



**DE LA DÉLIMITATION DES ZONES  
INONDABLES À LA GOUVERNANCE DES  
RISQUES :  
RÔLE DES MODÈLES ET DE LA GIEBV**

**Par : Michel Leclerc, ing. D.ing  
Hydrologue-cadre MRC-VS  
Professeur associé INRS-ETE**

**PLANIFIER  
CONCERTE  
AGIR**

[mrcvs.ca](http://mrcvs.ca)



# Plan de présentation

- Les modèles et les processus de modélisation
  - Hydrologie déterministe et fréquentielle
  - Hydrodynamique
  - Risques
- Les OBV dans la GIEBV (volet Risques)

**Le programme d'ensemble de  
connaissance, de monitoring  
et de modélisation, de  
planification et de gestion  
opérationnelle des risques de  
l'Archipel de Montréal**

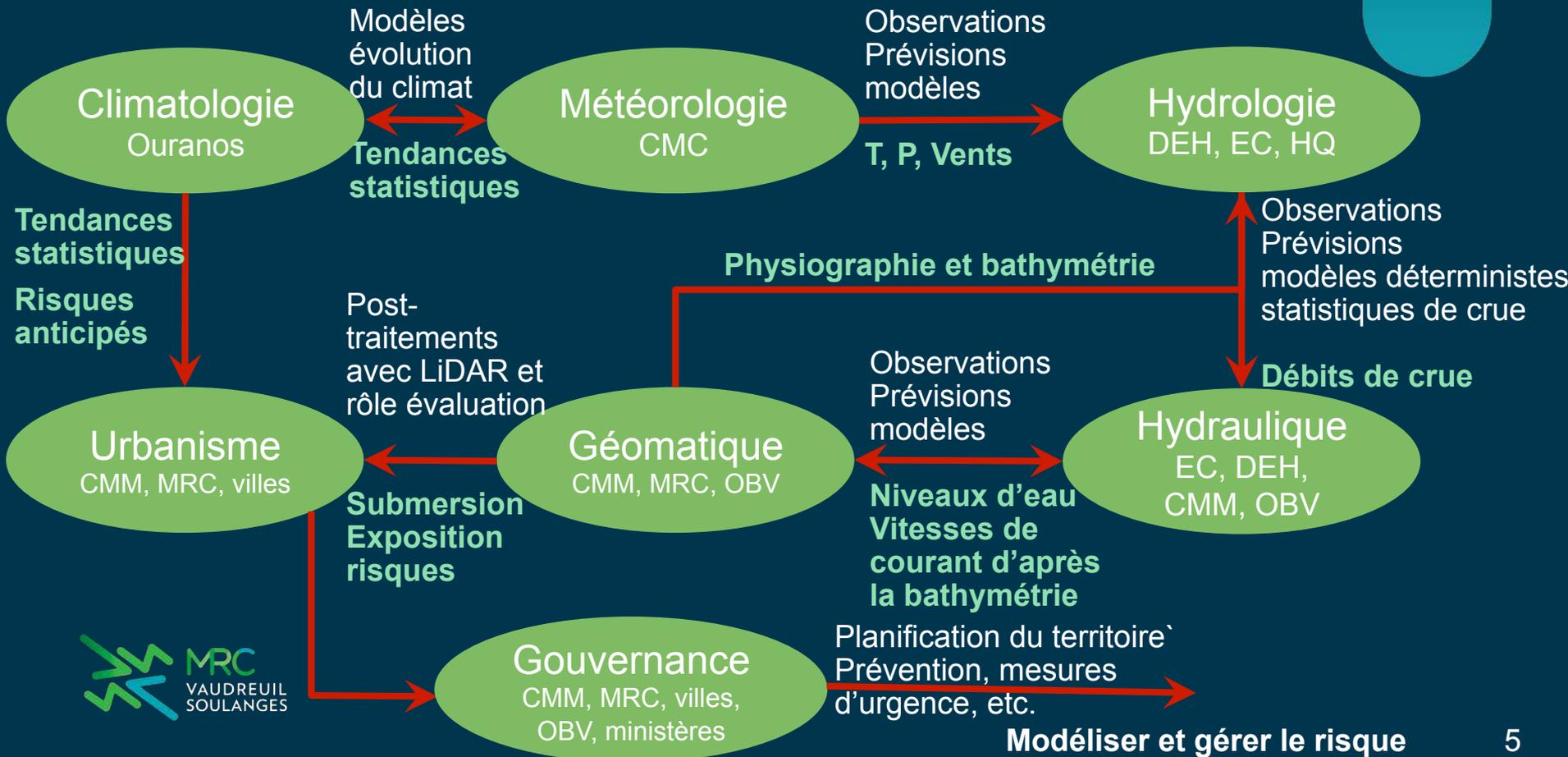
*État des lieux*

# L'intention

**L'atténuation et la prévention des risques d'inondation forment l'intention de base de notre démarche**

**Il faut donc connaître les ressorts des aléas et de la vulnérabilité pour agir efficacement**

# Une vaste opération concertée (partagée)



# Le projet de carto des ZI (MAMOT)

(Archipel de Mtl et communautés métropolitaines)

- ❑ CMM (Archipel de Montréal): 6,5 M\$
- ❑ CMQ (Québec): 3,5 M\$
- ❑ CMG (Gatineau): 1,5 M\$
- ❑ MRC-Vaudreuil-Soulanges, 2-Montagnes et Argenteuil: 1,5 M\$
- ❑ Un programme concerté et ambitieux qui vise la connaissance, la gestion préventive et opérationnelle ainsi que la communication des risques au communautés

# Modélisation hydrologique 101

# Hydrologie déterministe et statistique

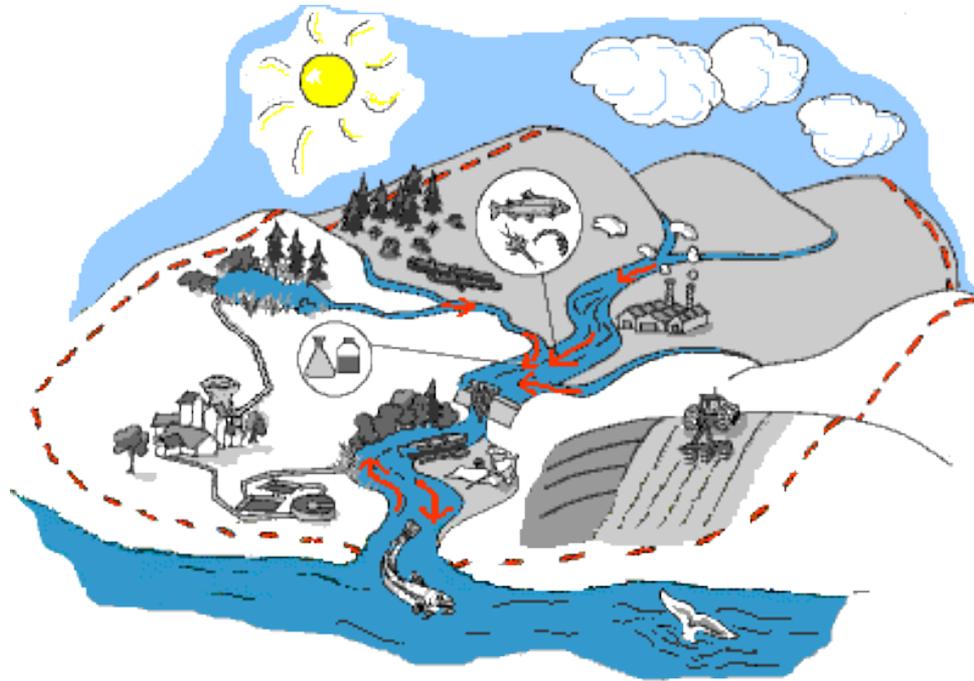
- ❑ Un **vaste réseau de mesures** hydrométriques et limnimétriques sur l'ensemble du Québec (réseau hydrométrique)
- ❑ Plusieurs objectifs complémentaires poursuivis : **analyse, planification, prévision, support opérationnel**
- ❑ Un ensemble de **modèles déterministes prévisionnels** et **opérationnels** pour la gestion des débits et niveaux d'eau (simulateur HYDROTEL) alimentés par la prévision météo et les plans de gestion – **Info-Crue**
- ❑ Un ensemble **d'outils statistiques** pour évaluer les **quantiles de crue** pour la planification du territoire et la gestion des risques à long terme (fréquences d'aléas pour les zones inondables)

# Un modèle hydrologique déterministe: PHYSITEL-HYDROTEL de l'INRS

Source: Alain Rousseau, Professeur titulaire – INRS-ÉTÉ  
Bibliographie disponible sous #physitel #Hydrotel à  
<http://espace.inrs.ca>

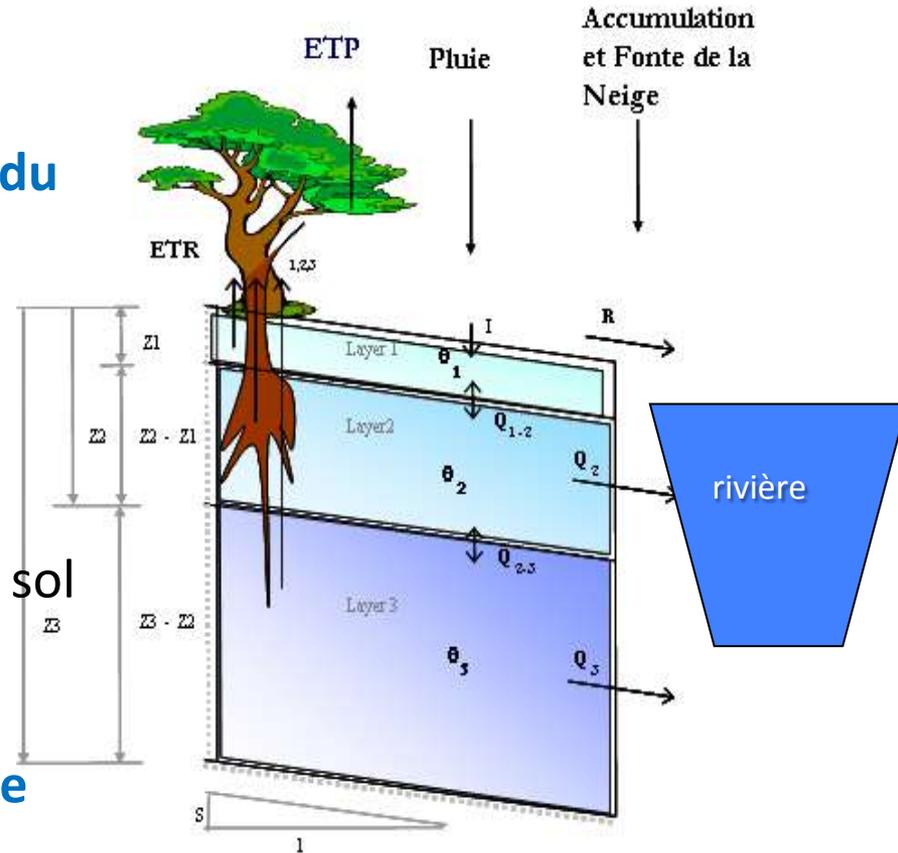
# Bassin versant : l'unité territoriale de base

