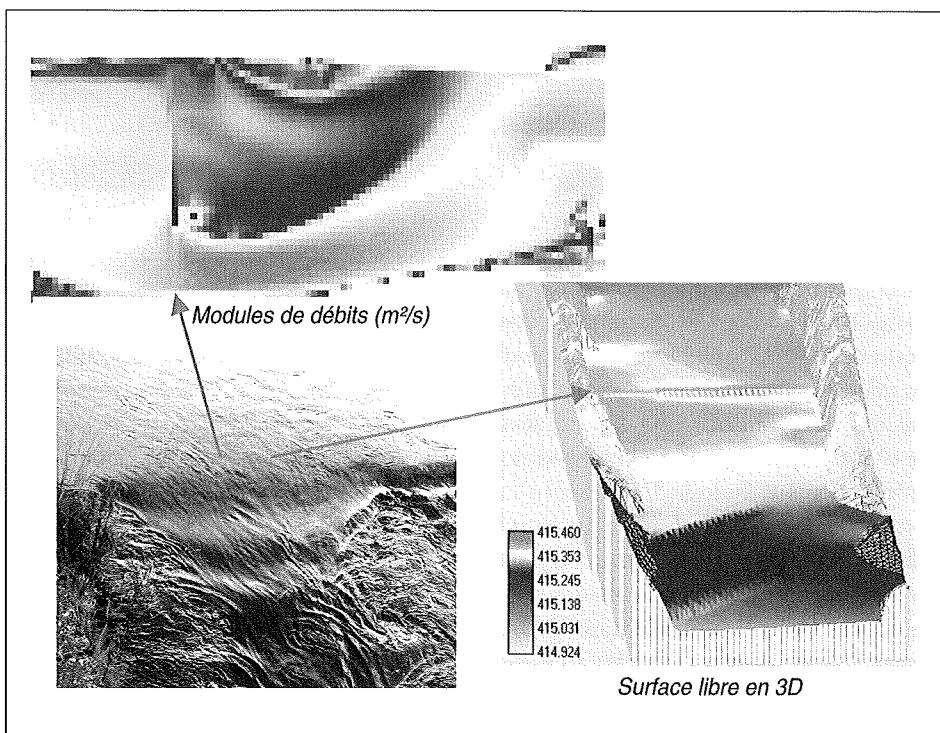


Figure 13: Visualisation des débits et des hauteurs d'eau au niveau de la porte latérale.
Abbildung 13: Ansicht der Abflüsse und der Wassertiefen im Bereich des Streichwehres.

liques inhérents à ce genre de simulation: zones immergées / émergées, ressauts, transitions d'écoulement infra / supercritique, ...

L'implémentation dans le logiciel WOLF2D du calcul du transport solide permet également d'effectuer une étude morphodynamique de l'incidence de ces travaux sur la pérennité de la réhabilitation.

Wolf2D: Projet de grand barrage au Laos

6 Le sédimentaire dans WOLF

Le transport des alluvions joue un rôle capital dans la majorité des problèmes d'hydraulique fluviale et d'aménagement des cours d'eau (Figure 20). Les divers processus sédimentaires, complexes et interdépendants, doivent être envisagés conjointement avec les aspects hydrodynamiques proprement dit, dans une approche suffisamment couplée afin d'appréhender correctement la plus grande gamme possible de configurations d'écoulement. Une telle stratégie de résolution unifiée et intégrée au sein d'une suite complète de codes de calcul d'écoulements à surface libre constitue une innovation apportée par WOLF.

L'évolution du niveau du lit érodable est régie par un bilan de masse des sédiments charriés en complément de formules empiriques de prédiction du taux de transport solide.

6.1 Rupture progressive de digue

L'évaluation des conséquences d'une rupture d'ouvrage hydraulique de retenue se fonde généralement sur l'hypothèse d'une ruine totale et instantanée de l'ouvrage. Néanmoins, la ruine d'un ouvrage en remblai, nécessairement progressive, s'apparente à une rupture au cours de laquelle une brèche s'élargit et s'approfondit graduellement. Même si l'hydrogramme mesuré en aval présente initialement un pic plus faible que lors d'une rupture instantanée, une ouverture suffisante de la brèche induira des ondes qui, par leur amplitude, vont rejoindre le front initial, le raidir et risquent de provoquer in fine un pic plus

