

24^e RDV des OBV

Formation ACA - Modélisation de l'Aléa

Différentes approches pour différentes applications

Jérémie Roques, Mc. Hydrogéologie et environnement
Coordonnateur du service aux membres et services externes

17 juin 2021



Table des matières

1

Théorie et outils existants

Climatique
Hydrologique
Hydraulique
Géomorphologique

2

Données et méthodologie

Climatique
Hydrologique
Hydraulique
Géomorphologique

3

Résultats et analyses

Hydrologique
Hydraulique
Géomorphologique

4

Conclusion; cibles et choix des outils

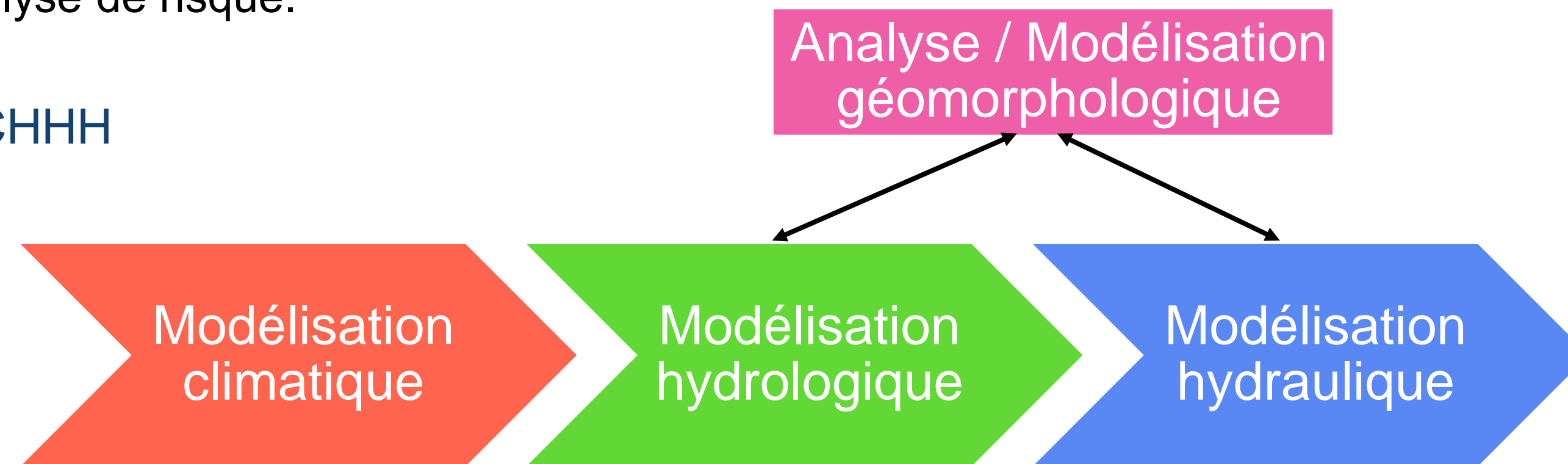


Théorie et outils existants – Modélisation des aléas naturels

Théorie

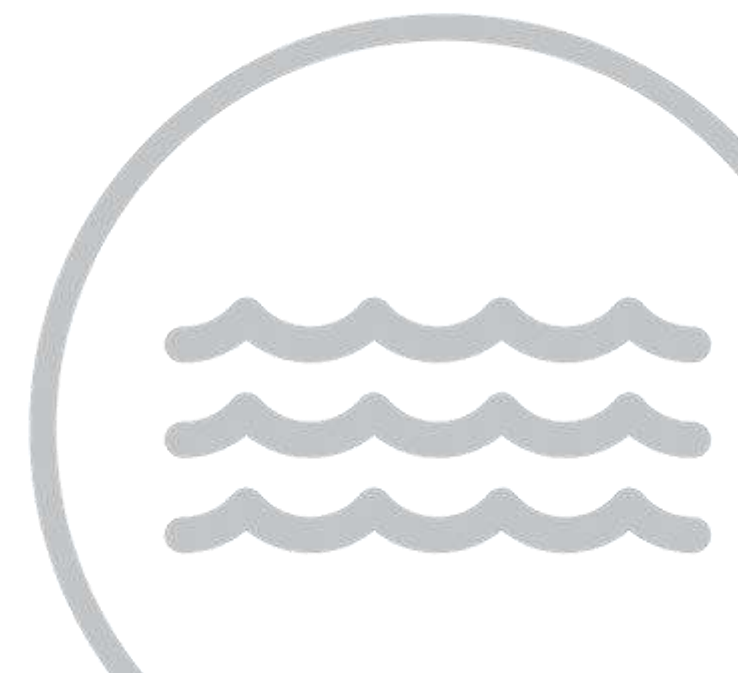
- vise à reproduire le plus fidèlement possible les processus et la réponse des hydrosystèmes en condition actuelle (calibration rétrospective)
- Permet de projeter, pour différents scénarios (climatiques; adaptations, ...), la réponse des hydrosystèmes à la variation de différents paramètres (simulation prospective).
- Pierre angulaire de l'analyse de risque.