Unité géographique délimitant le cheminement des eaux de surface, de l'amont vers l'aval, vers un point de confluence appelé exutoire



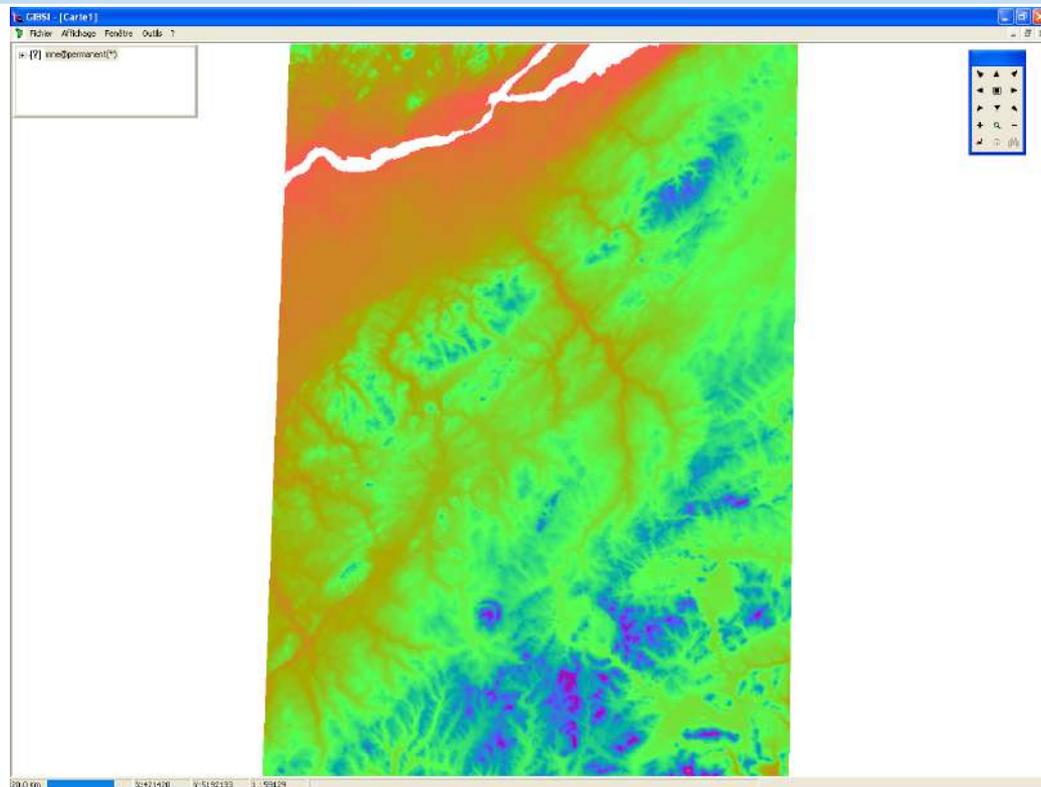
# Bilan hydrologique et routage de l'eau avec HYDROTEL

- Interpolation des données météorologiques sur chaque unité hydrologique relativement homogène du bassin (UHRH ou sous-sous-bassins)
- Bilan d'eau vertical par couche
  - Apports verticaux
    - Précipitation et fonte de neige
  - Évapotranspiration
  - Bilan hydrique de chaque couche de sol
- Routage sur la partie terrestre
  - Onde cinématique
- Routage dans le réseau hydrographique
  - Onde cinématique



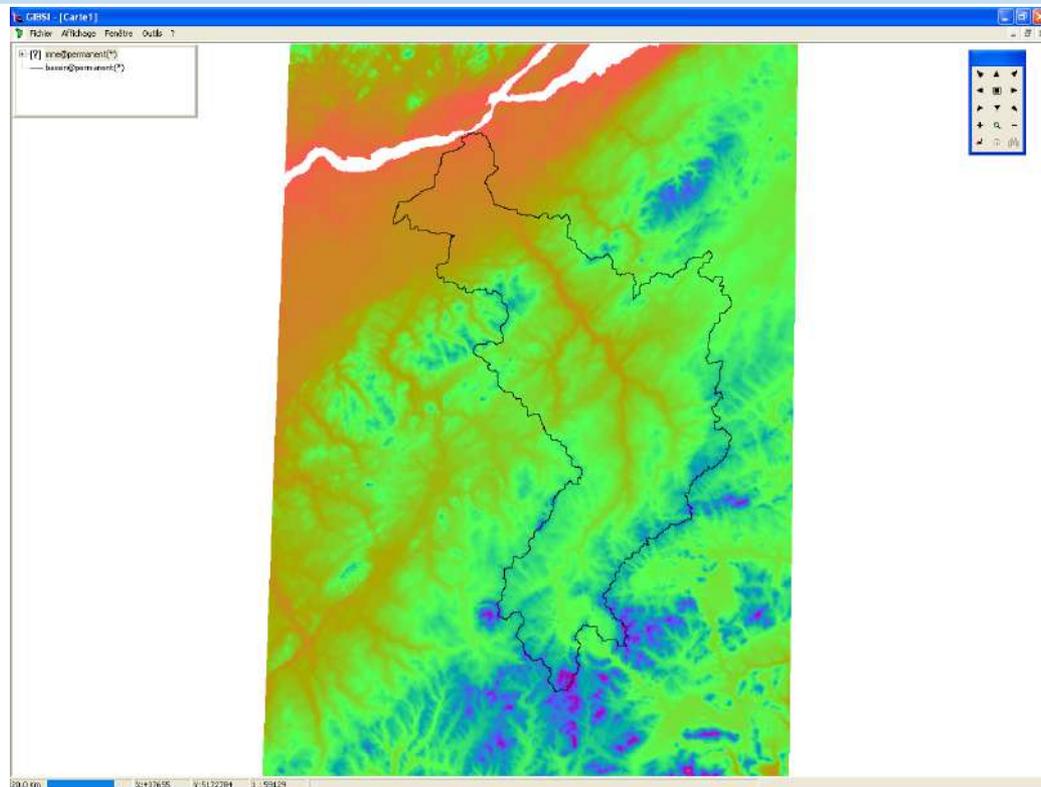
# Bassin versant

## Modèle numérique d'altitude



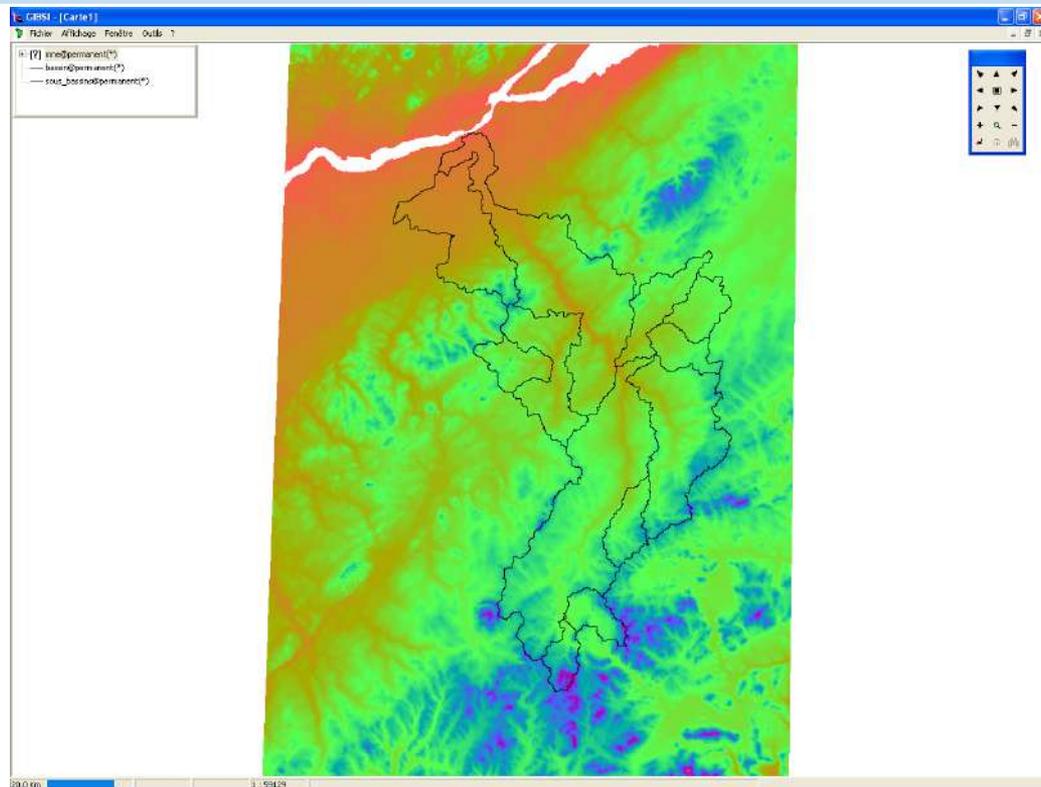
# Bassin versant

## Ligne de partage des eaux de surface

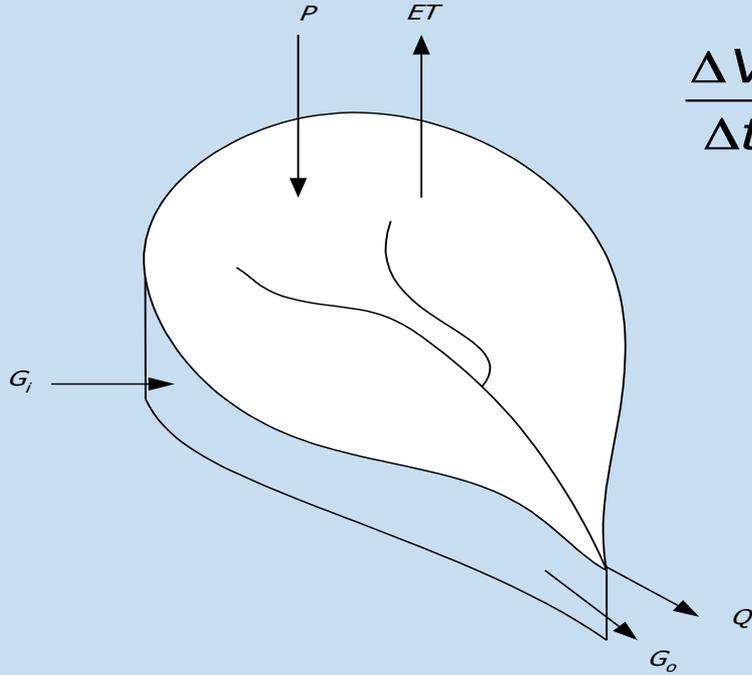


# Bassin versant

## Sous-bassins versants



# Bilan hydrologique sur des sous-bassins ou Unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH)



$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = (P + G_i) - (G_o + Q + ET) \approx 0$$

