



Modélisation hydraulique 2D pour la détermination des zones inondables



Pierre ARCHAMBEAU – Michel PIROTON
Benjamin DEWALS – Sébastien ERPICUM

GTI – 09/11/2020





Sommaire

- Quel type de modèle et que contient WOLF2D ?
- Comment exploiter les données disponibles en RW ?



Qu'est-ce qu'un modèle ?

« Pour un observateur B, un objet A^ est un modèle d'un objet A dans la mesure où B peut utiliser A^* pour répondre à des questions qui l'intéressent au sujet de A » (Minsky 1965)*

Source : *Modéliser & Simuler – Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation* F. Varenne, M. Silberstein, S. Dutreuil, P. Huneman (dir.) Paris, Matériologiques, Tome 1 (2013, 33 chap., 980p.), Tome 2 (2014, 23 chap., 770p.)



20 objectifs possibles d'un modèle?

- **Faciliter une observation, une expérience ou une expérimentation**
- **Faciliter une présentation intelligible *via* une conceptualisation**
- Faciliter une théorisation
- Faciliter la médiation entre discours autour d'un phénomène (faciliter la formulation du questionnement non celle de la réponse)
- Faciliter la médiation entre une représentation intelligible et une décision d'action

→ Un modèle assure généralement plusieurs fonctions mais pas toutes



Objectifs d'un modèle « hydraulique »

Faciliter une **observation**, une expérience ou une expérimentation

1. Faciliter la présentation *via* un modèle statistique d'analyse de données

exemple : débit de crue pour différentes périodes de retour



Objectifs d'un modèle « hydraulique »

Faciliter une présentation intelligible *via* une conceptualisation

1. Faciliter la compréhension d'un phénomène en donnant à voir les principes qui gouvernent une dynamique proche de celle qui est observée : modèles **conceptuels**
2. Faciliter l'explication d'un phénomène en se basant sur ses mécanismes d'interaction élémentaires : modèles **mécanistes**
3. Faciliter la reproduction et l'extrapolation d'une évolution observable : modèle **prédictif**



Modèle **KISS** ou modèle **KIDS**?

- « **Keep It Simple, Stupid !** » ou « modèle simple »
 - Le meilleur modèle doit être simple
 - La simplicité doit guider la mise au point
 - Si les résultats sont bons, le modèle est bon
 - Souvent : 1 problème = 1 modèle
- « **Keep It Descriptive, Stupid !** » ou « modèle complexe »
 - Il faut tout considérer, jusqu'au moindre détail
 - Les seules simplifications sont celles qui sont évidentes ou démontrées par l'application du modèle



Que souhaite-t-on représenter ?





Que souhaite-t-on représenter ?

Mais aussi...

Video shows moment dam gate collapsed at Lake Dunlap
09:11:2019 09:09:44

À regarder plus tard Partager

Plus de vidéos

AIR LOCK

Global NEWS

0:00 / 0:30

YouTube



Approche mécaniste

- Lavoisier (XVIII^{ème}), Newton (XVII^{ème})...
- Modèle mathématique de Navier-Stokes (XIX^{ème}) - Équations 3D



Source : Gotlib

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{U}) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = \vec{F} + \nabla \cdot (\vec{\tau} - p \vec{I}) \end{cases}$$

avec :

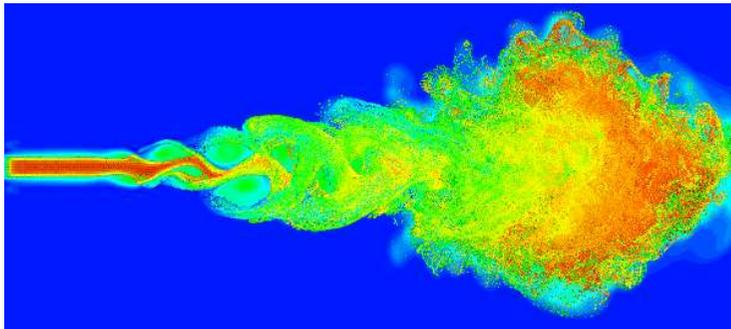
ρ la masse volumique, \vec{U} le champ vectoriel de vitesse
t le temps, \vec{F} les forces, $\vec{\tau}$ le tenseur des contraintes
p la pression, \vec{I} la matrice identité, ∇ l'opérateur gradient





Approche mécaniste

- « Problème » de la turbulence



Un des sept problèmes à 1 Million de dollars (lancé en 2000) !!
Le prix récompense la démonstration de l'existence d'une solution régulière des équations en incompressible.



Application à l'hydraulique

- Fluide homogène et incompressible

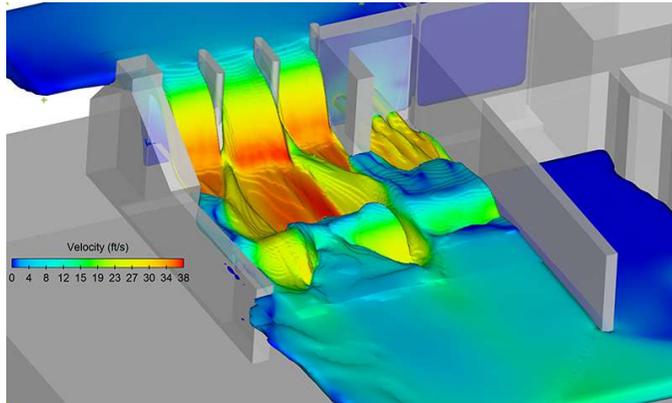
$$\begin{cases} \nabla \cdot (\vec{U}) = 0 \\ \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = \frac{1}{\rho} (\vec{F} - \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}) \end{cases}$$

- En 3D, le système d'équations mathématique change de « nature »
- A surface libre, déterminer cette position est une difficulté supplémentaire



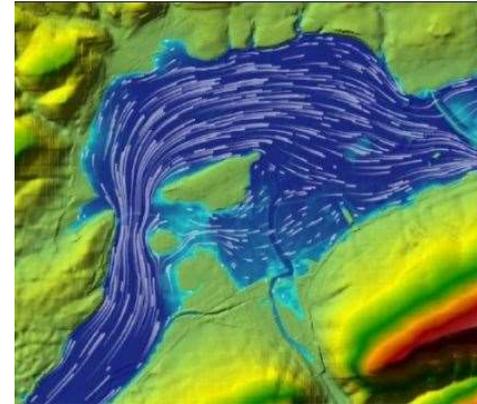
Quelles sont les dimensions utiles?