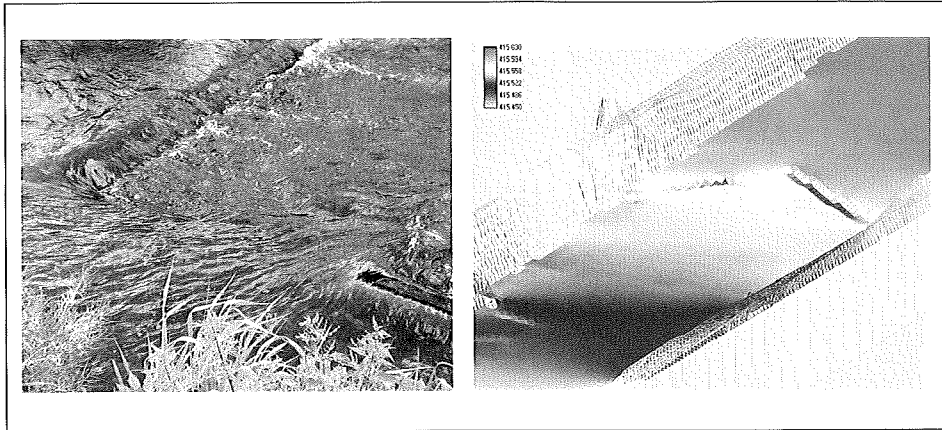


Figure 14: Modélisation d'un ressaut au niveau des portes obliques.
 Abbildung 14: Modellierung eines Wassersprungs im Bereich der schrägen Schwellen.

aigu dans l'hydrogramme mesuré plus en aval.

L'approche classique communément exploitée pour la simulation du processus d'évasement progressif de la brèche souffre deux inconvénients majeurs. D'une part, l'écoulement n'est pas traité de façon unifiée. Dans un premier temps, l'impact de l'érosion sur la structure proprement dite est estimé, puis un hydrogramme à hauteur de la brèche en est déduit. Celui-ci est ensuite répercuté sur l'aval, en supposant une séparation amont-aval, manifestement hypothétique. D'autre part, la géométrie de la section de la brèche fait elle-même l'objet d'hypothèses restrictives.

Au contraire, le logiciel développé ici se révèle apte à intégrer complètement ces phénomènes qui, dans la réalité, sont incontestablement étroitement couplés. Un cas de figure de rupture progressive d'un barrage en terre a été simulé. Un plan d'eau d'une profondeur de 9,5 m est initialement retenu par une digue de 10 m de haut entaillée, en son centre, d'une brèche d'un mètre de profondeur. L'eau va s'y engouffrer et initier un processus d'érosion progressive de l'ouvrage de retenue difficile, en pratique, d'interrompre.

La figure 21 illustre les effets sur la topographie obtenus pour des temps allant jusqu'à 100 secondes. Une perspective de la moitié de la retenue est représentée, vue depuis l'aval, et la coupe longitudinale passant par le milieu de la brèche permet de très bien visualiser le profil des cotes du lit tout au long de l'évolution instationnaire. On distingue

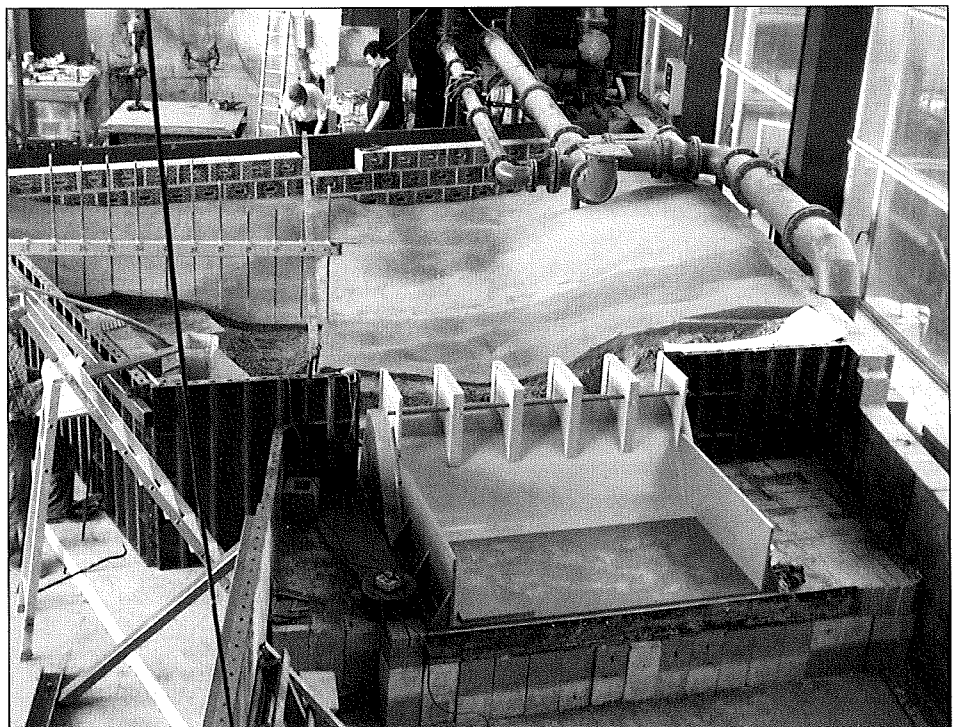


Figure 15: Vue du modèle réduit.
 Abbildung 15: Ansicht des Modells.