# Besoins en données physiographiques pour HYDROTEL

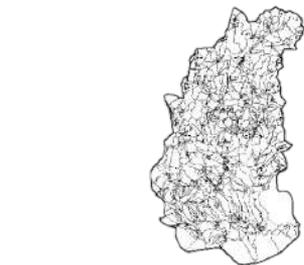
<b>Données physiographiques spatiales préparées dans PHYSITEL</b>	<b>Sources</b>
<b>MNA (modèle numérique d'altitude) (Résolution 20 m ou mieux)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Géogratis Ressources Naturelles Canada</li><li>• Relevés spécifiques (ex: Lidar)</li></ul>
<b>Carte d'occupation du sol (Résolution 30 m ou mieux)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ressource Naturelles Canada (CIRCA, MODIS)</li><li>• Gouvernement du Québec (SIEF)</li><li>• Cartographie locales (photo-interprétation)</li><li>• Commandes spécifiques (Canards Illimités, etc...)</li></ul>
<b>Carte des types de sol (pédologie) (Résolution 1/1 000 000 ou mieux)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Agriculture et Agroalimentaire Canada (Pédo-Paysage Canadien)</li><li>• Études pédologiques locales (IRDA, MAPAQ)</li></ul>
<b>Réseau hydrographique (Résolution 1/20 000 ou mieux)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ressources Naturelles Canada (Réseau hydro-national)</li><li>• Gouvernement du Québec (Réseau filamentaire)</li><li>• Données locales</li></ul>

# Besoins en données hydrométéorologiques pour HYDROTEL

Données ponctuelles	Sources
<b>Données météorologiques (en entrée)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Stations météorologiques d'Environnement Canada</li><li>• Données sur grille du SIMAT (payantes)</li><li>• Stations météorologiques locales (ex: Ville de Québec)</li><li>• Ouranos (Scénarios de changements climatiques)</li></ul>
<b>Données hydrométriques (pour calibrer-valider)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Stations hydrométriques Gouvernement du Québec (MDDELCC (DEH))</li><li>• Stations locales</li></ul>

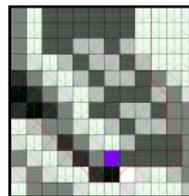
# Numérisation du bassin versant avec PHYSITEL

*Découpage du bassin en  
unité hydrologique  
relativement homogène  
(UHRH)*

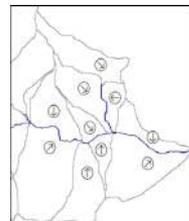


*Caractérisation des UHRH  
(% d'occupation,  
sol dominant, pente)*

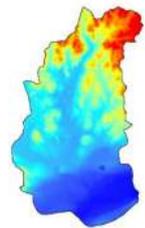
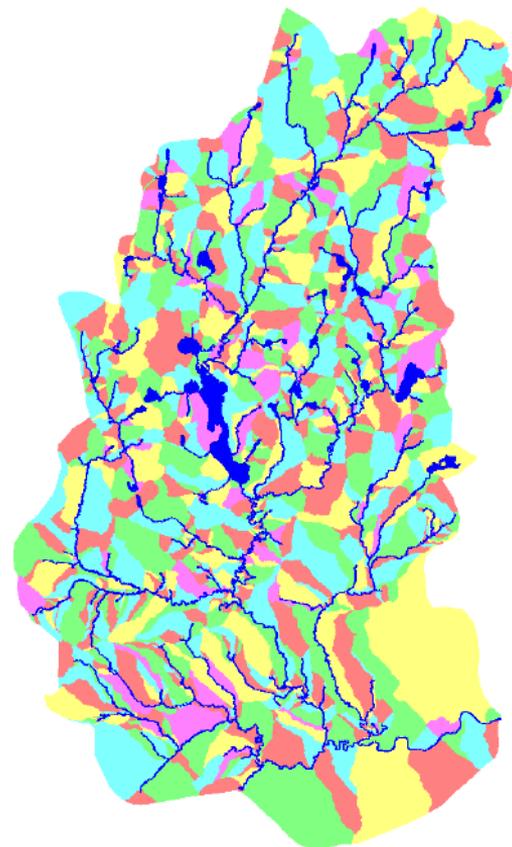
*Matrice  
d'écoulement*



*Orientation  
des  
écoulements*



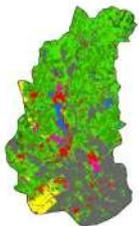
*Réseau  
vectoriel*



**Modèle numérique  
d'altitude**



**Réseau  
vectoriel**



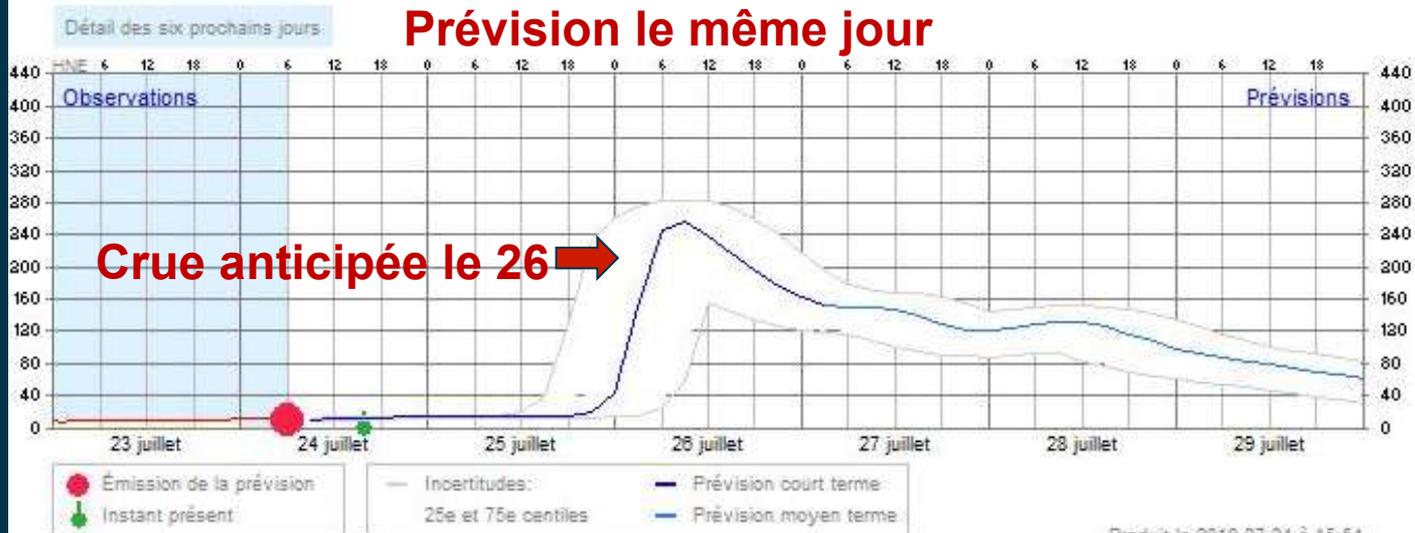
**Occupation  
du sol**



**Types  
de sols**

1505 UHRH/versant (moyenne 0.368 km<sup>2</sup> ou 36.8 ha)  
668 segments de rivière (moyenne 968 m)

# Exemple de prévision hydrologique (DEHQ)



# L'hydrologie statistique

- ❑ **Cherche à établir la fréquence des aléas de crue (analyse fréquentielle)**
- ❑ **On construit une chronique de crues maximales annuelles (1/année)**
- ❑ **30 ans d'observations requises idéalement (norme)**
- ❑ **On ajuste une loi de distribution statistique qui représente la structure de variabilité naturelle (ex: log Pearson III)**
- ❑ **On peut ensuite établir la probabilité annuelle qu'une valeur de crue donnée soit égale ou dépassée (fréquence au dépassement)**
- ❑ **On peut établir le débit de crue correspondant à une période de retour comme 2 ans, 20 ans ou 100 ans**

# Les faiblesses de la méthode statistique

- ❑ Utilise souvent les **valeurs moyennes journalières** du débit de crue plutôt que les valeurs horaires ou instantanées. Une correction inadéquate est appliquée (**facteur de pointe**)
- ❑ Difficile de détecter une **dérive liée au climat** (non-stationnarité des séries)
- ❑ Mélange indistinctement les **crues printanières et celles d'automne** (hétérogénéité)
- ❑ Inadéquate pour traiter **les embâcles** (60% des dommages au Canada)
- ❑ De nouvelles méthodes existent pour atténuer ces faiblesses
- ❑ Logiciel utilisé pour établir les quantiles de crue (**IFRAN de l'INRS**)

# Modélisation hydrodynamique 101

Sources:

Yves Secretan, Professeur honoraire – INRS-ETE

Bibliographie disponible sous #H2D2

à <http://espace.inrs.ca>

US Army Corps of Engineers : logiciel HEC-RAS

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

# La mathématique de l'hydrodynamique

- ❑ **Loi 1:** La masse se conserve
- ❑ **Loi 2:** Le momentum se conserve ou s'équilibre (loi de Newton)

$$F = mA$$

- ❑ Ces deux lois sont développées en équations différentielles pour les écoulements :  
**Équations de Saint-Venant des ondes longues** (crues, marées)
- ❑ Ces équations différentielles sont résolues numériquement
- ❑ **La modélisation numérique du terrain (MNT)** est fondamentale

# Le modèle de Saint-Venant 2D horizontal développé

$$(x) \rightarrow \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$\frac{1}{H} \left\{ \frac{\partial H}{\partial x} \left[ \frac{\tau_{xx}}{\rho} + \frac{\tau'_{xx}}{\rho} \right] + \frac{\partial H}{\partial y} \left[ \frac{\tau_{xy}}{\rho} + \frac{\tau'_{xy}}{\rho} \right] \right\}$$

$$+ \rho a \cdot \frac{C_w}{H} |\vec{W}| w_x$$

$$- g \cdot \frac{n^2}{H^{4/3}} \frac{|\vec{V}| \bar{u}}{H} + \frac{f_c \bar{v}}{H}$$