3D



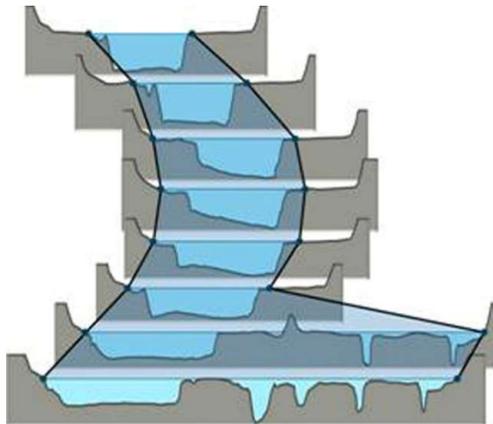
Source : Modèle Flow3D

2D



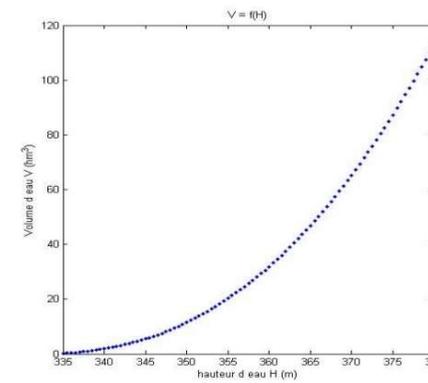
Source : Modèle HEC-RAS2D

1D



Source : Modèle HEC-RAS1D

0D

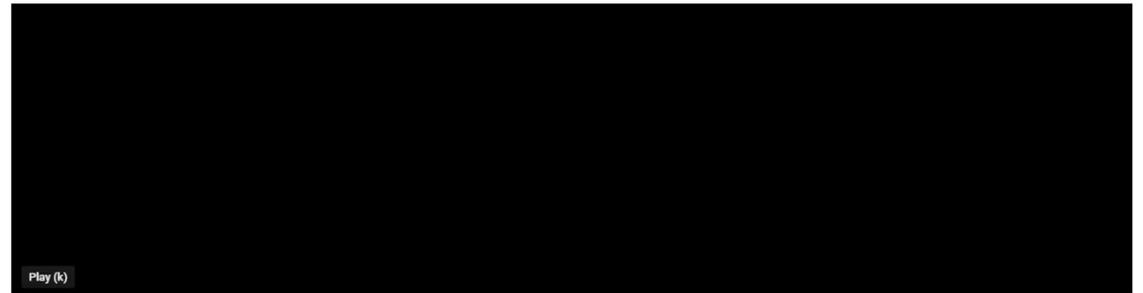
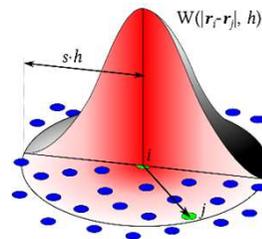
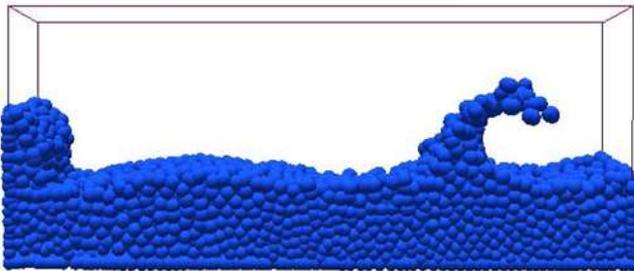




Approche Eulérienne ou Lagrangienne ?

- Lagrange = suivi de particules (ex, : modèles Smoothed Particle Hydrodynamics)

Source : Femto Egeining



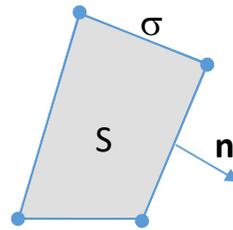
- **Euler** = Champ vectoriel des inconnues - en 2D (h, q_x, q_y)
1 point du domaine voit passer des particules différentes en fonction du temps



Méthode numérique, laquelle?

Le système d'équations doit être résolu par une méthode numérique

- Différences finies
- Éléments finis
- **Volumes finis**



$$\iint_s \frac{\partial s}{\partial t} dS + \iint_s \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} \right) dS = \iint_s b dS$$
$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_{s_-} s dS + \oint (f n_x + g n_y) d\sigma = \iint_s b dS$$
$$\frac{\partial s}{\partial t} + \sum_{i=1}^m (f n_{x,i} + g n_{y,i}) \Delta\sigma_i = \bar{b}$$

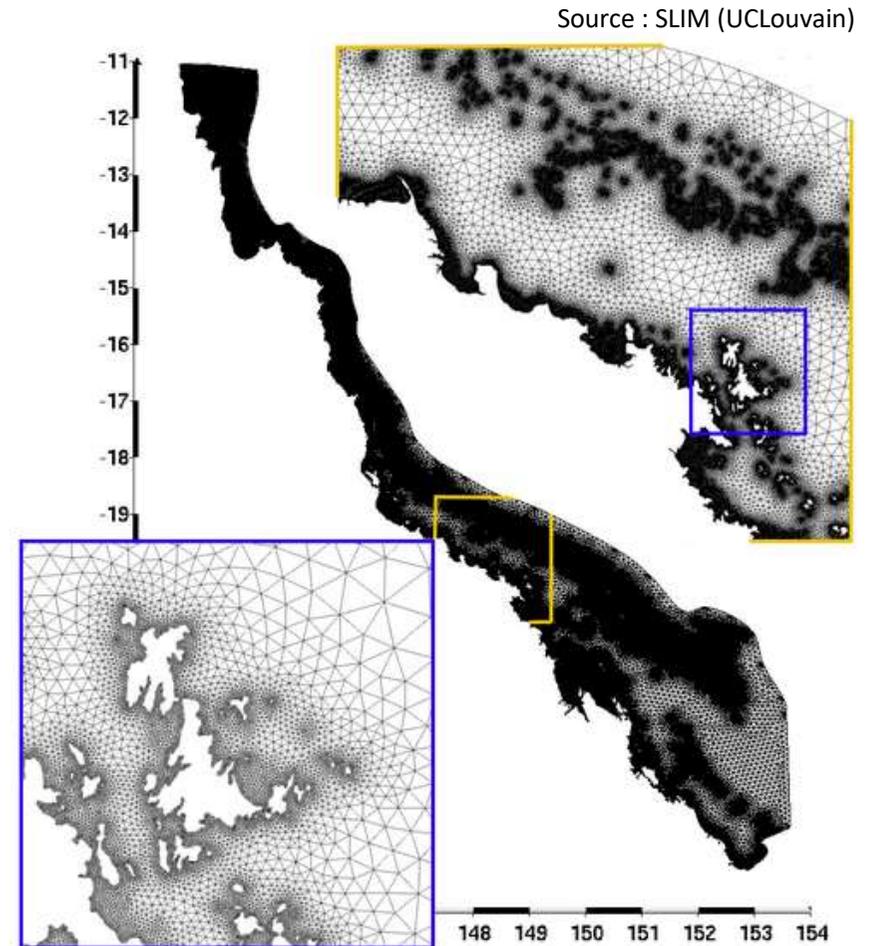
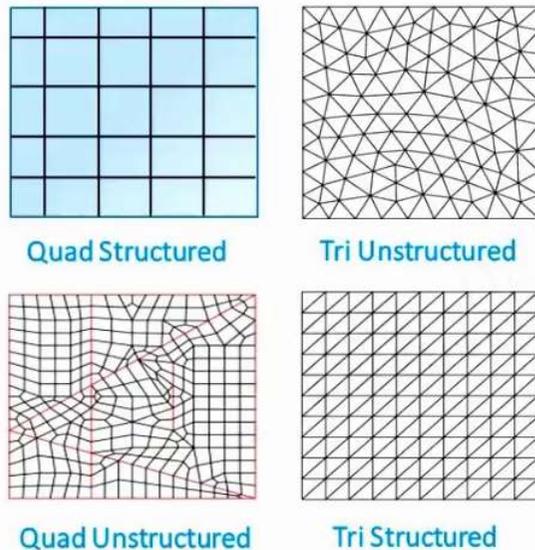
Avantages :

- **Conservatisme des inconnues de base**
- **Positionnement des inconnues au centre de gravité**
- **Capacité d'interpolation sur la surface d'une maille**



Discrétisation spatiale?

- Maillage structuré ou non structuré



Utilisation d'un maillage « quad structuré régulier » mais par blocs

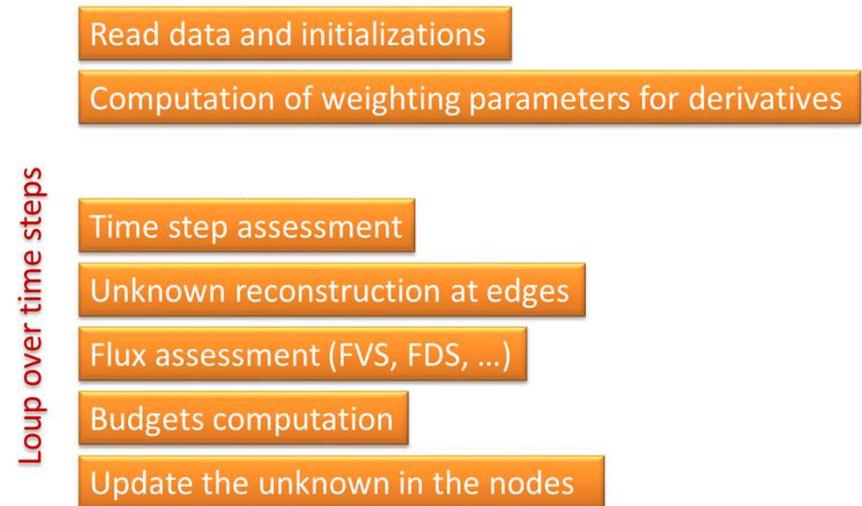


Utilisation d'un schéma numérique, lequel?