à la figure 21 (a) l'ouverture initiale dans le mur. Les figures 21 (b) à (e) confirment par ailleurs qu'une érosion importante juste à l'aval de l'ouvrage s'accompagne d'une déposition de sédiments dans le prolongement de la brèche.

6.2 Rupture de grands barrages

L'expérience toujours douloureuse tirée des écoulements consécutifs à la rupture de grands ouvrages de retenue confirme l'importance des remaniements topographiques à l'aval. De plus, indépendamment de la quantité de sédiments mis en mouvement, des dégâts considérables

peuvent être engendrés par d'importantes modifications locales du lit.

La crue accidentelle induite par une rupture totale et instantanée d'un grand barrage-poids belge a été simulée en topographie réelle au moyen du logiciel quasi-tridimensionnel. Ce cas de figure confirme l'applicabilité du code de calcul sur une topographie naturelle érodable absolument quelconque et met également en évidence l'importance de l'évolution topographique sur l'évaluation correcte des risques encourus en aval.

L'établissement de cartes de risque constitue un moyen efficace pour synthétiser l'abondante information obtenue à l'issue d'une simulation instationnaire, et de n'en conserver que les aspects les plus utiles en pratique. Par exemple, une carte des temps de préavis permet de déterminer l'instant à partir duquel une zone sera inondée. Une telle étude d'incidence trouve sa pleine utilité dans le cadre de politiques de protection des populations et des biens. Des gestionnaires d'ouvrages de retenue, des assureurs ou encore les pouvoirs publics manifestent un intérêt marqué pour ce