(y) expression analogue

Equation de conservation masse

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial H \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial H \bar{v}}{\partial y} = 0$$

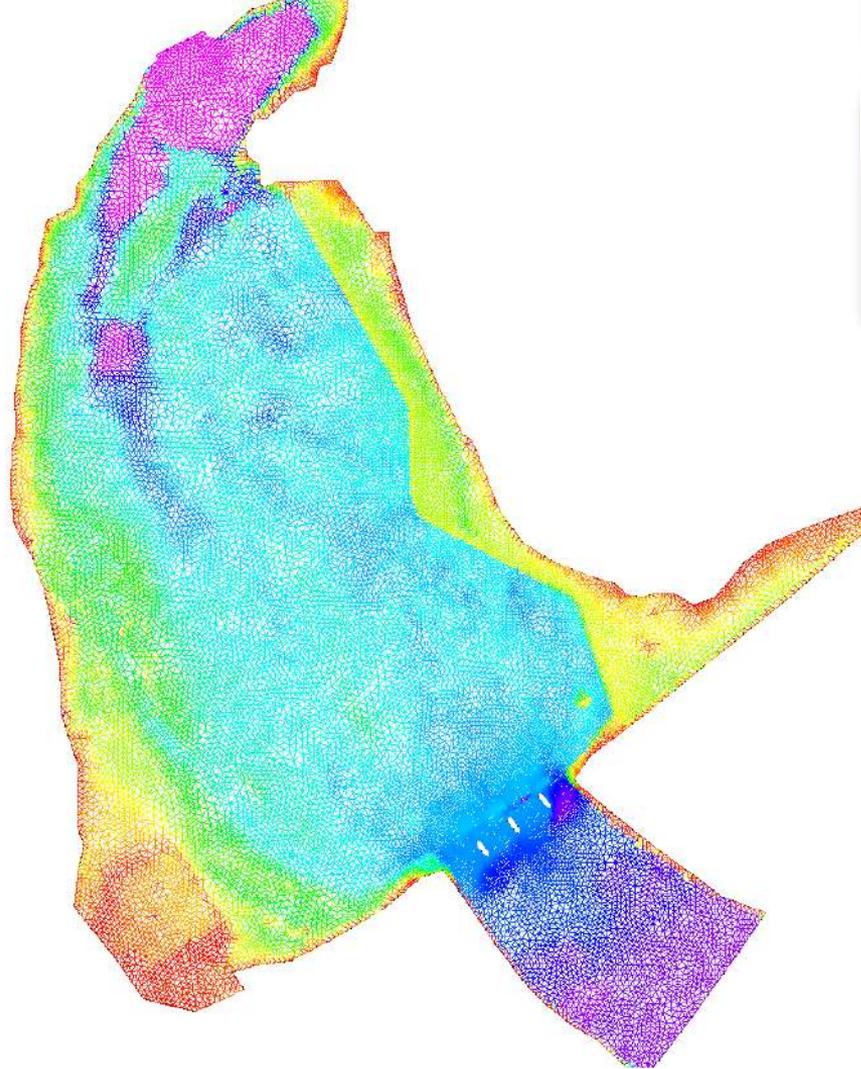
# Lexique de base

- ❑ Les modèles de terrain en hydrodynamique:  
rôle de la géomatique : bathymétrie, topographie, LiDAR, substrats
- ❑ Modèles 1D vs 2D vs 3D ?  
La **discrétisation spatiale** du cours d'eau
- ❑ Écoulements transitoires ou stationnaires (permanents)?  
La propagation des crues ou de la marée
- ❑ Les outils utilisés:  
HEC-RAS (USACE, 1D-2D combinés),  
H2D2 (INRS, 2D combinant plantes aquatiques),  
Télémac (EDF, 2D, 3D), etc.

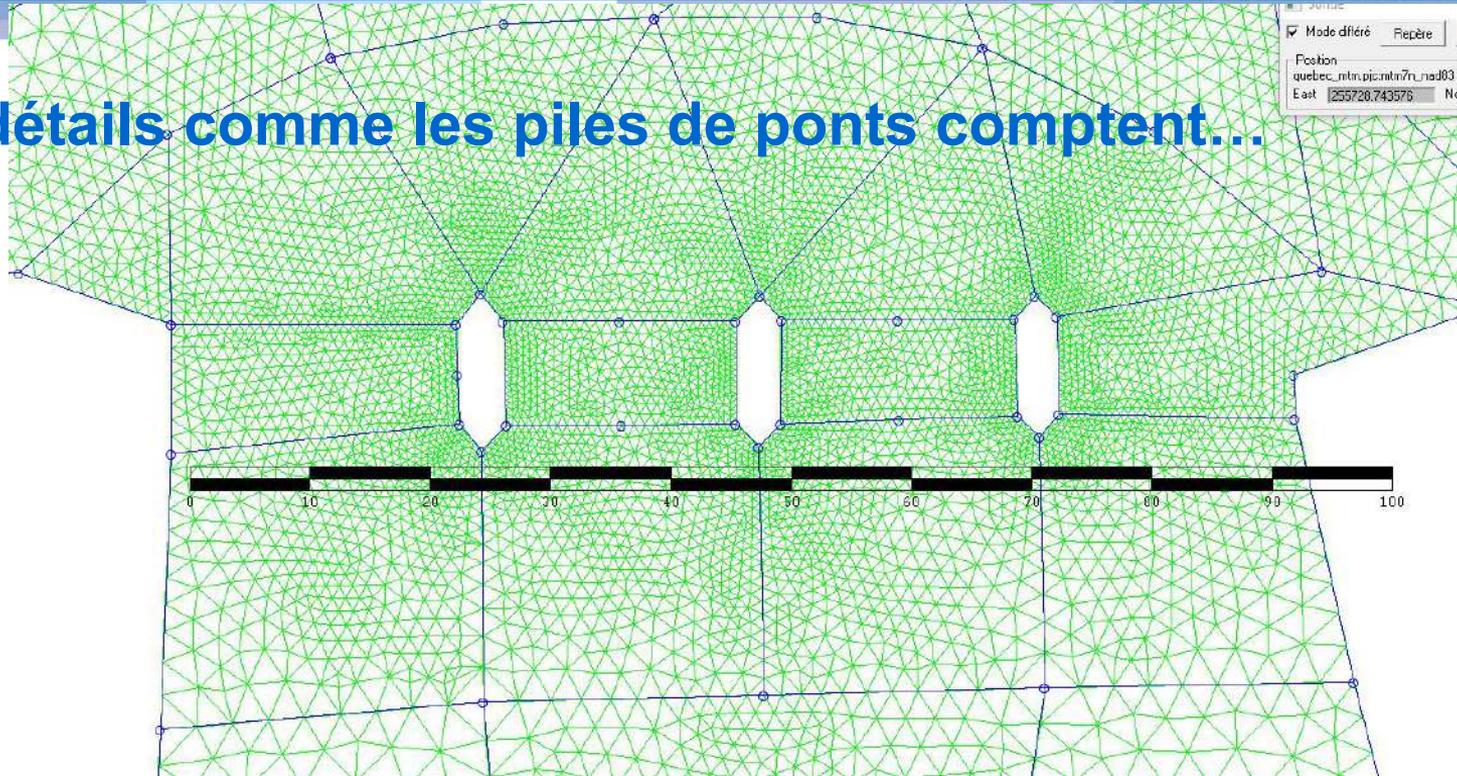
# Un exemple: l'hydrodynamique du pied de la chute Montmorency

## Maillage hydrodynamique 100 000 nœuds

Mailles de type éléments finis  
ou TIN,  
Nécessite un bon mailleur  
(géomatique)

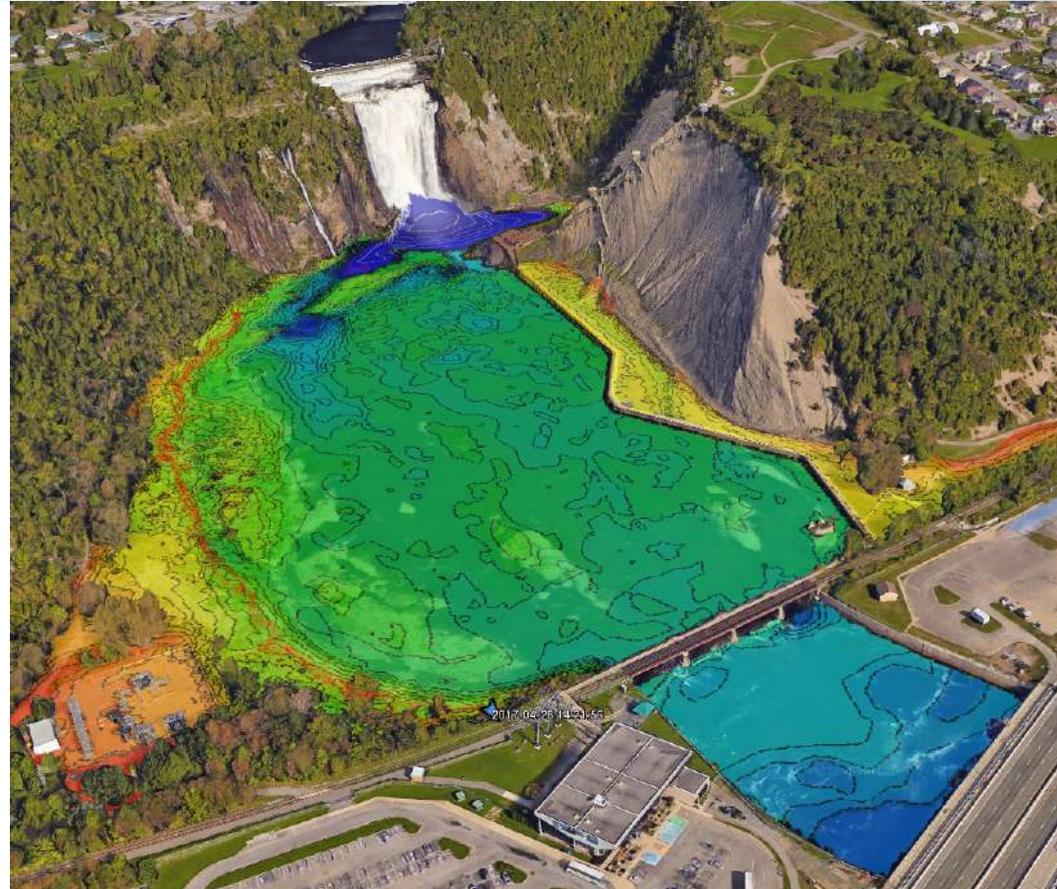


Les détails comme les piles de ponts comptent...