La même méthode numérique peut employer différents schémas **spatiaux** :

- Pour les termes de flux (masse, quantité de mouvement...)
 - **Flux vector splitting**
 - Flux difference splitting
 - ...
- Pour les termes sources
 - Terme de pente de fond
 - Frottement (Manning, Chezy, Colebrook...)

Algorithme typique d'un code volumes finis





Utilisation d'un schéma numérique, lequel?

Exemple sur base de l'équation 1D :
en section infiniment large

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + ghJ = 0 \end{cases}$$

Si pas de débit ($q = 0$):

$$\begin{cases} q = 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^2}{2} \right) + h \frac{\partial z_b}{\partial x} = 0 \stackrel{?}{=} h \frac{\partial Z}{\partial x} \end{cases}$$

avec Z l'altitude de surface libre

Pour que la **surface libre soit horizontale (« Lake at rest »)**, il est nécessaire que le terme source lié à la pente de fond soit en adéquation avec le terme de pression



Utilisation d'un schéma numérique, lequel?

La même méthode numérique peut employer différents schémas **temporels** :

- **Approche explicite**

- Limitation du pas de temps (**Nombre de Courant**)
- Résolution indépendante de chaque maille (découplage)

- **Approche implicite**

- Pas de limitation théorique du pas de temps
- Obligation de résoudre un système non linéaire (couplage)

$$NC = \frac{\max |u \pm \sqrt{gh}| \Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

		u [m/s]			
		0,1	1	5	10
h [m]	0,5	0,432	0,311	0,139	0,082
	1	0,309	0,242	0,123	0,076
	5	0,141	0,125	0,083	0,059
	10	0,100	0,092	0,067	0,050

Δt pour un Δx de 1 m



Utilisation d'un schéma numérique, lequel?

La même méthode numérique peut employer différents schémas **temporels** :

- Approche explicite

Pour tendre vers une **situation stationnaire**, il faut itérer sur le temps jusqu'à convergence



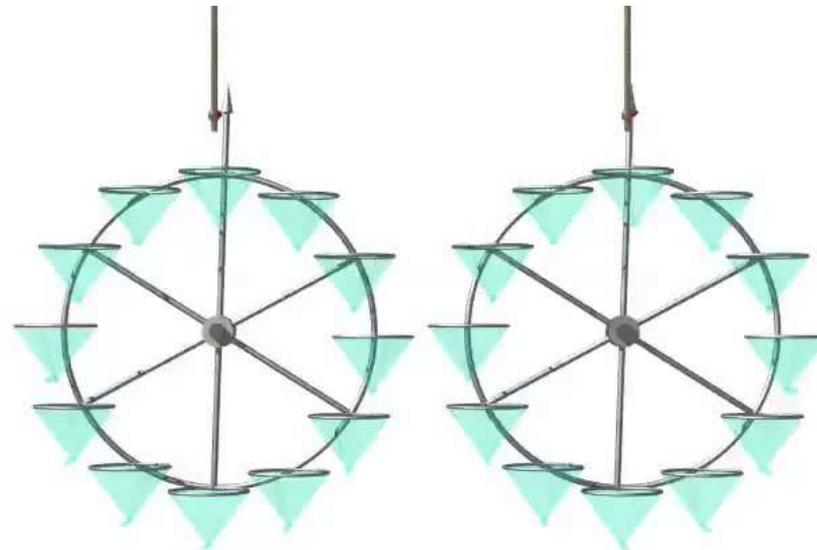
Un modèle déterministe implique-t-il une solution unique?

Pour que le système d'équations soit « **bien posé** », on a besoin :

- de conditions initiales (partout)
- de conditions aux limites (en suffisance au bon endroit)

Exemple du problème du moulin à eau de Lorenz:

Chaos ou illusion du chaos?





Un modèle déterministe implique-t-il une solution unique?



Source : Cité des Sciences à Paris la Vilette (vidéo P. ARCHAMBEAU)



Un modèle déterministe implique-t-il une solution unique?

Conditions aux limites (exemple en 1D)

En écoulement « infracritique » :

- 1 CL à l'amont (débit, **exfiltration**, hauteur...)
- 1 CL à l'aval (hauteur, **surface libre**, déversoir, infiltration...)

En écoulement « supercritique » 1D :

- 2 CL à l'amont (débit et hauteur, débit et SL...)

De nombreuses CL sont implémentées pour modéliser les spécificités locales et/ou minimiser la **zone d'influence**



Synthèse des caractéristiques de WOLF2D

- Approche mécaniste déterministe (Shallow Water Equations – SWE – avec ou **sans** turbulence)
- Min. **3 inconnues par mailles** (1 hauteur d'eau et 2 débits spécifiques + inc. turbulence)
- Discrétisation spatiale volumes finis sur maillage structuré multiblocs
- Discrétisation temporelle explicite
- Schéma numérique conservatif et équilibré
- Multiples lois de frottement (Manning, Colebrook, Barr-Bathurst...) avec surface modifiée
- Conditions limites variées tant à l'amont qu'à l'aval
- **Délimitation automatique du domaine de calcul** avec procédure d'assèchement itérative (conditions limites internes)
- Calcul sur domaine initialement sec ou non
- Indépendance du calcul au régime d'écoulement
- Modélisation automatique des **changement de régimes** (ressauts fixes ou mobiles)
- **Entièrement codé à l'Uliège-HECE (langages Fortran/C++/Python/VB)**



Sommaire

- Que contient le modèle WOLF2D ?
- Comment exploiter les données disponibles en RW ?



Exploitation des données en RW

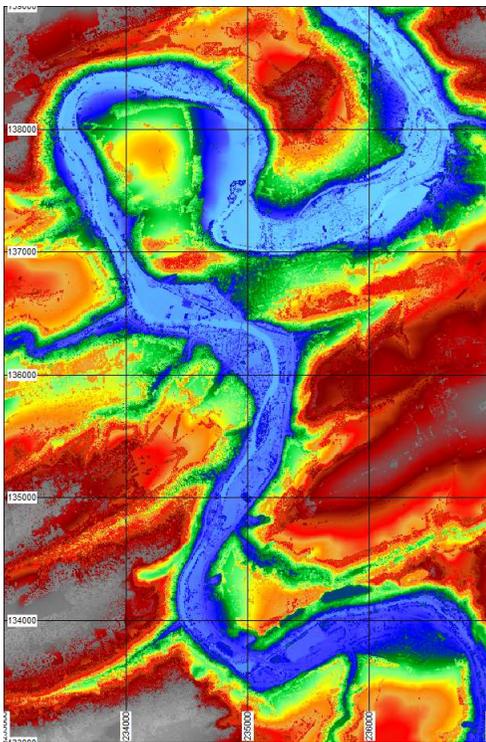
- Lidar modèle numérique de terrain/surface 1mx1m
- Bathymétrie
- Sections transversales/Plans terriers
- Levés de terrain complémentaires (géomètres...)
- Limnimètres
- Photos de crues
- PICC
- ...

Les référentiels sont communs (Lambert72/DNG) mais ...