Chaîne de modélisation CHHH



Outil

- Rarement des outils intégrés contenant l'ensemble de ces composantes
- Peut nécessiter l'arrimage de plusieurs outils ou méthodes d'analyse, fréquentielle, ou non probabilistes.



Théorie et outils existants – Modélisation climatique

Théorie

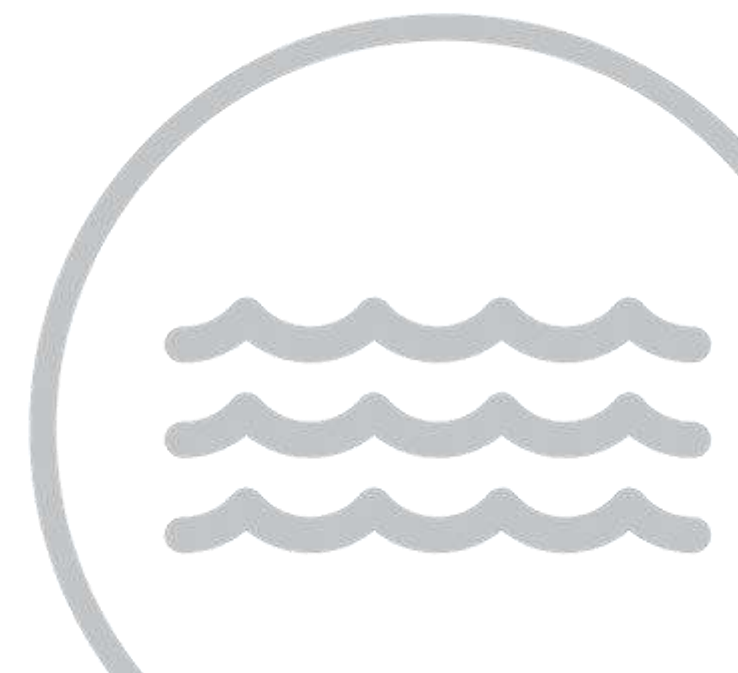
Vise à produire l'information sur la pluviométrie et les températures pour différents horizons de temps en simulant les processus en œuvre dans l'atmosphère : convection thermique, direction et intensité des vents, condensation et point de rosée, etc.

Projection influencées par :

- Le modèle de circulation globale (MCG – GIEC ; Hayhoe et al.,2017) définissant les conditions aux limites (petite échelle) ;
- Le modèle de climat régional fournissant les données ajustées à large échelle ; et
- Le scénario RCP (Representative Concentration Pathway) considéré.

Sources

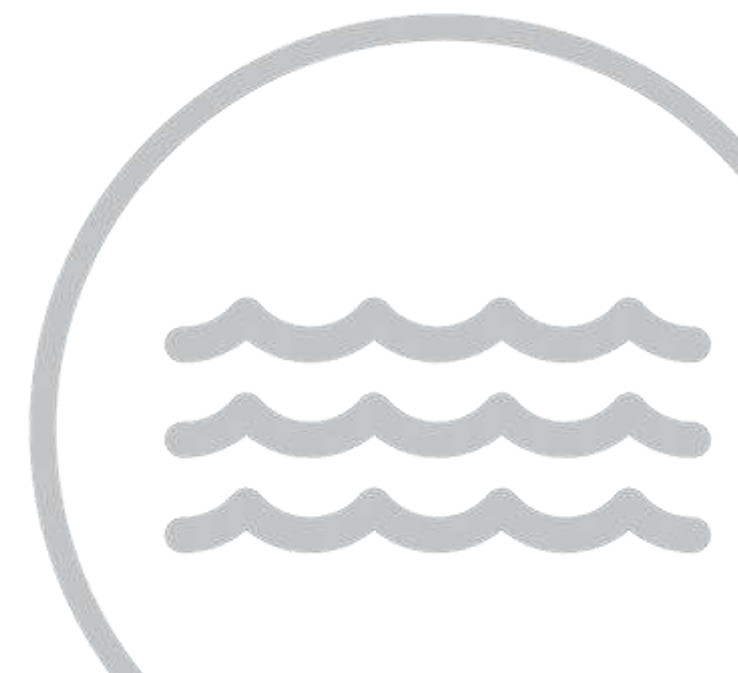
- [le site CORDEX](#) du programme de recherche sur le climat mondial (MCR Qc CORDEX-NA)
- [le site du portrait climatique du Québec](#) d'Ouranos.