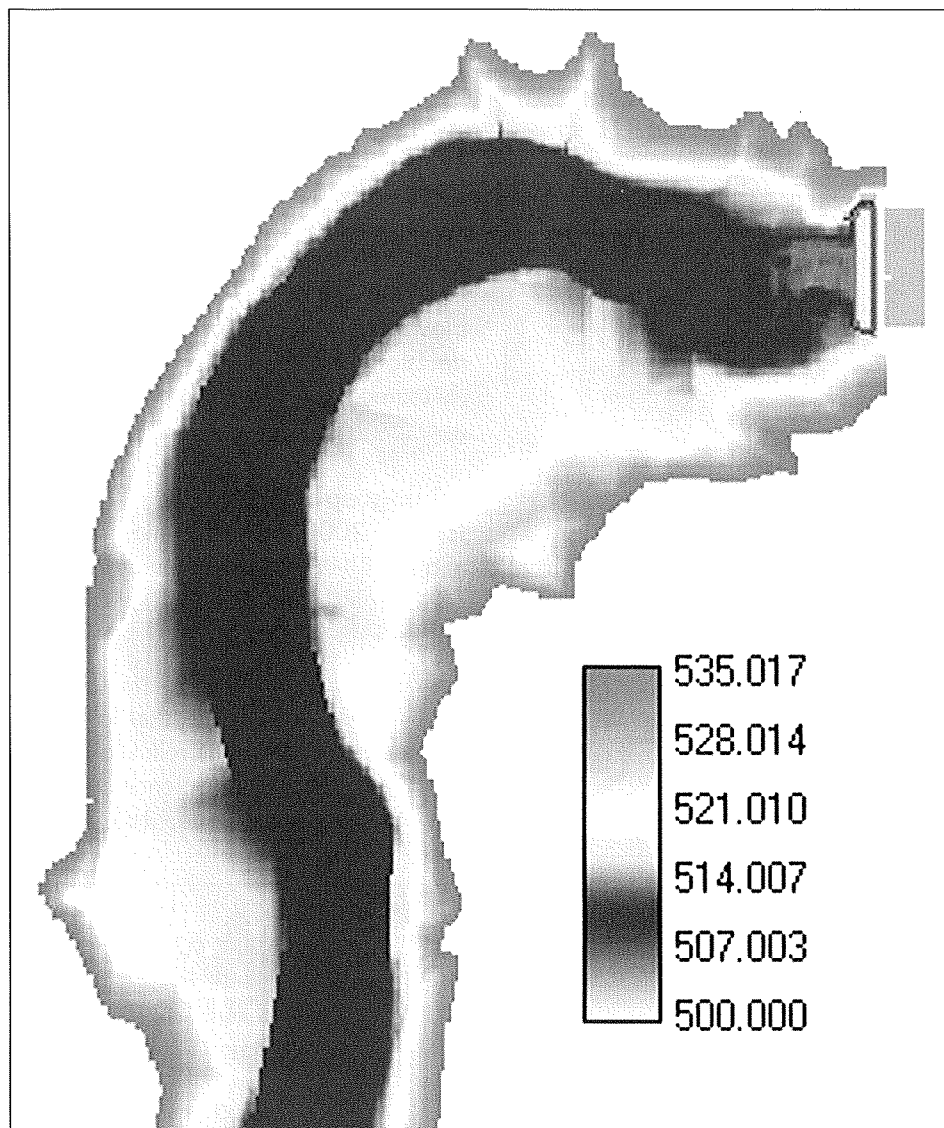


Figure 16: Topographie amont.
Abbildung 16: Topografie im Oberwasser.

type d'analyse, à même d'orienter des décisions cruciales en termes de prévention, de dispositifs d'alerte et de plans d'évacuation des populations.

Au tout début du processus, le front d'eau responsable de modifications topographiques se propage nettement plus lentement que si le lit restait fixe. Par contre, les simulations montrent qu'ultérieurement le front calculé en topographie évolutive rattrape, puis dépasse celui qui se propagerait sur un lit fixe. Cette variation de la vitesse d'évolution du front pourrait être liée à l'obstruction partielle, par des dépôts sédimentaires, d'une vallée latérale (Figure 22), vers laquelle une quantité importante d'eau était déviée en topographie fixe. Une seconde explication de cette accélération

manifeste du front hydrosédimentaire peut être avancée: l'effet érosif agissant dès le début de l'écoulement a tôt fait de façonner, au moins localement, certaines parties de la vallée, de telle sorte que l'eau s'écoulant ultérieurement y rencontre une résistance nettement plus faible. Ainsi, un plus grand maintien de l'énergie totale disponible serait responsable de l'accroissement de vitesse du front. Par conséquent, l'hypothèse d'un lit immobile ne s'avère pas nécessairement sécuritaire.

En guise d'illustration, la figure 23 compare la topographie immédiatement à l'aval de l'emplacement initial de l'ouvrage de retenue avant et après le passage du front. Le relief situé au centre à la figure 23(a) présente une élévation

d'environ 10 m et se voit totalement érodé à l'issue des 1000 secondes d'écoulement. Un recul significatif des berges de la rive gauche peut également être observé à la figure 23(b) et il s'accompagne de dépôts au pied des talus.

Il va de soi qu'au-delà du réalisme des situations extrêmes reproduites, ce type de modélisation est significatif pour illustrer les performances d'un code de calcul puisqu'il exacerbe toutes les difficultés. La validation des résultats dans de telles circonstances ouvre naturellement la voie à une gestion de situations beaucoup plus communes, à des échelles variées selon l'impact à évaluer.

7 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'aire 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

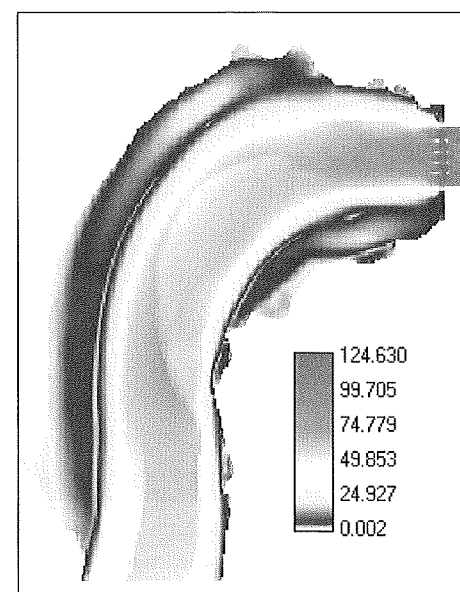


Figure 17: Modules de débits (m^2/s).
Abbildung 17: Abflussmodul (m^2/s).