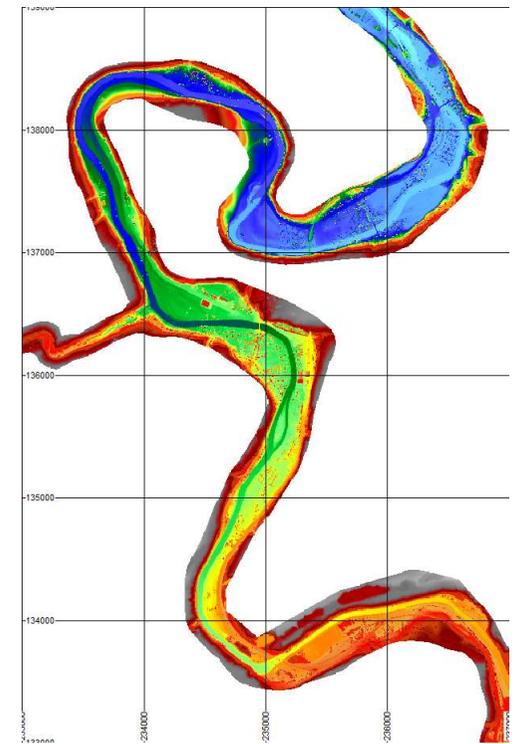
Exploitation des données en RW

- Lidar



Source : SPW – Lidar – MNS 2013-2014

Exemple : Ourthe
Chanxhe → Mery



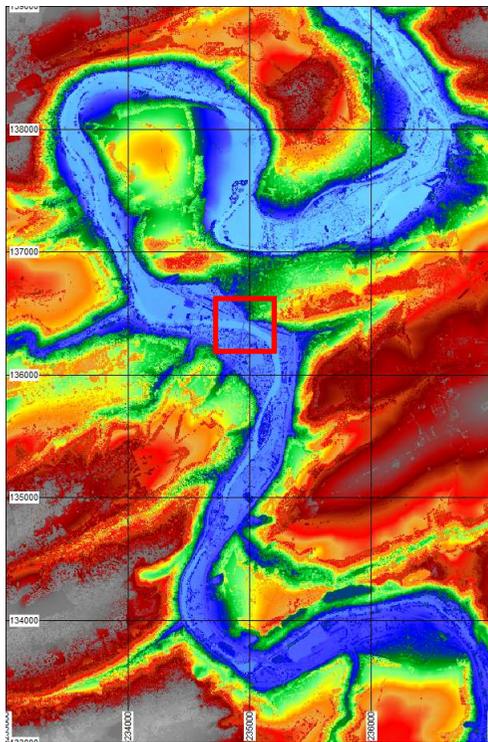
Source : SPW – Lidar – Echo2 2002



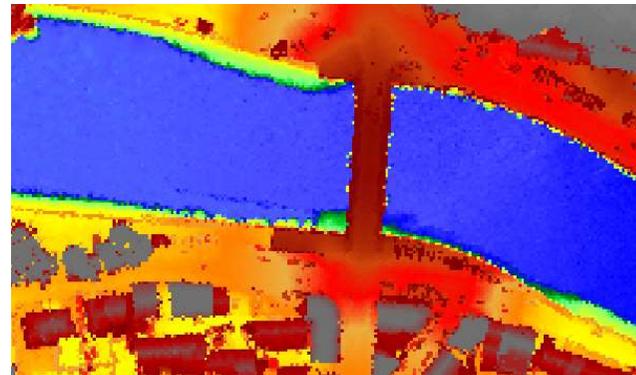
Exploitation des données en RW

- Lidar

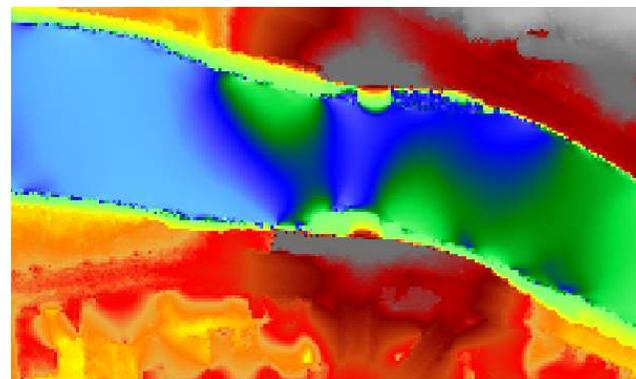
Ourthe – Esneux



Source : SPW – Lidar – MNS 2013-2014

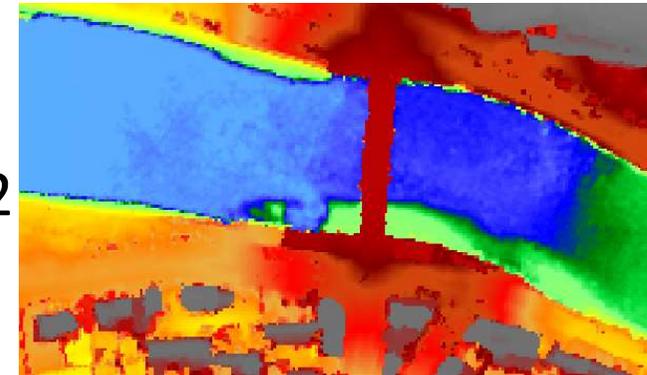


MNS



MNT

Echo2

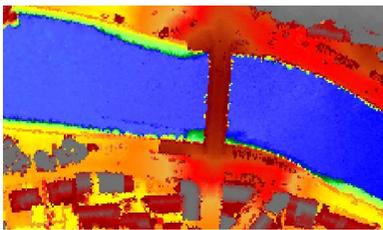




Exploitation des données en RW

- Lidar

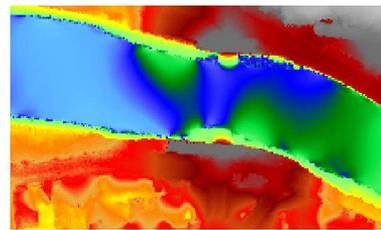
2013-2014



MNS

Présents :

- Bâtiments
- Végétation
- Ouvrages d'art

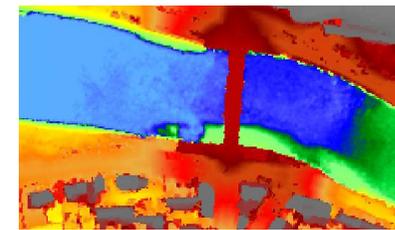


MNT

Effacés :

- Bâtiments
- Végétation
- Ouvrages d'art
- Eau/Lit mineur

2002



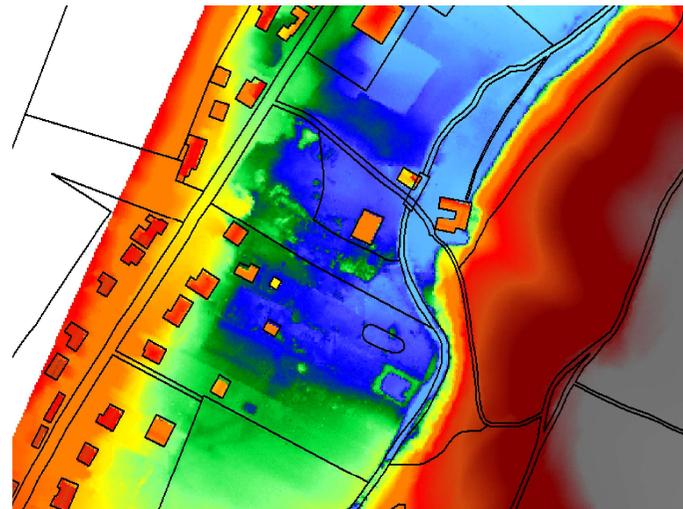
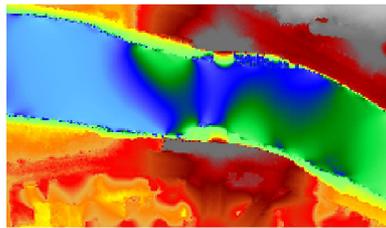
Echo2

Présents :

- Bâtiments
- Résineux
- Un peu de feuillus
- Ouvrages d'art



Exploitation des données en RW

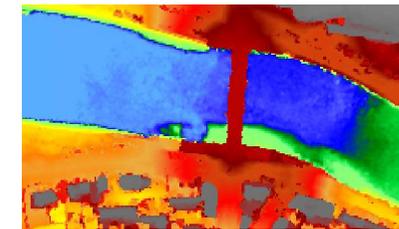


Ex. : trace des bâtiments sur base du PICC

MNT

Effacés :

- Bâtiments
- Végétation
- Ouvrages d'art
- Eau/Lit mineur



Echo2

Présents :

- Bâtiments
- Résineux
- Un peu de feuillus
- Ouvrages d'art

Les opérations nécessaires pour utiliser l'une ou l'autre source diffèrent

Il existe localement des différences importantes (>30cm) entre la version 2002 et 2013-2014 (modifications naturelles/anthropiques, technologie d'acquisition...)