# MNT construit à partir de données bathymétriques, de données LiDAR et de la géométrie des ouvrages

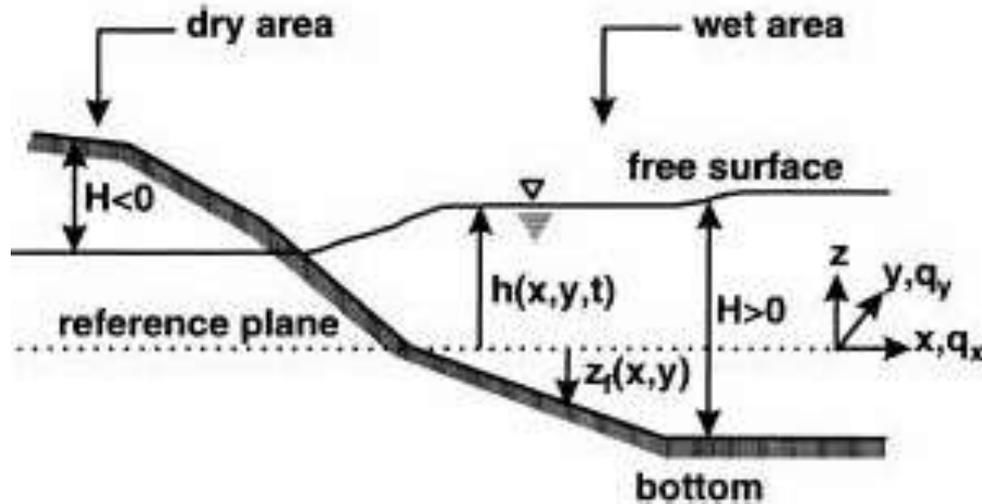
Version \*.kmz pour Google Earth



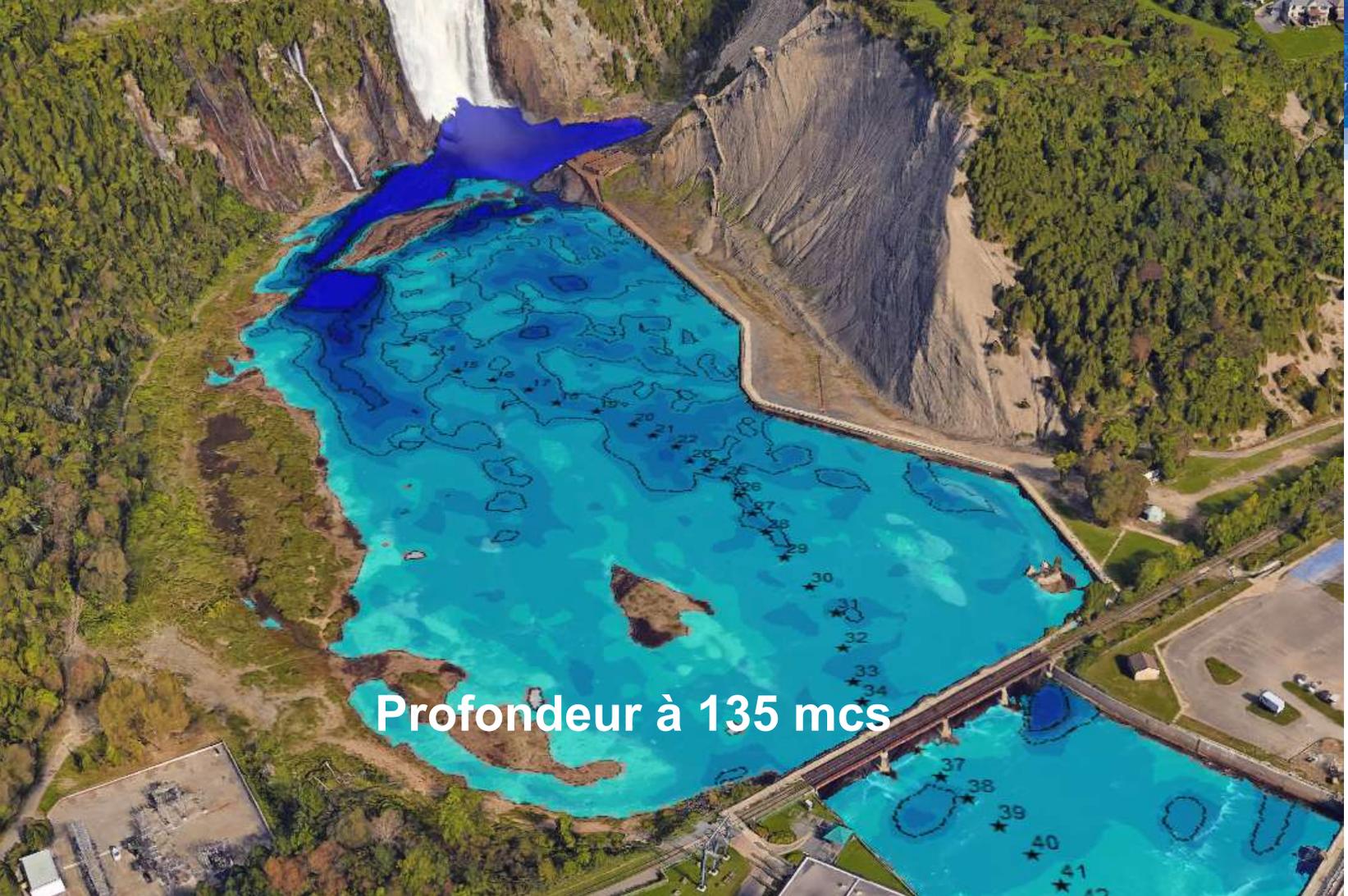
## Le modèle hydrodynamique H2D2 – ses hypothèses

- Roule sur le MNT préparé précédemment
- Un modèle 2D transitoire et/ou stationnaire
- Vitesses intégrées verticalement (moyenne)
- De type éléments finis (triangles à 6 nœuds T6L)
- Couvrant-découvrant (pour une submersion variable du lit en f(débit, marée))
- Utilise MODELEUR pour le pré- et le post-traitement
- Modules complémentaires pour l'advection-diffusion: température, sédiments, coliformes, etc..