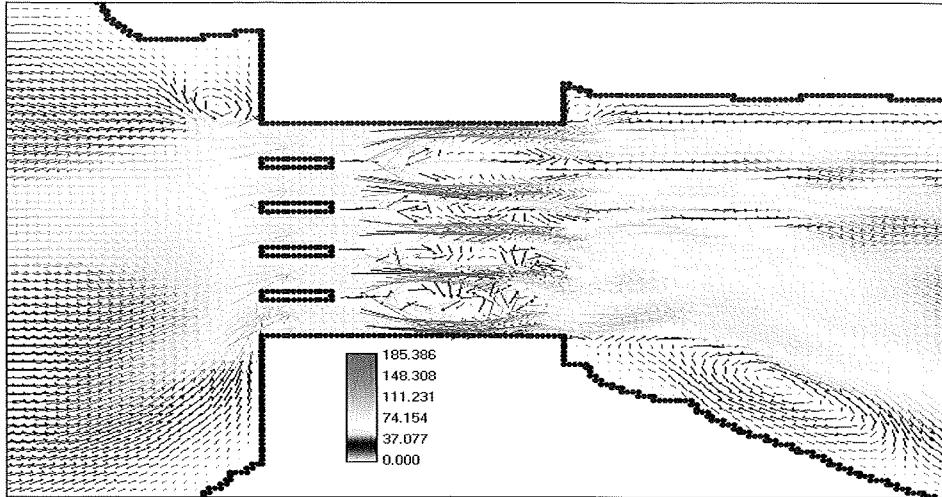


Figure 18: Détail des débits sur le déversoir.
Abbildung 18: Detail der Abflüsse durch die Hochwasserentlastung.

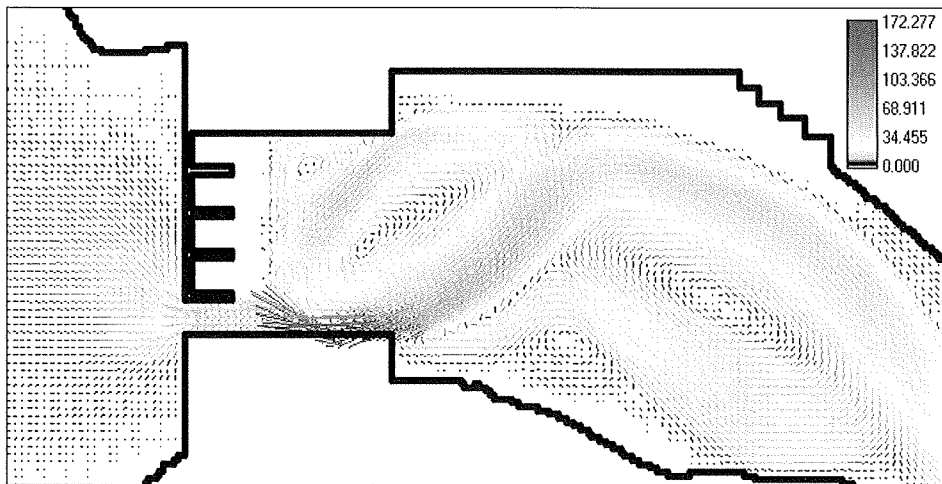


Figure 19: Détail des débits sur le déversoir pour une seule passe ouverte.
Abbildung 19: Detail der Abflüsse durch die Hochwasserentlastung mit einem einzelnen geöffneten Schütz.

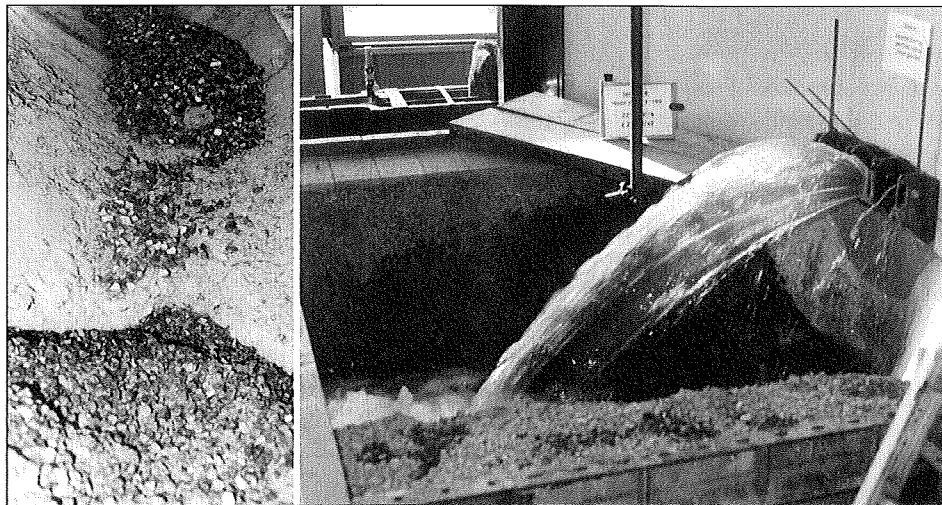


Figure 20: Essais sur modèle réduit au Laboratoire du HACH, visant à évaluer l'impact du fonctionnement des vannes d'évacuation de crue sur le lit immédiatement à l'aval d'un barrage. La photo de droite illustre les fosses d'affouillement observées à l'issue de l'expérience.
Abbildung 20: Modellversuche in der Versuchshalle des HACH. Zielsetzung: Beurteilung der Auswirkung der Hochwasserentlastungsschützen auf das Flussbett am Fuss der Sperre. Das Foto rechts zeigt die Auskolkungen, welche nach dem Versuch sichtbar waren.