Théorie et outils existants – Modélisation hydrologique

Théorie

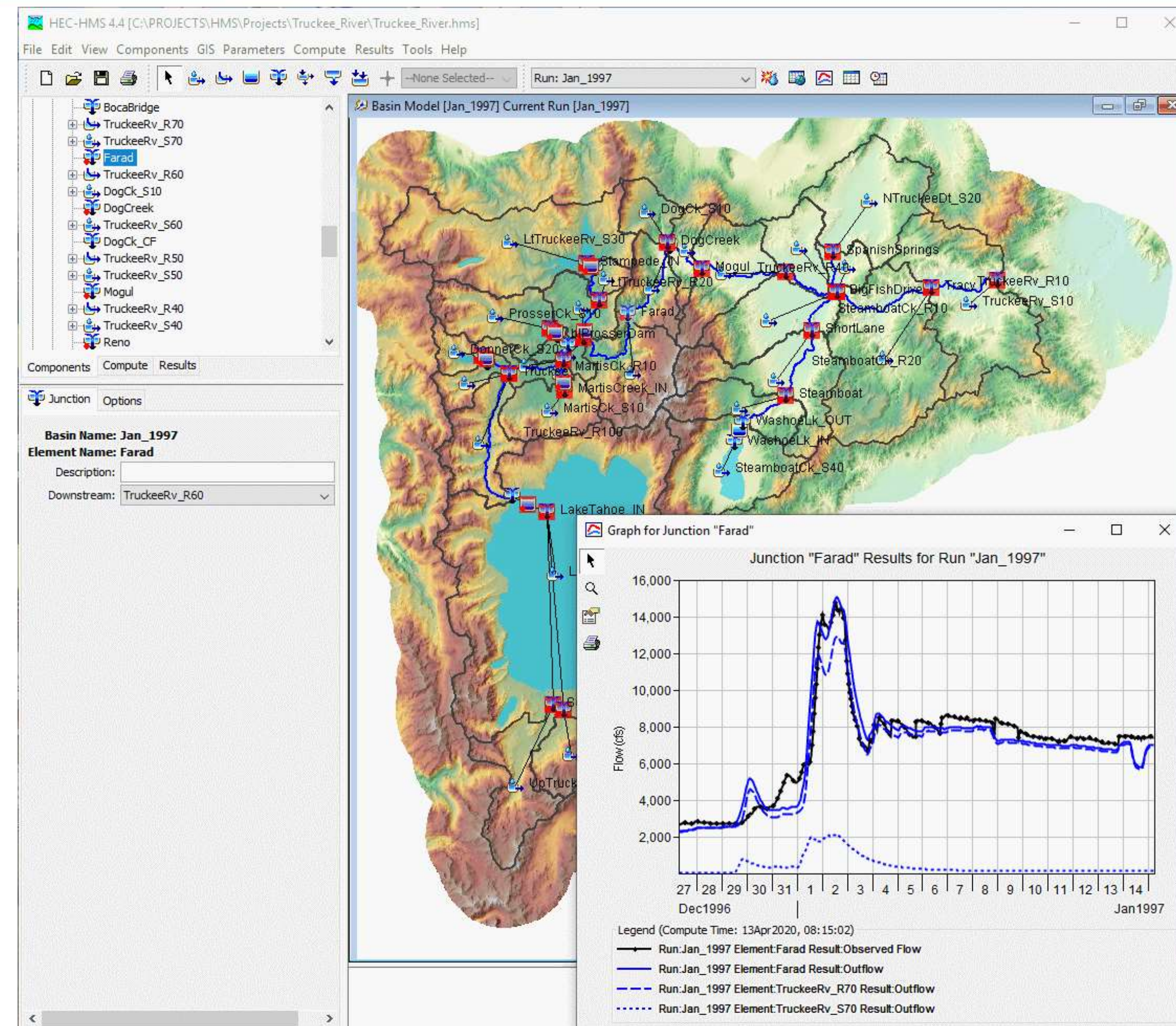
- La modélisation hydrologique permet de convertir l'information climatique en valeur de débit instantané mesurable en tout point du bassin versant.
 - Résolution des équations du bilan hydrologique : Réponse des bassins versants en répartissant dans le temps et dans l'espace les transferts entre les différents réservoirs (ruissellement, infiltration, recharge, évaporation, etc.) ayant cours sur le bassin versant.
 - Fait appel à une fonction de production ainsi qu'une fonction de transfert. Ces fonctions seront influencées par le territoire physique (topographie, sol, usages, ...).
 - Permet l'analyse fréquentielle des débits afin d'effectuer une étude de répartition des probabilités de dépassement annuelles.
- Peut être empiriques ou à base physique (déterministe); distribués, semi-distribué ou agrégé.