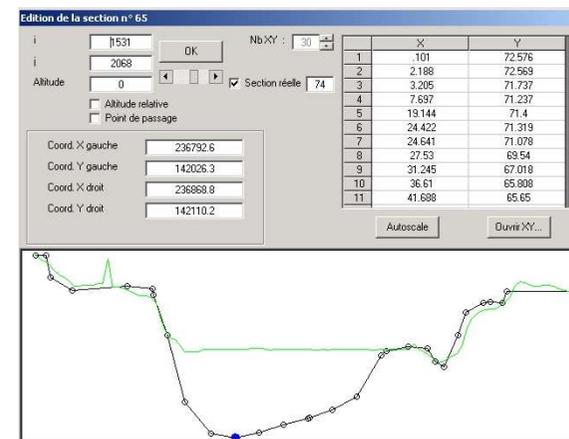
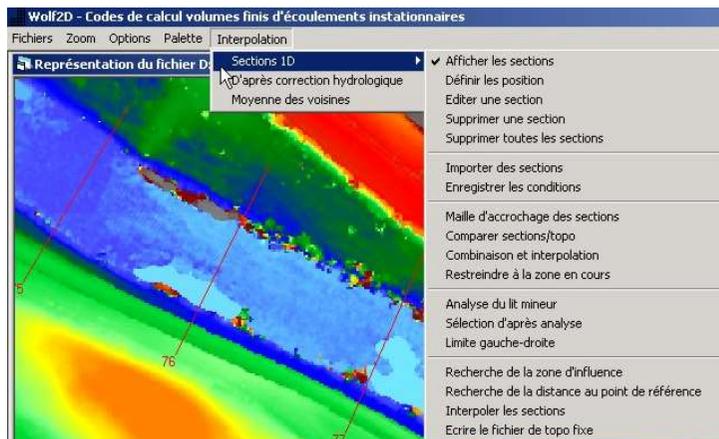


La version suivante est prévue en 2020-2021 ?



Exploitation des données en RW

- Bathymétrie (données sonar ou sections transversales)
- Objectif : disposer d'une information 2D

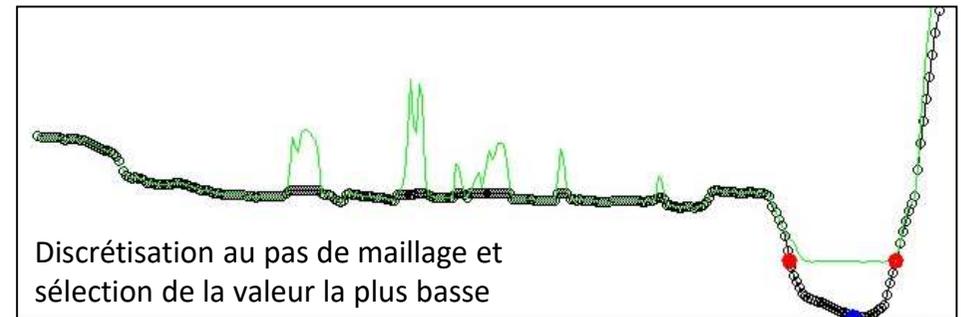
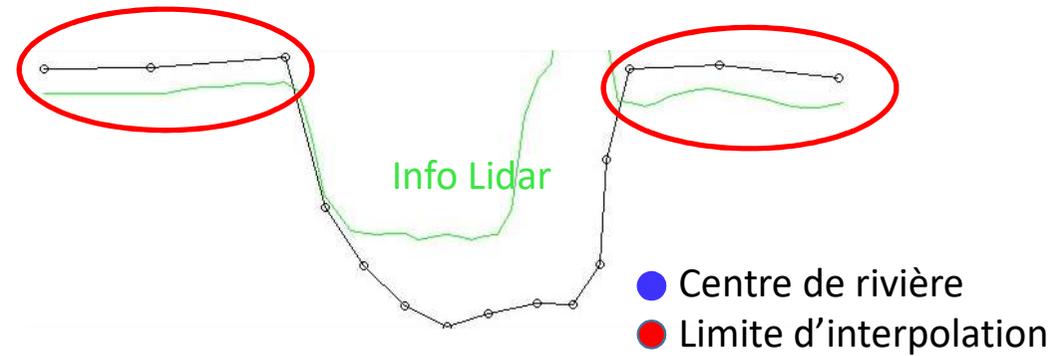
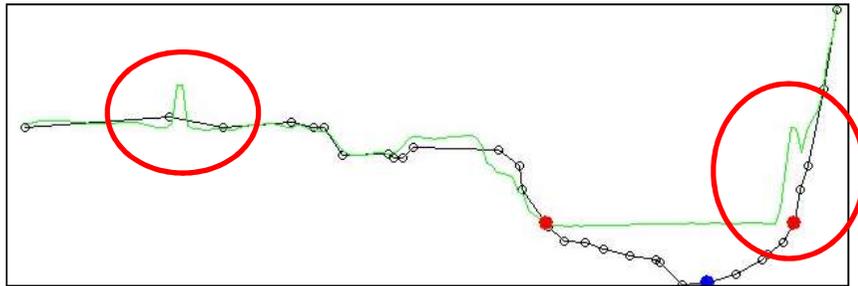


Même si les données sonar sont déjà spatialisées, les versions successives (dragages...) peuvent amener de nouvelles questions