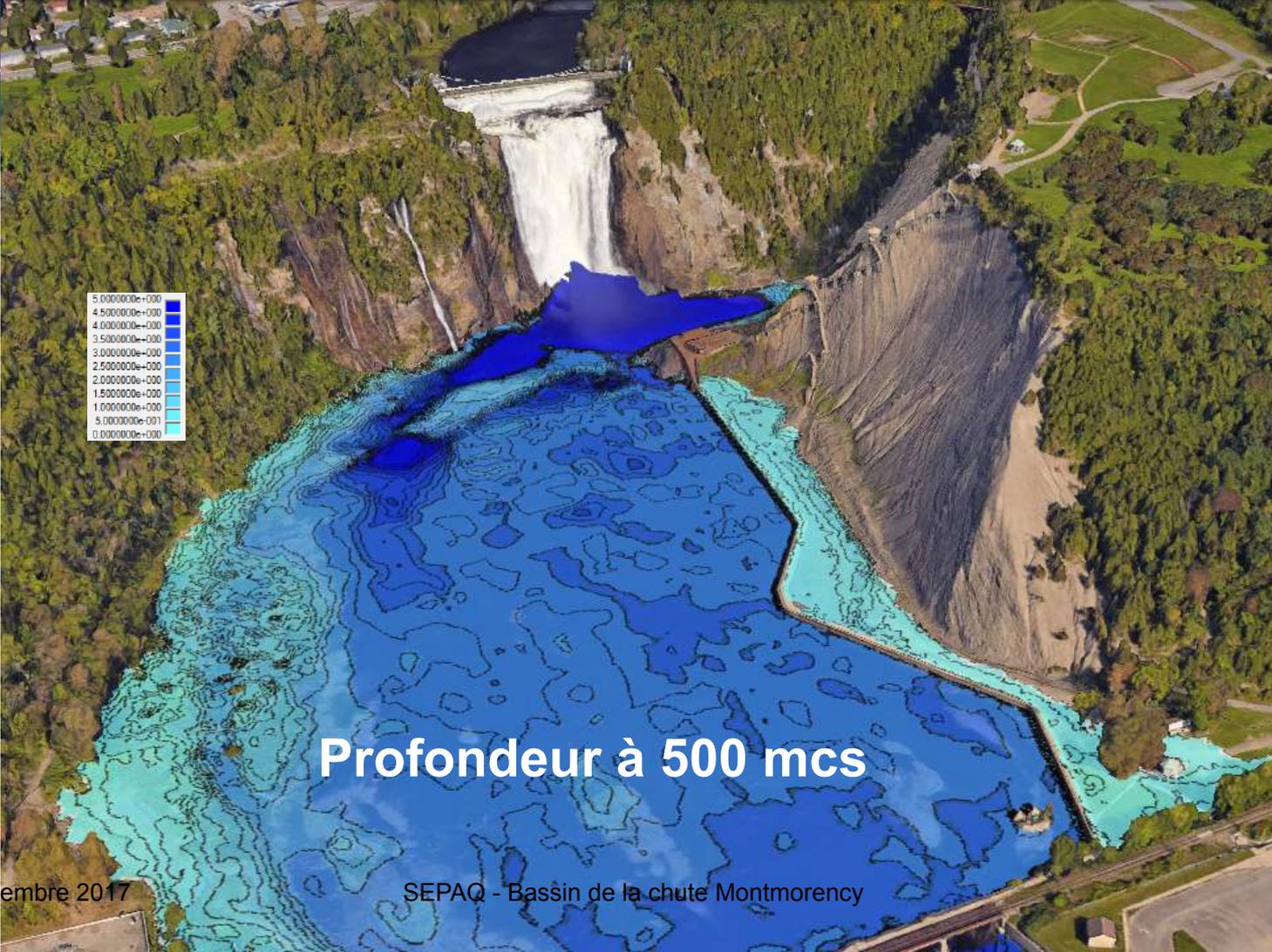
## Le modèle H2D2 de l'INRS



<http://www.gre-ehn.ete.inrs.ca/manuel-d2019utilisateur-de-h2d2>

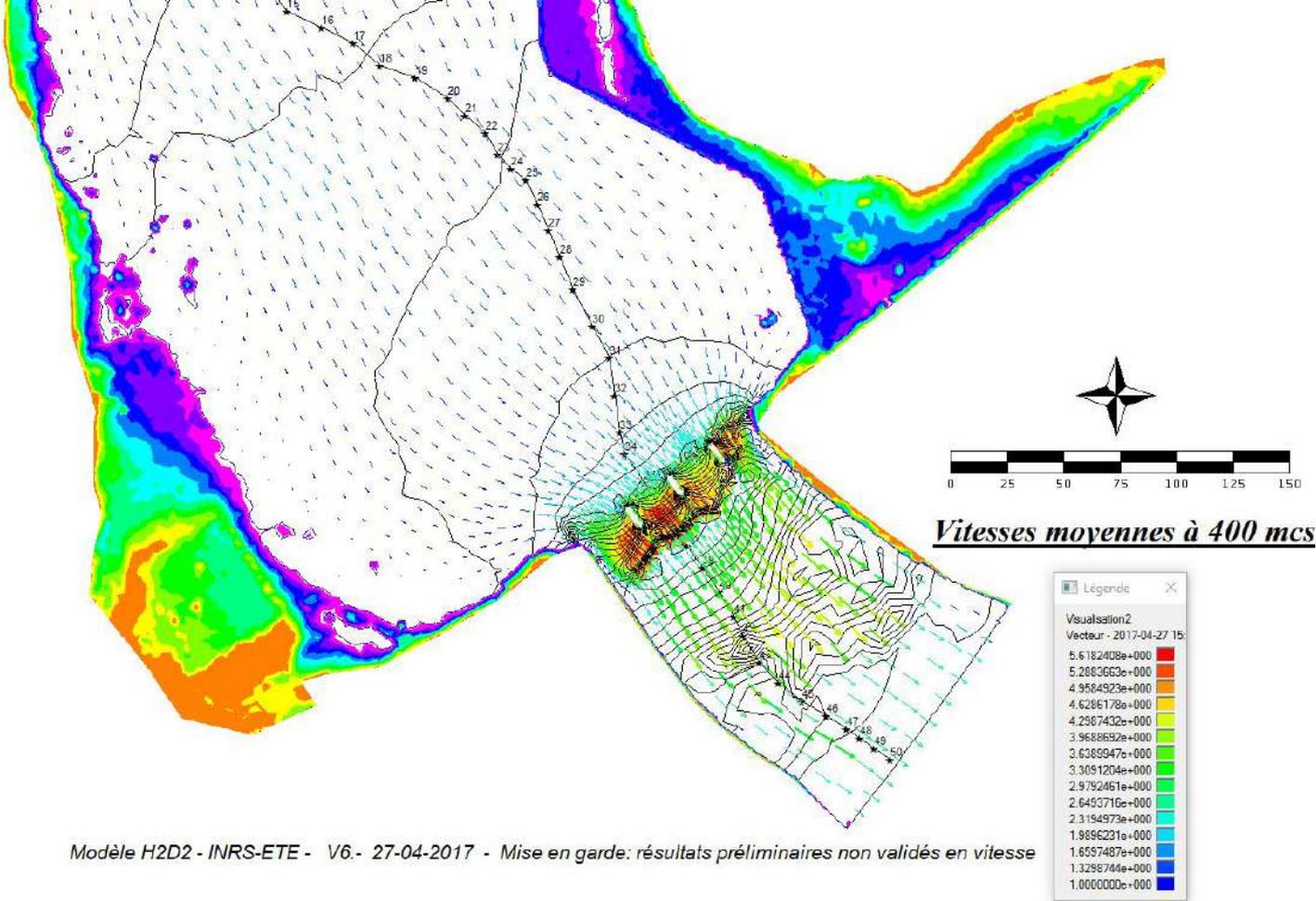


Profondeur à 135 mcs

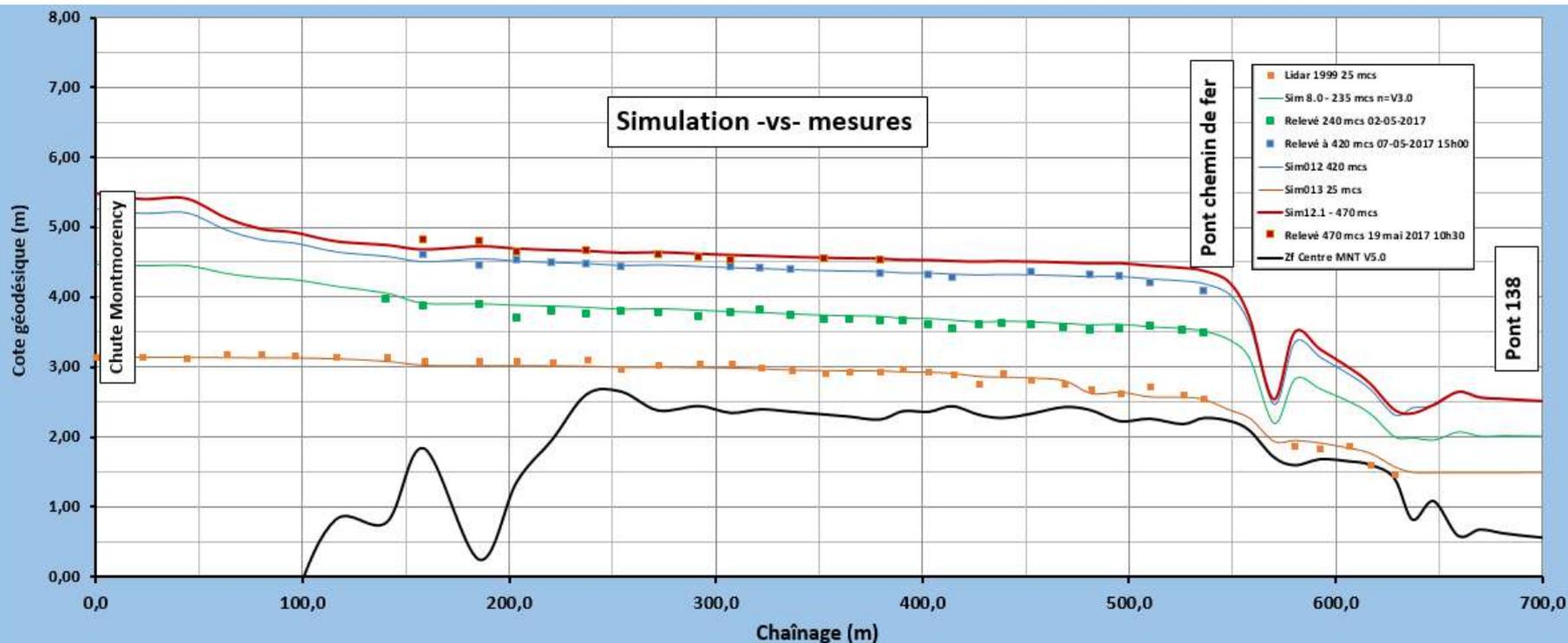


Profondeur à 500 mcs

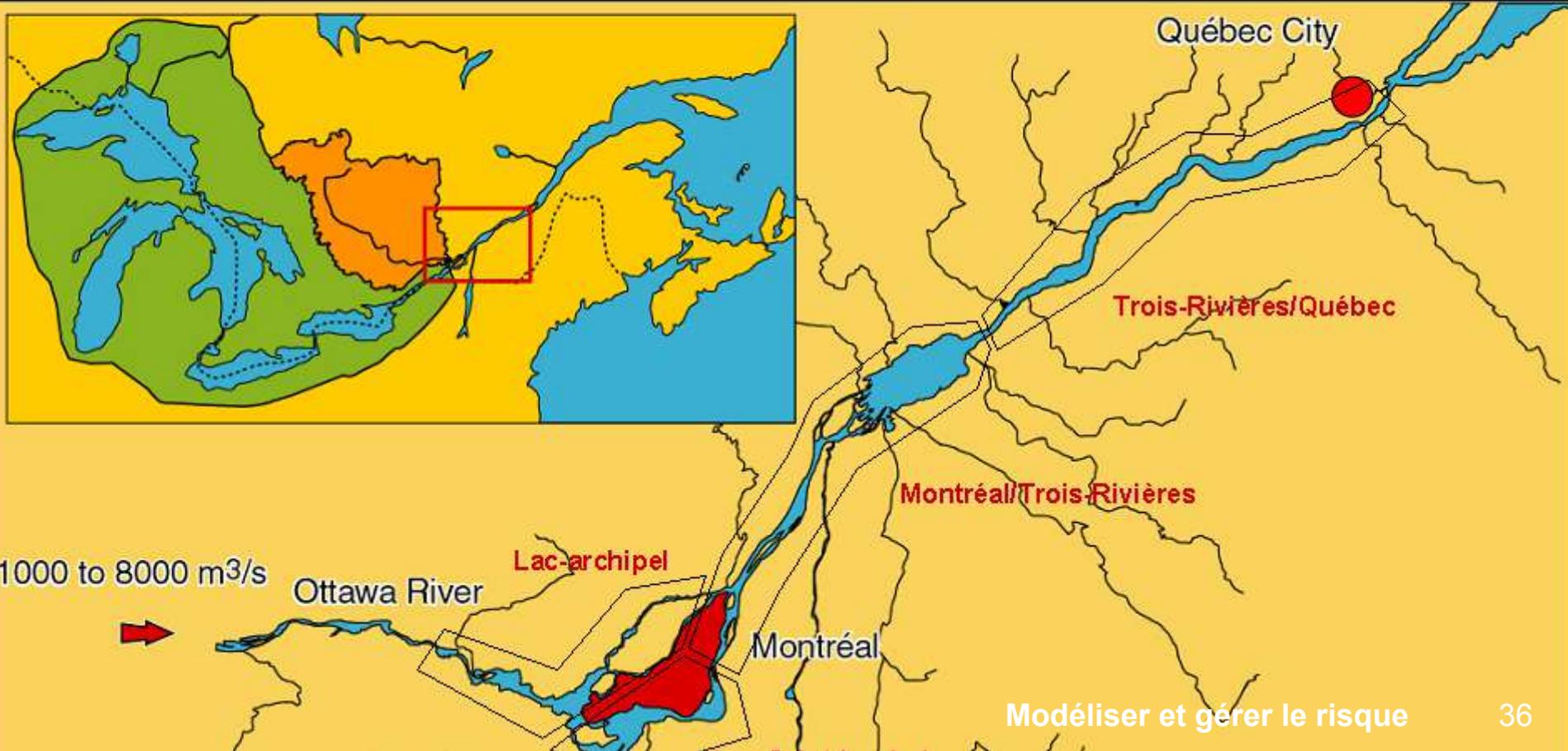
# Vitesses moyennes estimées par H2D2



# Résultats de calibration – État naturel – Le profil en long



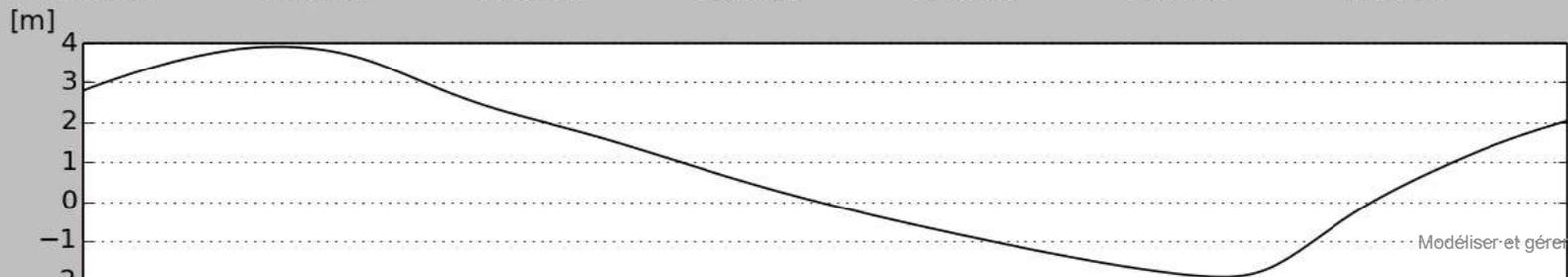
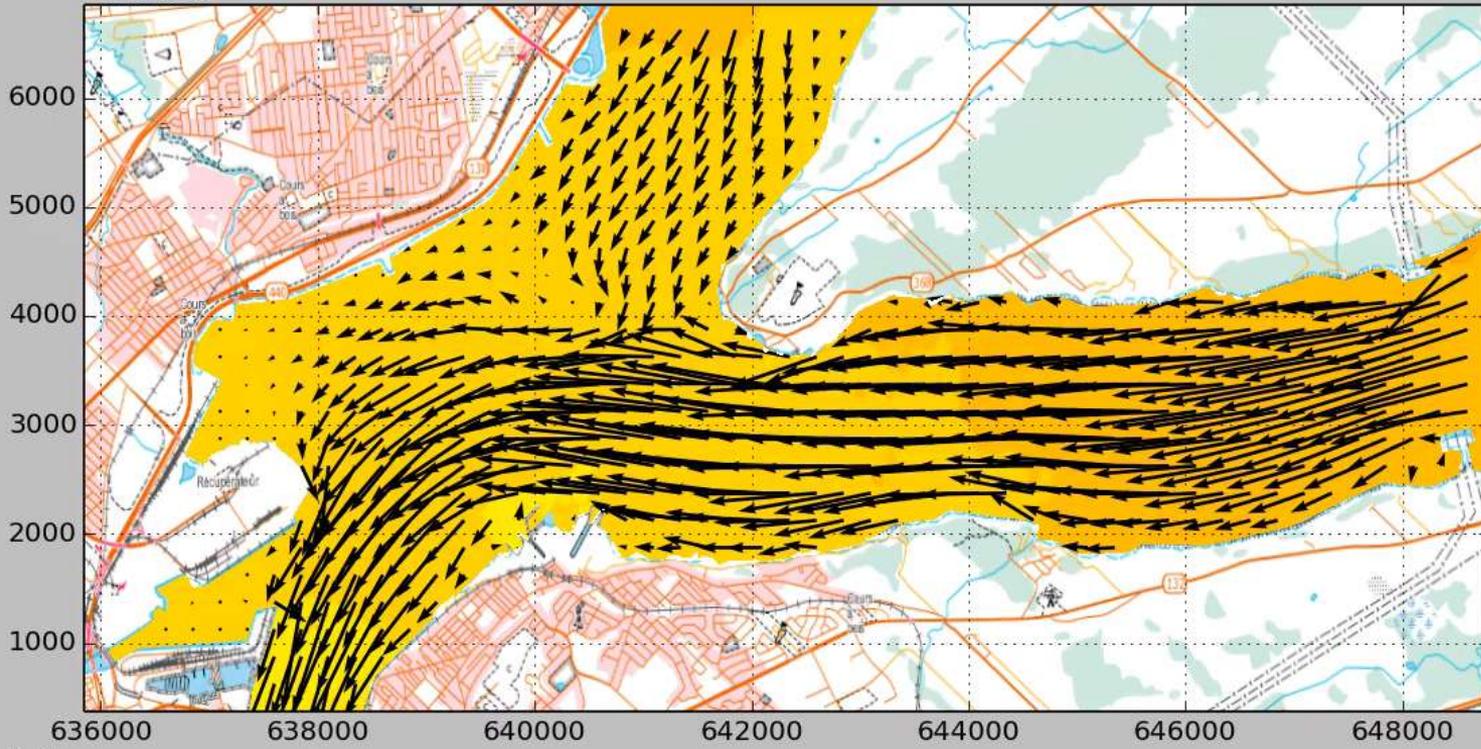
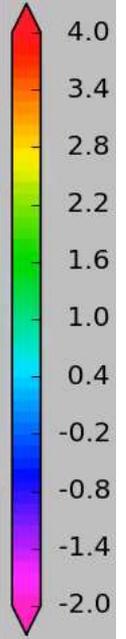
# Modèle hydrodynamique du Saint-Laurent



+5.186e6

Québec - 2009-06-24 10:05:00

$h$



# La géomatique est partout

- ❑ Alimente les modèles hydrologiques en physiographie (Échelle des bassins versants; Physitel vs Hydrotel)
- ❑ Alimente les modèles hydrodynamiques en topographie des cours d'eau (bathymétrie, LiDAR) – Les MNT internes des modèles à l'échelle détaillée du lit des cours d'eau
- ❑ Calcule les champs de submersion du terrain et/ou l'exposition des éléments vulnérables exposés (géoréférence des bâtiments, rôle d'évaluation, attributs des bâtiments)
- ❑ Permet d'effectuer des calculs de risque distribué agrégés par zones de concert entre Ouranos, la CMM, les MRC et villes

# Le concept de risque et sa gestion, une logique méconnue

*Mise à niveau*