Théorie et outils existants – Modélisation hydrologique

Outils

- ✓ [L'Atlas hydroclimatique du Québec méridional.](#)
- ✓ **Modèle déterministe et fréquentiel:**
 - [SWAT](#); USDA Agricultural Research Service
 - [HEC HMS](#) U.S. Army Corps of Engineers.
 - [Hydrotel](#) qui est utilisé par le MELCC
- Modules complémentaires (MH, réservoirs, eaux souterraines, échanges, sédiments, etc.) visant à reproduire de manière plus précise et détaillée les processus de production ou de transfert.

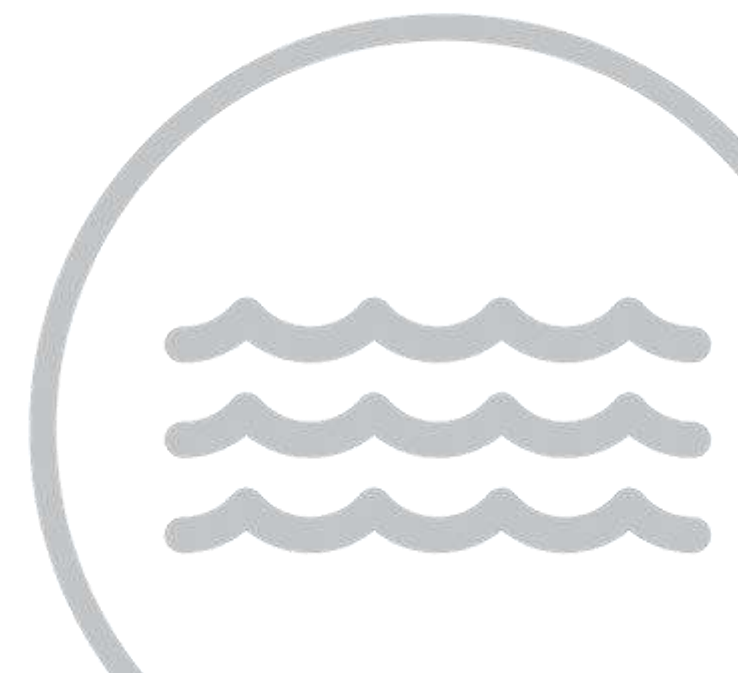


Interfaces du Hydrologic Modeling System HEC-HMS (User's Manual – 2018)