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.

Bibliographie

Jonet L., 2000, Incidence morphodynamique de réaménagements de rivières, Travail de fin d'études, Université de Liège.
Piroton, M., «Une Approche Globale pour Modéliser la Genèse et la Propagation des Crues Naturelles ou Accidentelles», Classe des Sciences, Académie Royale de Belgique, 182 pages, 1997.

Nachhaltige Renaturierungen in den Alpen, CH und EU

Filisur • Chur • Celerina

Neue Wege in der Hochlagenbegrünung ...

TERRA VERDE®

- Anpflanzungsmethode ETH
- Alpines Ökotypen-Saatgut
- Alpines Ökotypen-Pflanzgut
- Erosionsschutz-Pulver
- Dünger, Jute usw.

GRASSAMEN

- Strassenbau, Skipisten
- Wildäsung, Blumenwiesen
- Landwirtschaft
- Rasen

Objektbesichtigungen, Vegetationsaufnahmen, standortbezogene Samenrezepturen usw.

Schutz Samen + Pflanzen AG, 7477 Filisur
Tel. 081 404 21 21, Fax 081 404 24 70

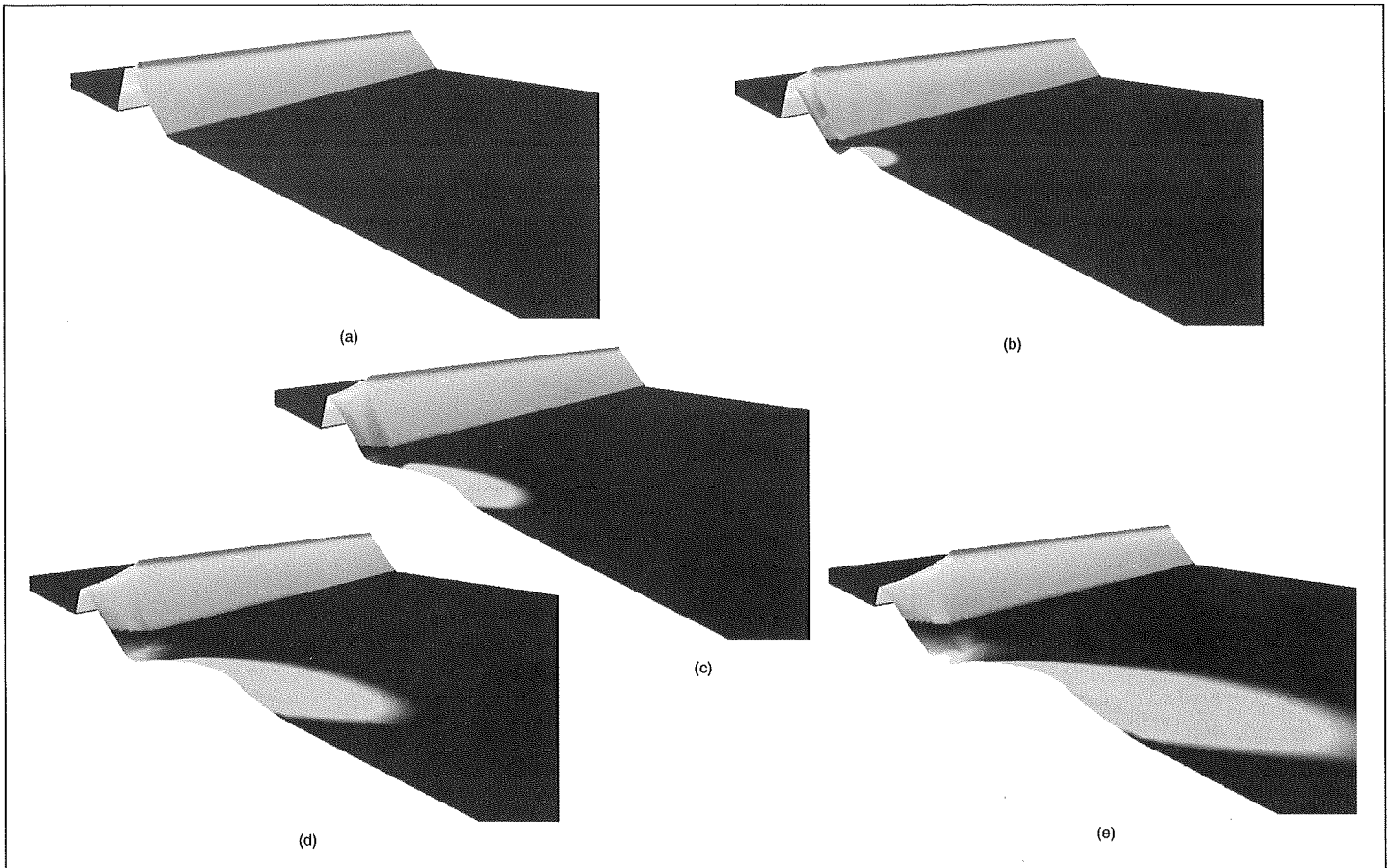


Figure 21: Rupture de digue par submersion d'une brèche initiale: résultats numériques à l'issue de (a) 0 s, (b) 25 s, (c) 50 s, (d) 75 s et (e) 100 s de simulation.
 Abbildung 21: Dambruch durch Überfluten einer bestehenden Bresche: numerische Ergebnisse nach (a) 0 s, (b) 25 s, (c) 50 s, (d) 75 s und (e) 100 s.