Exploitation des données en RW

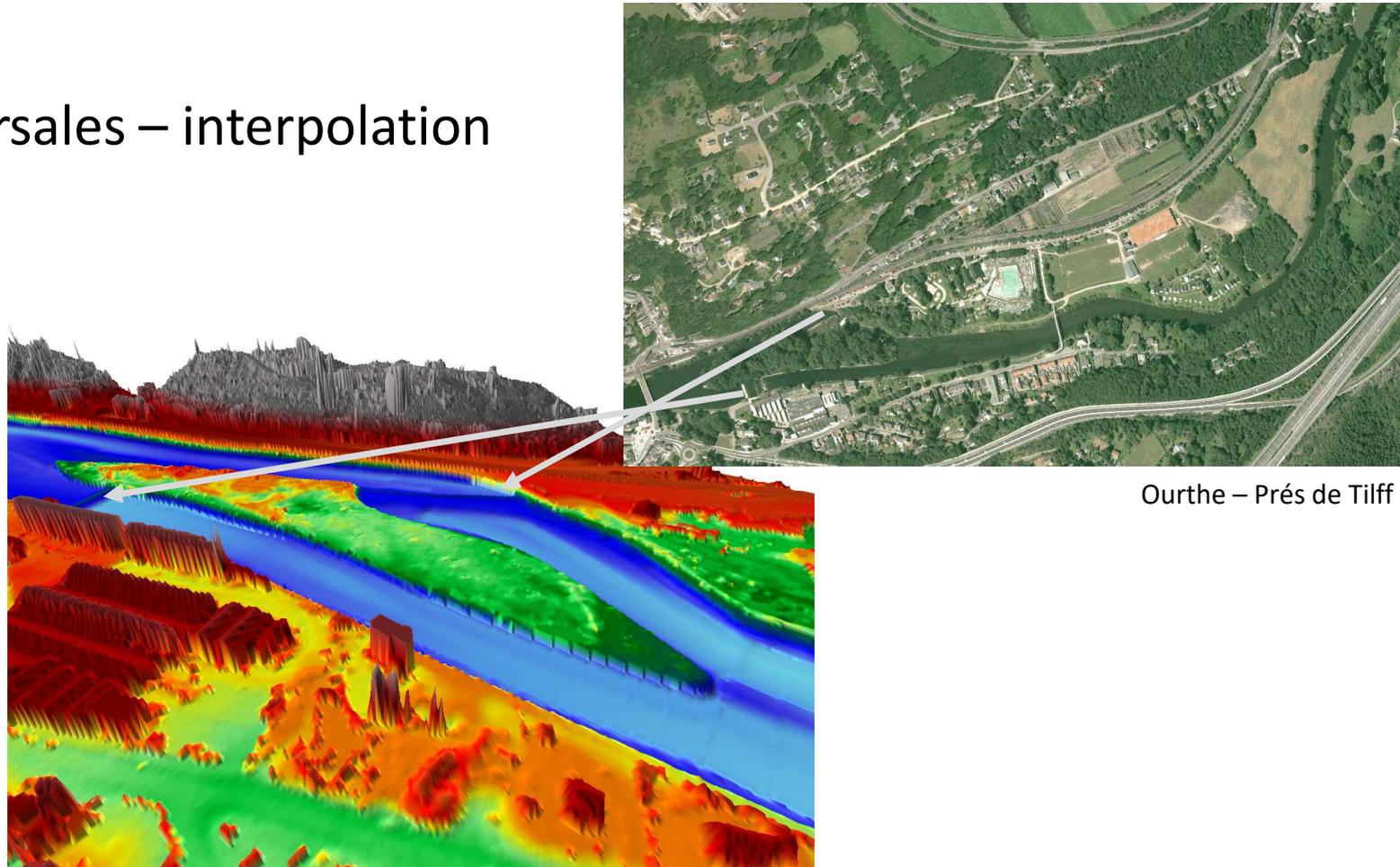
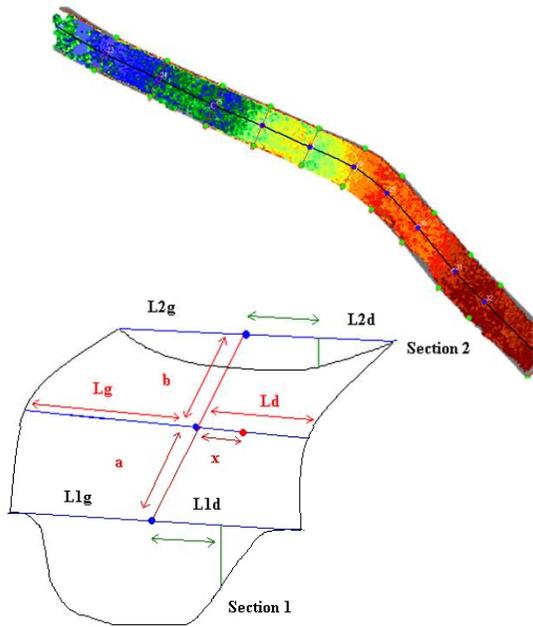
- Sections transversales – ? incohérences ?





Exploitation des données en RW

- Sections transversales – interpolation

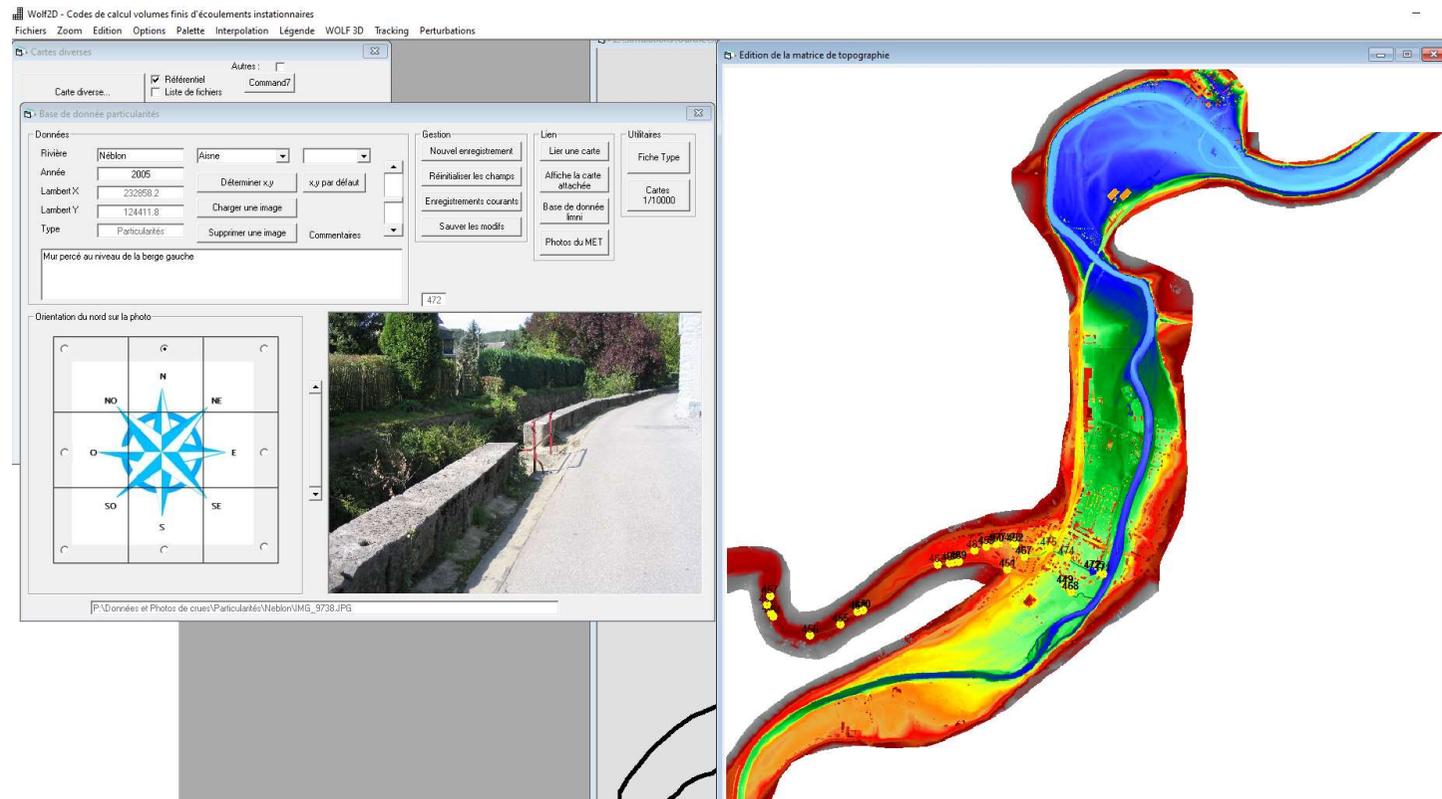


Ourthe – Prés de Tilff



Visite sur site

- Systématique
- Repérage d'éléments
 - Ponctuels
 - Linéaires
- Stockage en BDD
 - Position
 - Valeurs
 - Photos
 - ...