Théorie et outils existants – Modélisation hydraulique

Théorie

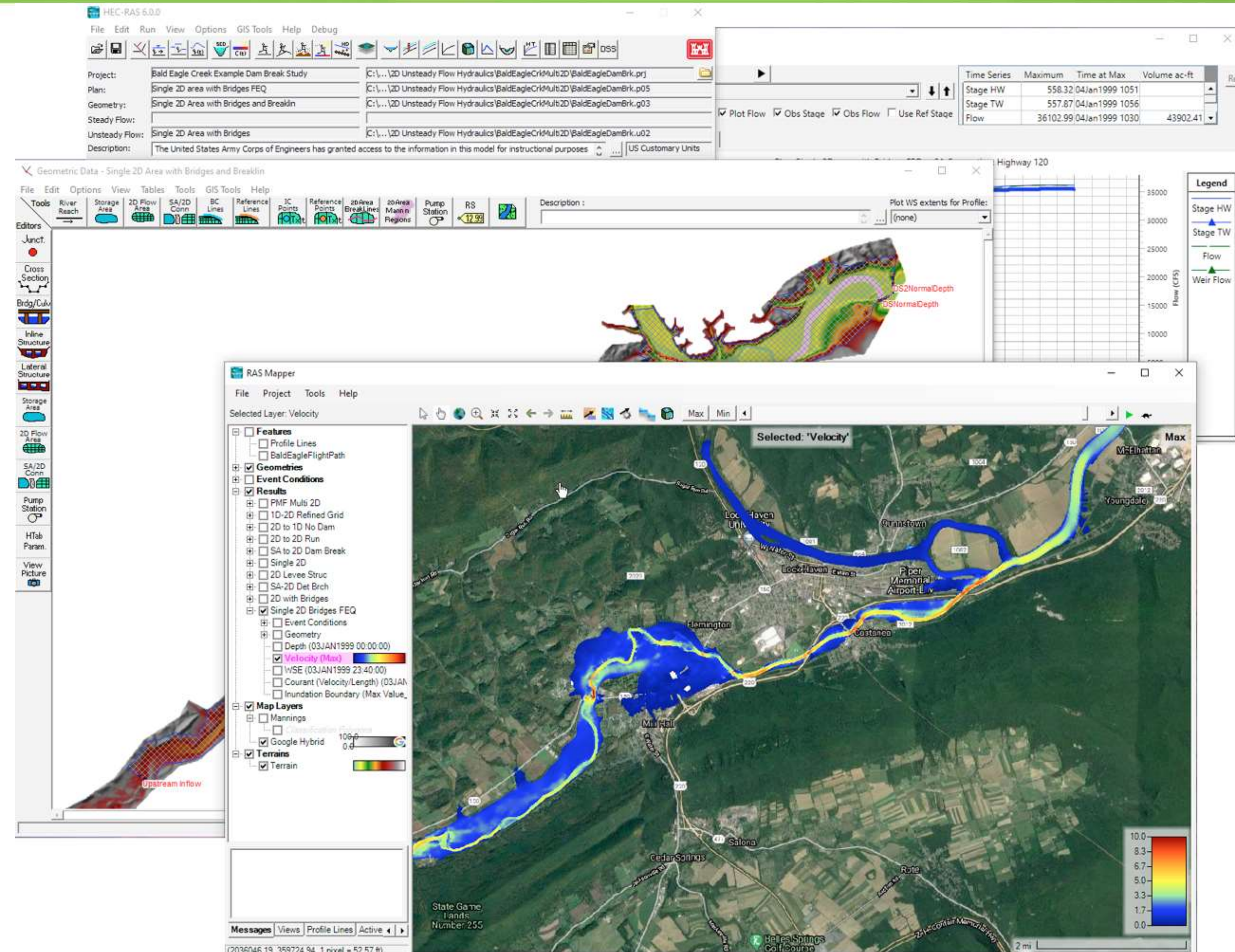
- La modélisation hydraulique est une représentation mathématique de la vitesse et des directions d'écoulement de l'eau au sein du chenal d'écoulement.
- Convertir les informations sur les débits et la géométrie du chenal (mesuré ou estimé) en hauteur d'eau. $Q=V*S$
- Résolution d'équations dérivées de celles de Saint Venant, conservation de la masse ou encore de la quantité de mouvement.
- Équations résolues dans différents espaces (1D - parallèle à l'écoulement, dans le chenal; 2D - perpendiculaire à l'écoulement, dans la plaine inondables).
- Généralement, résolution en régime permanent puis transitoire (= calibration événementielle) puis simulation prospective.