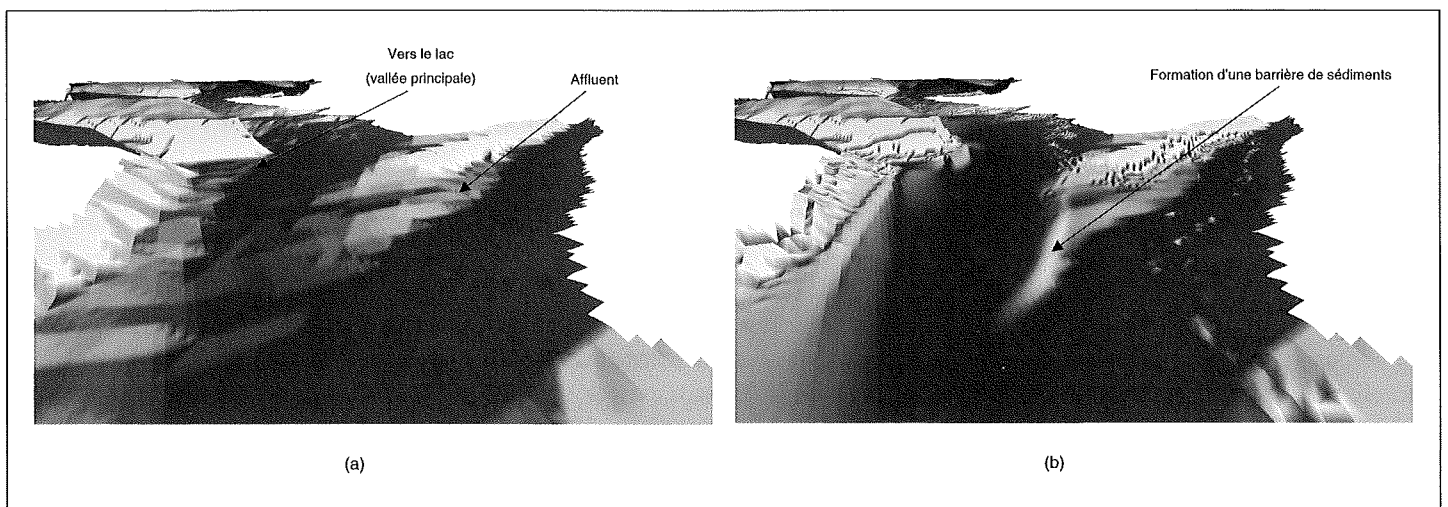


Figure 22: Evolution du lit à la confluence avec la Helle entre l'instant initial et 1000 s après la ruine de l'ouvrage de retenue. Vue 3D du dépôt de sédiments à l'entrée de l'affluent.

Abbildung 22: Entwicklung des Bettes beim Zusammenfluss mit der Helle zwischen der Ausgangssituation und 1000 s nach Versagen des Sperrenbauwerkes. Dreidimensionale Ansicht der Sedimentablagerungen am Anfang des Zuflusses.

Mouzelard, Th., Archambeau P. and Pirotton M., «An effective resolution of quasi-3D surface flows for spillways design and impact studies», *Hydroinformatics 2000*.

Roe, P.L., «Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes», *Journal of Computational Physics*, 1981.

Venkatakrishnan, V., «On the accuracy of limiters and convergence to steady state solutions», *AIAA paper*, 1993.

Rogiest, P., «An implicit finite volume scheme for the computation of unsteady compressible flows on multi-block structured grids.», *Doctoral thesis*, 1997.

Pirotton, M., A. Lejeune, «River design and environmental protection in Europe; Planning of the river Ourthe in Wallonia, Belgium», *Universidad de Cantabria, Santander*, pp. 401-508, 1999.