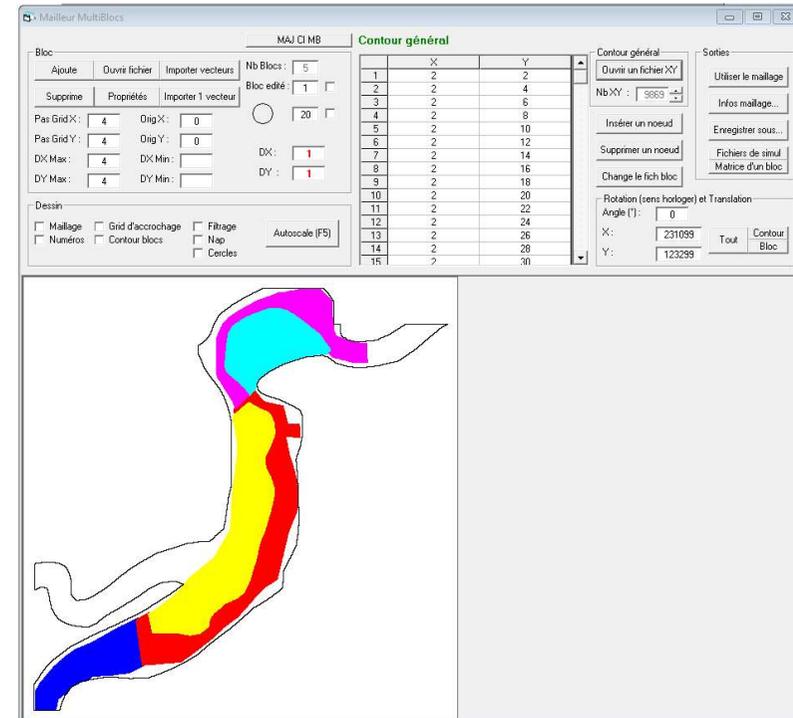
Néblon - Hamoir



Construction d'un modèle WOLF

- Travail sur la topographie pour obtenir une matrice 2D cohérente
- Préidentification de la zone inondable potentielle
- Découpage de la zone en blocs :
 - Taille de maille spécifique
 - Paramétrage (CL interne, pont en charge...)
 - Lit mineur/lit majeur
 - ...
- Zonage du/des coefficients de frottement
- Conditions initiales et conditions limites
- **Calcul jusqu'à atteindre la stationnarité**

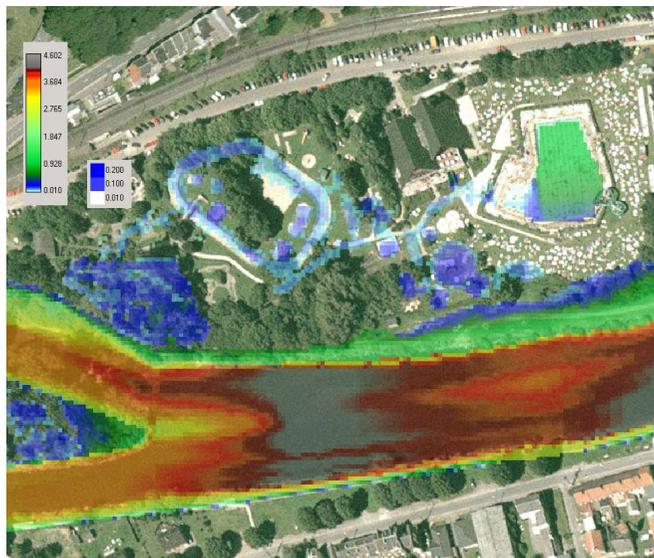
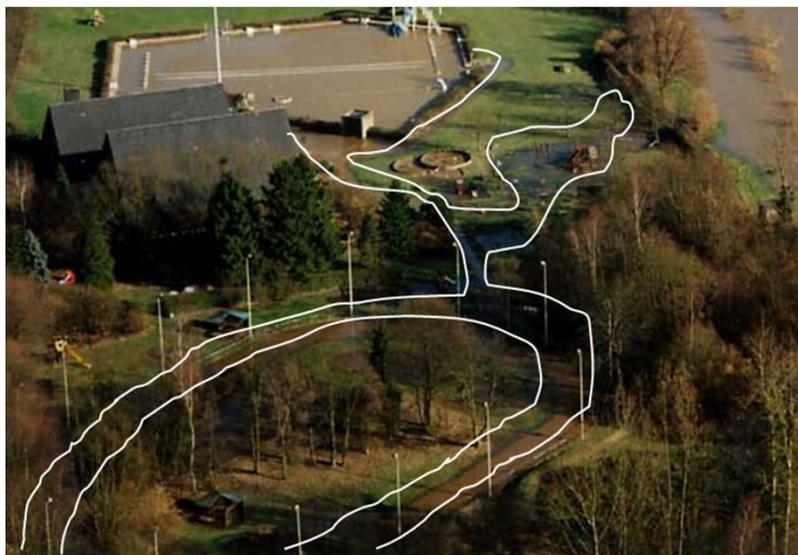
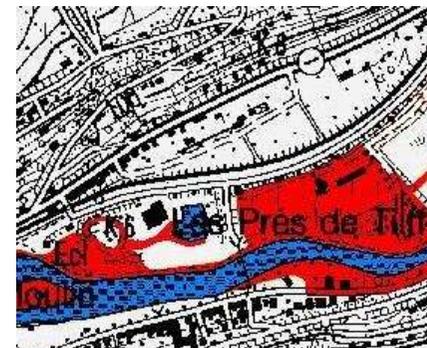
Mailleur- WOLF