# L'intention

**L'atténuation et la prévention des risques d'inondation forment l'intention de base de notre démarche**

**Il faut donc en connaître les ressorts pour agir**

C'est une notion économétrique qui s'exprime en valeur monétaire (monétisée)

# Le risque c'est quoi?

## Constituants du risque qu'on doit connaître ou prédire

- ◆ **Aléas d'inondation de crue ou d'embâcle**  
(nature, magnitude, durée et phasage de l'épisode, portée spatiale, fréquence, liens de causalité)
- ◆ **Vulnérabilité ou potentiel de dommages**  
associés à un aléa (**sensibilité aux dommages**)  
(humaine, matérielle, directe ou indirecte, fiscale vs rôle d'évaluation)
- ◆ **Exposition** aux aléas (submersion, durée)
- ◆ **Réponse humaine** (préparation, rétablissement) préventives ou réactives, alertes, préparation, résilience, indemnisations, rétablissement)

# Pourquoi analyser et calculer le risque

- ◆ **Connaître le coût des enjeux et la nature du problème**
- ◆ **Identifier des mesures correctrices possibles**
- ◆ **Évaluer l'opportunité des mesures de réduction des risques i.e. rapport coûts/avantages (ACA)**
- ◆ **Planifier les interventions correctrices**
- ◆ **Justifier et quantifier les investissements**
- ◆ **Informier adéquatement et objectiver le risque auprès des riverains (communications)**
- ◆ **Courant aux USA (pour les zones d'assurabilité)**

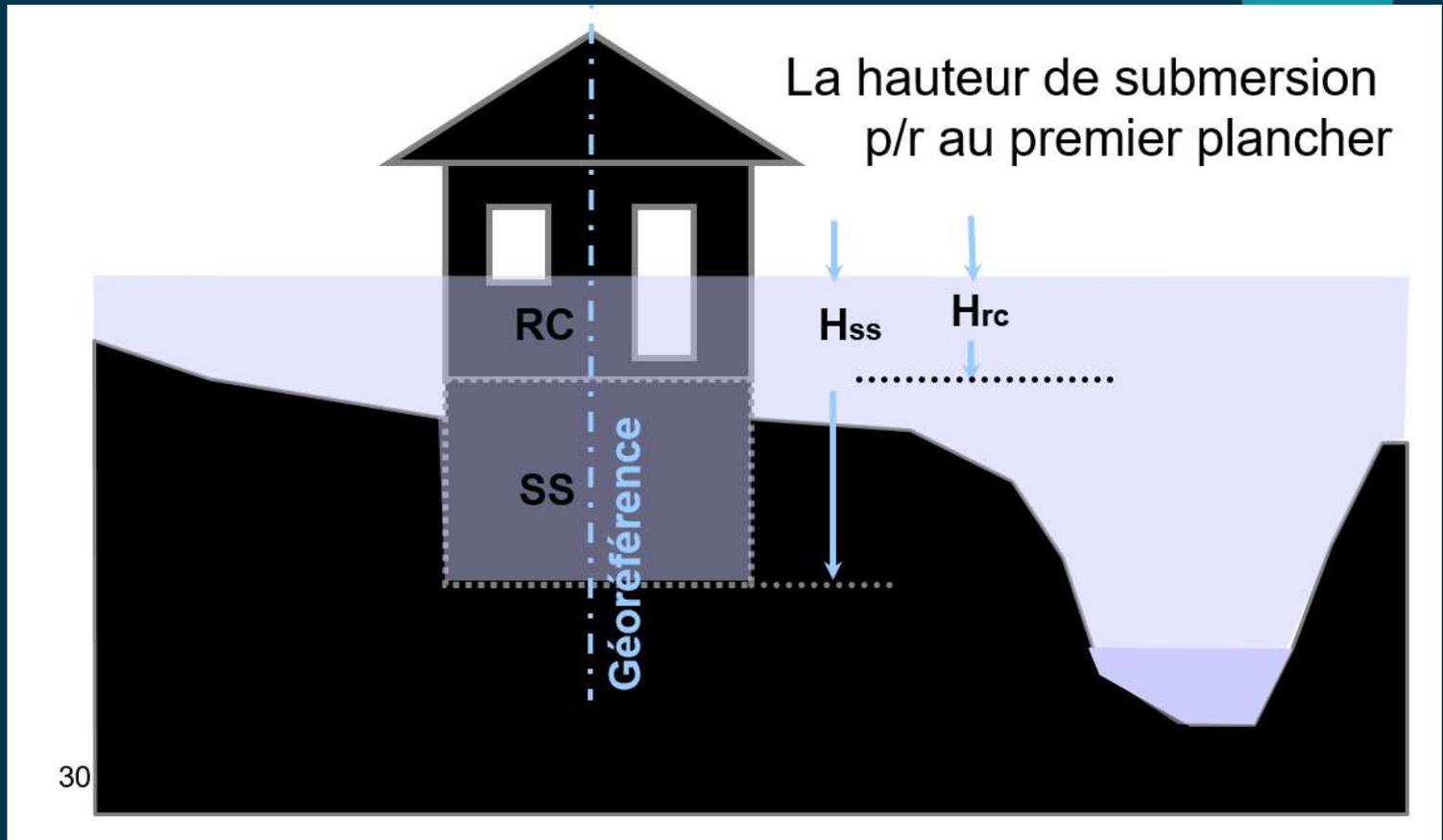
# Pourquoi analyser et calculer le risque