Adresse de contact

Pierre Archambeau
 Département d'hydraulique et
 de transport
 HACH
 Université de Liège
 Belgique
 pierre.archambeau@ulg.ac.be

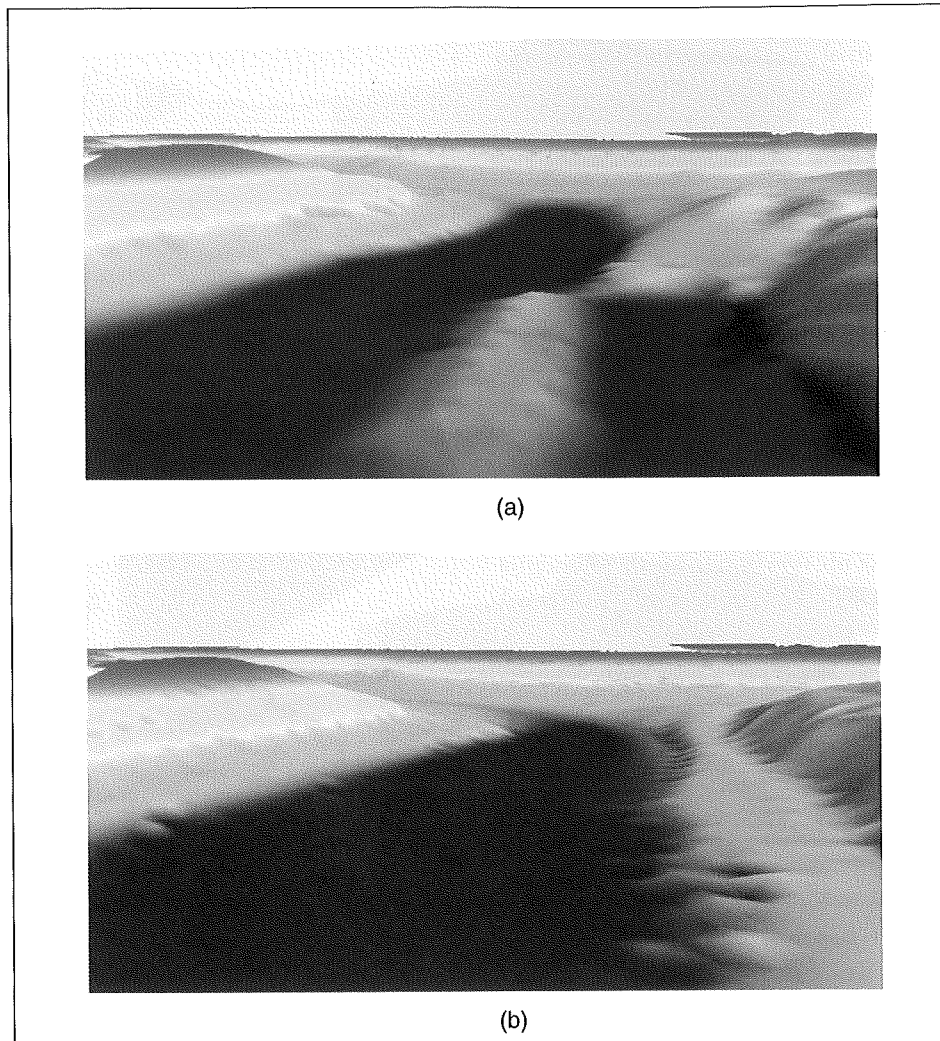
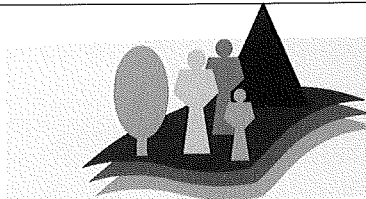


Figure 23: Evolution du lit immédiatement à l'aval de l'emplacement initial du barrage. Vue 3D depuis l'aval, en direction du lac.
 Abbildung 23: Entwicklung des Bettes unmittelbar unterhalb der ursprünglichen Sperre. Dreidimensionale Ansicht von der Luftseite in Richtung See.



**Ingenieurbüro
 Philipona & Brügger**

Müli 1 - 1716 Plaffeien / FR
 Tel. 026/ 419 24 45, Fax 026/ 419 24 05,
 E-mail philipona.brugger@mcnet.ch

*Ihr GIS - Partner
 präsentiert...*

ArcGIS 8.1 by **ESRI**⁺⁺

- die neue Referenz in der Welt der Geografischen Informationssysteme
 - eine neue Architektur mit zahlreichen Innovationen
 - 3 Produkte (ArcView 8.1, ArcEditor 8.1 und ArcInfo 8.1) mit einheitlicher Benutzeroberfläche, welche die gleichen Erweiterungen verwenden
 - mit Standard-Werkzeugen (VB/VBA/...) zu programmieren
- Wir beraten Sie gerne**