Etapes de modélisation d'un tronçon

1. Phase de « calage » sur base de l'historique

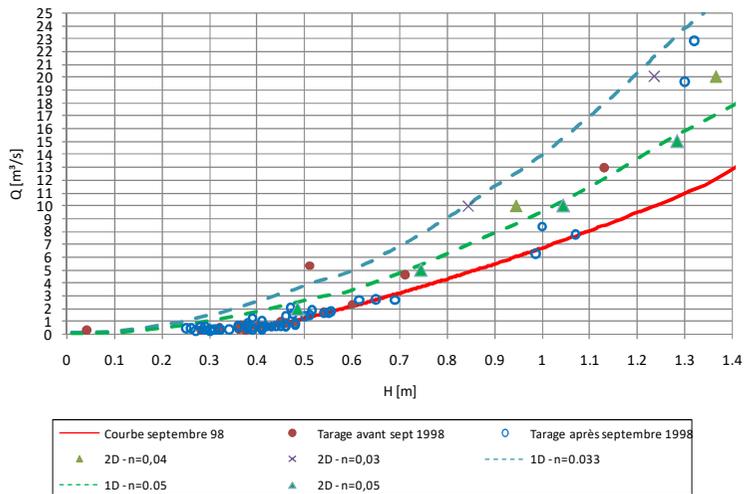


Ourthe – Prés de Tilff

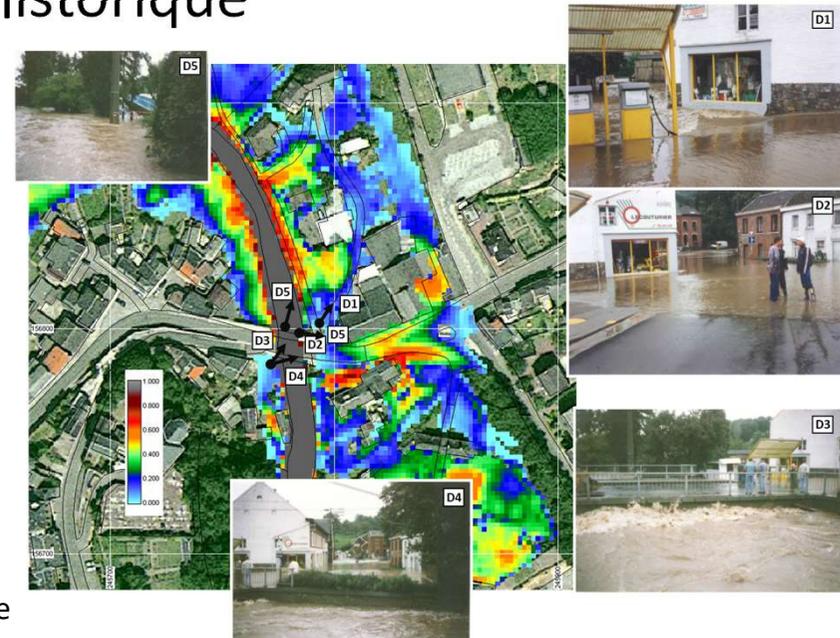


Etapes de modélisation d'un tronçon

1. Phase de « calage » sur base de l'historique



Dalhem - Boland-Berwinne

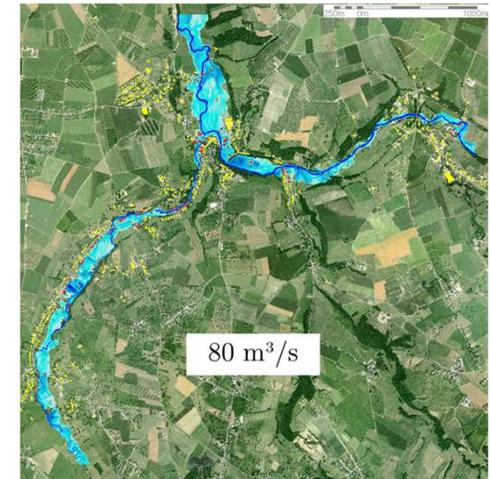
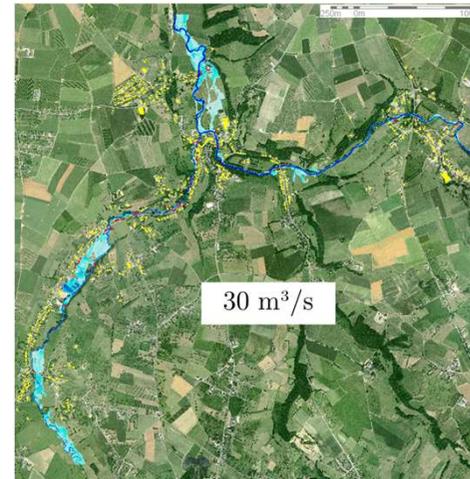


Choix du(des) coefficient(s) de frottement
Remise en cause du travail sur la topographie



Etapes de modélisation d'un tronçon

1. Phase de « calage » sur base de l'historique
2. Modélisation des périodes de retour
3. Validation de la cohérence des résultats
4. Export en Shapefiles vers SPW



Dalhem - Boland-Berwinne



Conclusions

- Développement et utilisation d'un outil dont on connaît les forces **et** les faiblesses
- Maîtrise de la chaîne de traitement
 - Import/Export
 - Fusion des différentes sources de données
 - Connaissance du terrain
- Modélisation des tronçons avec un objectif de qualité
- Aucun post-traitement requis
- Pérennité de l'outil, pourtant en développement permanent



Collaborations en cours

- INSA Lyon - Détails de l'impact des inondations urbaines (DEUFI)
- EDF – Caractérisation de la rupture progressive de digues fluviales
- Luminus – Energie renouvelable et migration piscicole (Life4Fish)
- CILE-Vivaqua – Optimisation dans des réseaux d'eau potable (FlexWatter – WalEcities)
- Canal River Trust-Waterways Ireland –VNF – Vlaamse Landmaatschappij - Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat – Optimisation énergétique du pompage dans les canaux (GreenWin)
- USheffield – Modélisation de l'interaction entre ruissellement et réseau d'égouttage
- Politecnico di Milano – Adaptation du modèle INSYDE à la Belgique
- Uliège – Couplage du modèle climatique régional MAR avec le module hydrologique de WOLF (MAR2WOLF)
- Uliège – Analyse stochastique des incertitudes





Bac à sable à réalité augmentée

Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées
Année académique 2016-2017

Construction d'un bac à sable à réalité augmentée pour illustrer certains phénomènes hydrologiques, hydrauliques et hydrogéologiques

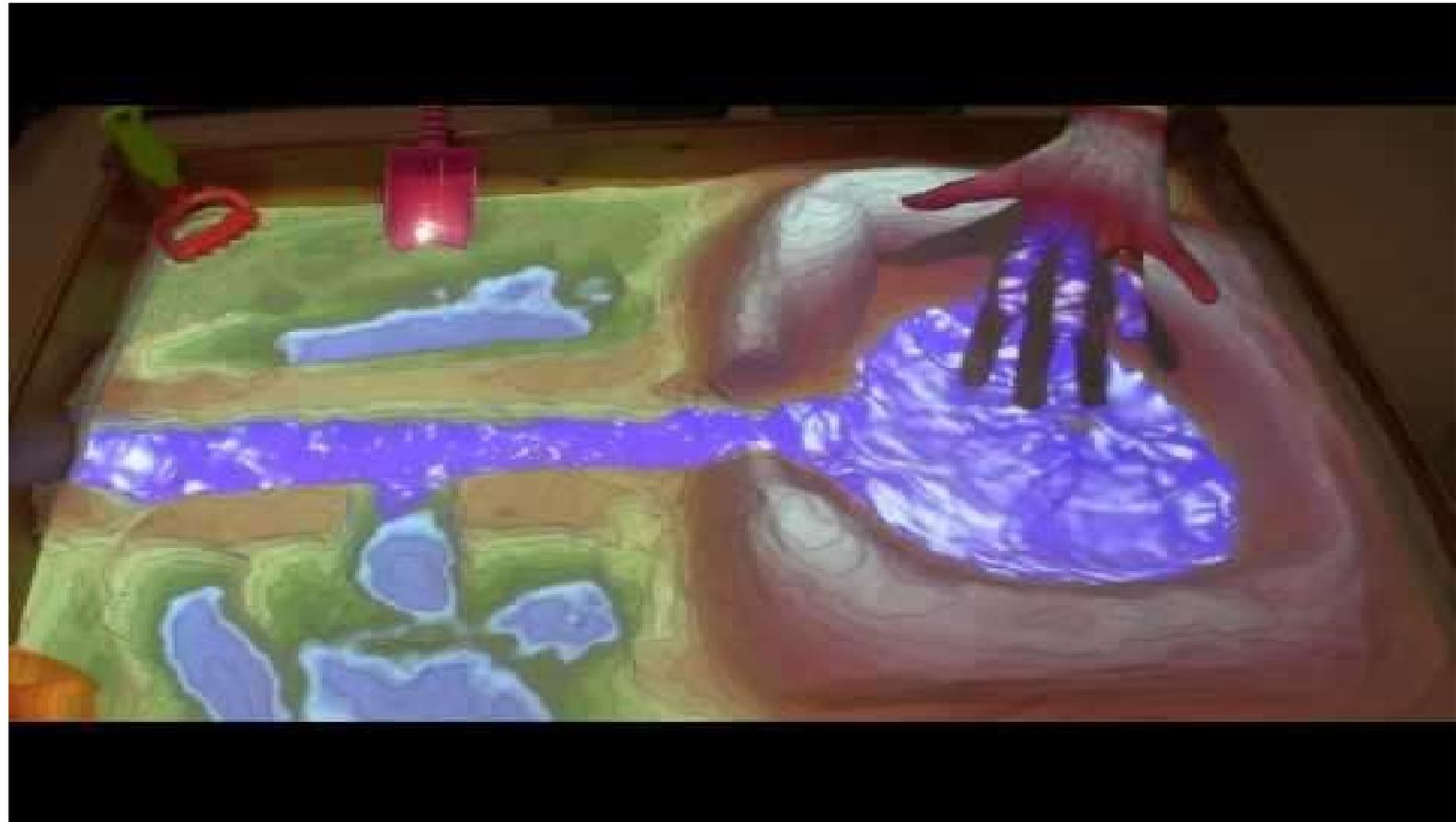
Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade d'Ingénieur Civil des constructions par Elisabeth VIVEGNIS

Composition du jury:

- Pierre ARCHAMBEAU (Université de Liège)
- Michel PIROTON (Université de Liège)
- Sébastien ERPICUM (Université de Liège)
- Vincent KELNER (Helmo Gramme)



Source : [TFE E. Vivegnis \(Uliège - 2017\)](#)



Source : Youtube – O. Kreylos (Udavis)