## Le RISQUE, ça se calcule comment?

$$R = \sum D(P) \times \Delta P$$

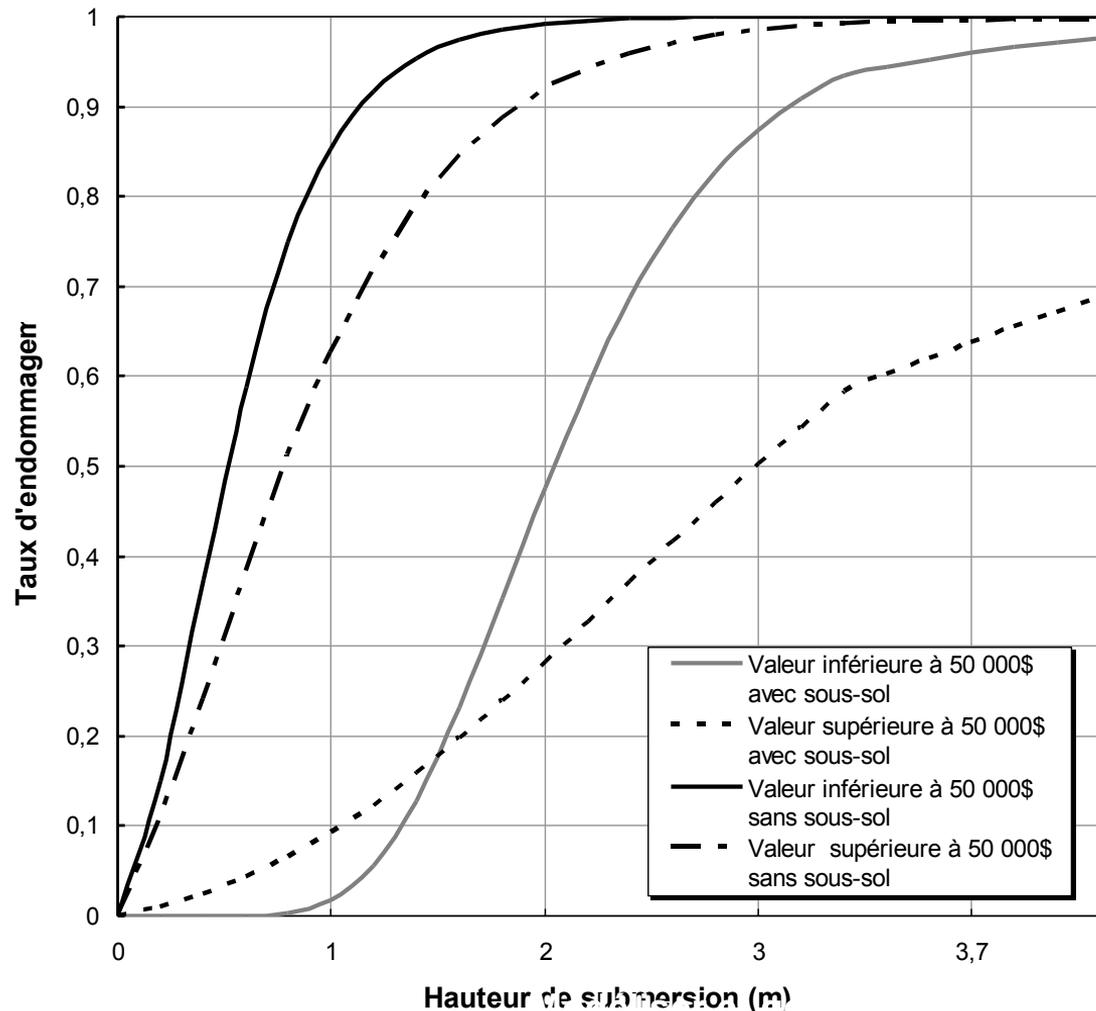
- $R$  : risque moyen annuel (en \$ si possible)
- $D(P)$  : coût des dommages ou des interventions en fonction de la probabilité annuelle  $P$  d'
- $P$  : probabilité (annuelle) au dépassement des aléas de crue
- $\Delta P$  : incrément de probabilité annuelle attribué à l'aléa
- Somme des  $\Delta P = 1$  ou 100%

# Les dommages directs et la submersion

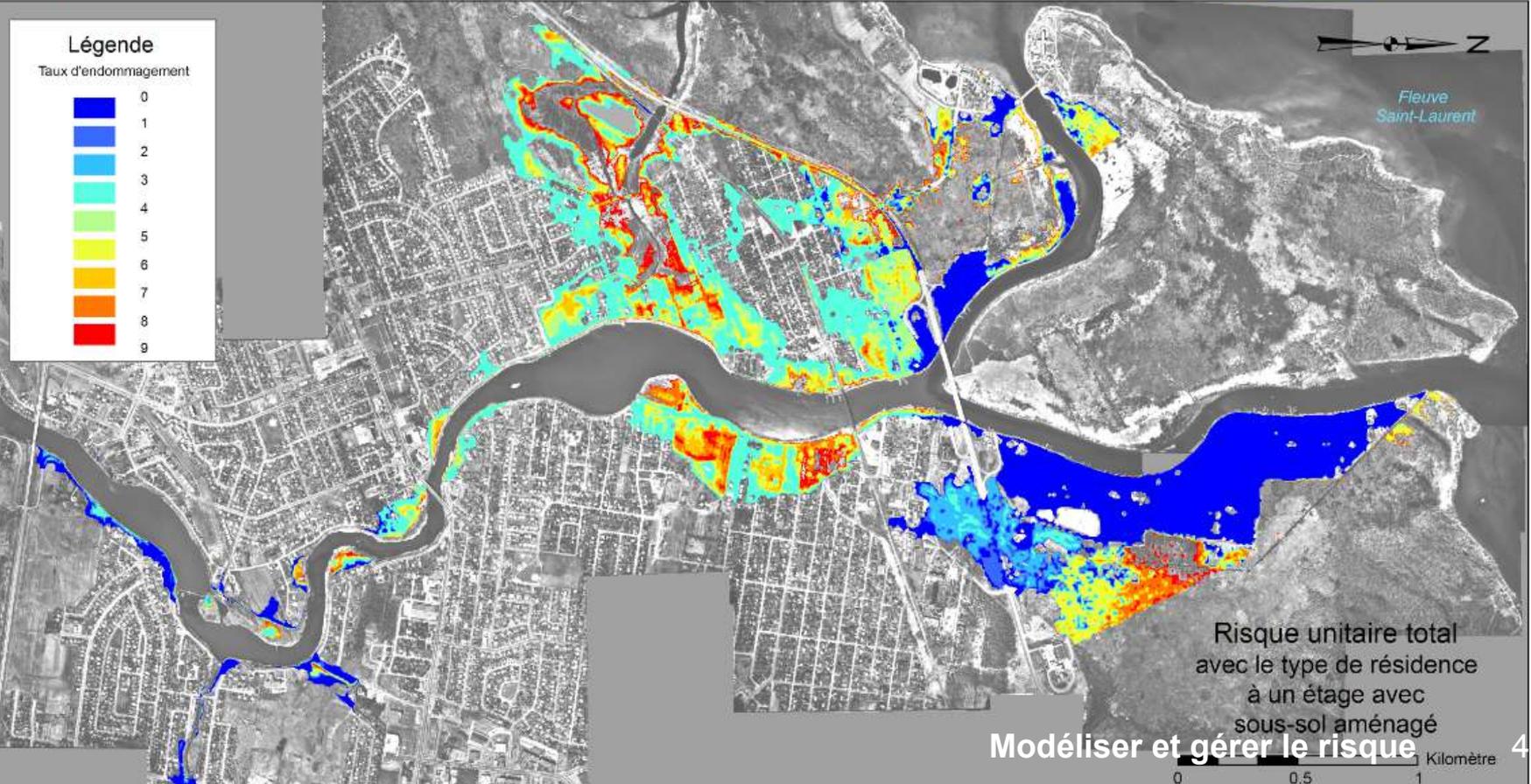


# Estimer les dommages par événement selon la submersion (1<sup>er</sup> plancher) et le type de résidence

Note: ces courbes issues de Saguenay 1996 sont actuellement revisitées par Env. Canada pour le Richelieu



# Carto du risque unitaire annuel moyen (bungalow)



# L'espace de liberté ou de mobilité

*Room for rivers* (Directive européenne)

**Une tendance mondiale : restaurer la plaine d'inondation car...**

- Elle fait occasionnellement partie du cours d'eau
- Elle est nécessaire pour transiter les crues
- Elle a une fonction écologique
- Elle se transforme (morphologie) avec l'érosion des berges (crues formatrices) – Attention aux crues géomorphiques

(Voir Beijing 2002):



# Les OBV : rôles possibles (discussion)

## ◆ Rôles statutaires

- ◆ Le **plan directeur de l'eau** (PDE) et sa **mise en œuvre**
- ◆ La **concertation** des parties prenantes (comités techniques)

## ◆ Support, accompagnement

- ◆ **Caractérisations sur le terrain pour les aléas**  
(milieux humides, délaissés de crue, fiches d'événements d'inondation)
- ◆ **Géomatique des milieux hydriques**  
(traitement de données LiDAR, Modèles numériques de terrain de simulateurs hydrologiques ou hydrodynamiques)

## ◆ La clé du succès: l'**autonomisation** des OBV par **la formation**



PLANIFIER  
CONCERTE  
AGIR  
mrcvs.ca



Références disponibles sous  
[http://espace.inrs.ca/Michel Leclerc/](http://espace.inrs.ca/Michel%20Leclerc/)