Théorie et outils existants – Modélisation hydraulique

Outils

- ✓ **Modélisation hydraulique; 1D/2D.**
 - Le River Analysis System ([HEC-RAS](#) - Hydrologic Engineering Center's)
 - [H2D2](#) (INRS)

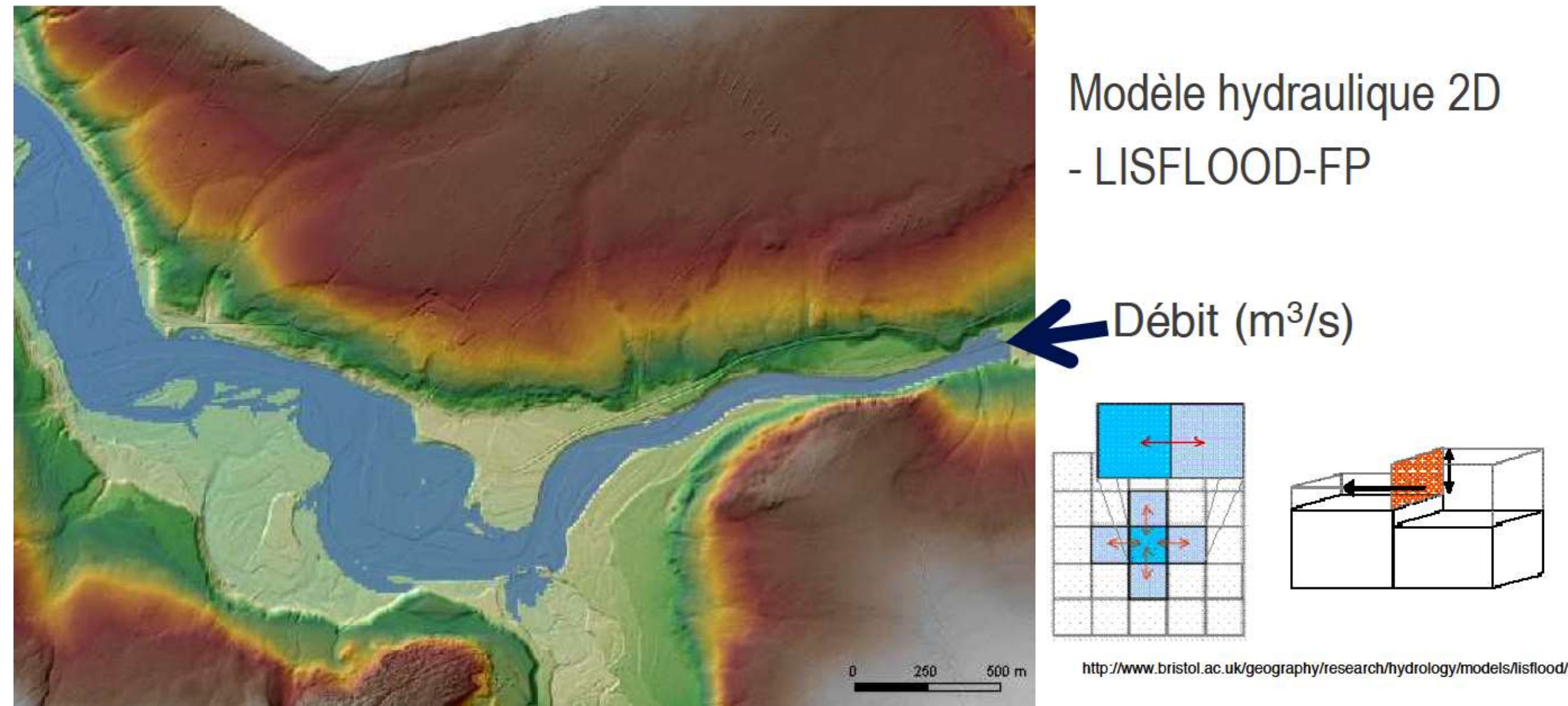


Interfaces du HEC-RAS, River Analysis System (User's Manual – 2021)

Théorie et outils existants – Modélisation hydraulique

Outils

- ✓ **Modélisation hydraulique; 1D/2D.**
 - Le River Analysis System ([HEC-RAS](#) - Hydrologic Engineering Center's)
 - [H2D2](#) (INRS)
- ❖ **Modélisation large échelle; hydraulique inverse (voir Choné et al., 2020).**
 - Basée sur l'utilisation combinée d'outils SIG de traitement matriciel (lidar) et du modèle hydraulique [Lisflood](#) (Bates et De Roo, 2000)

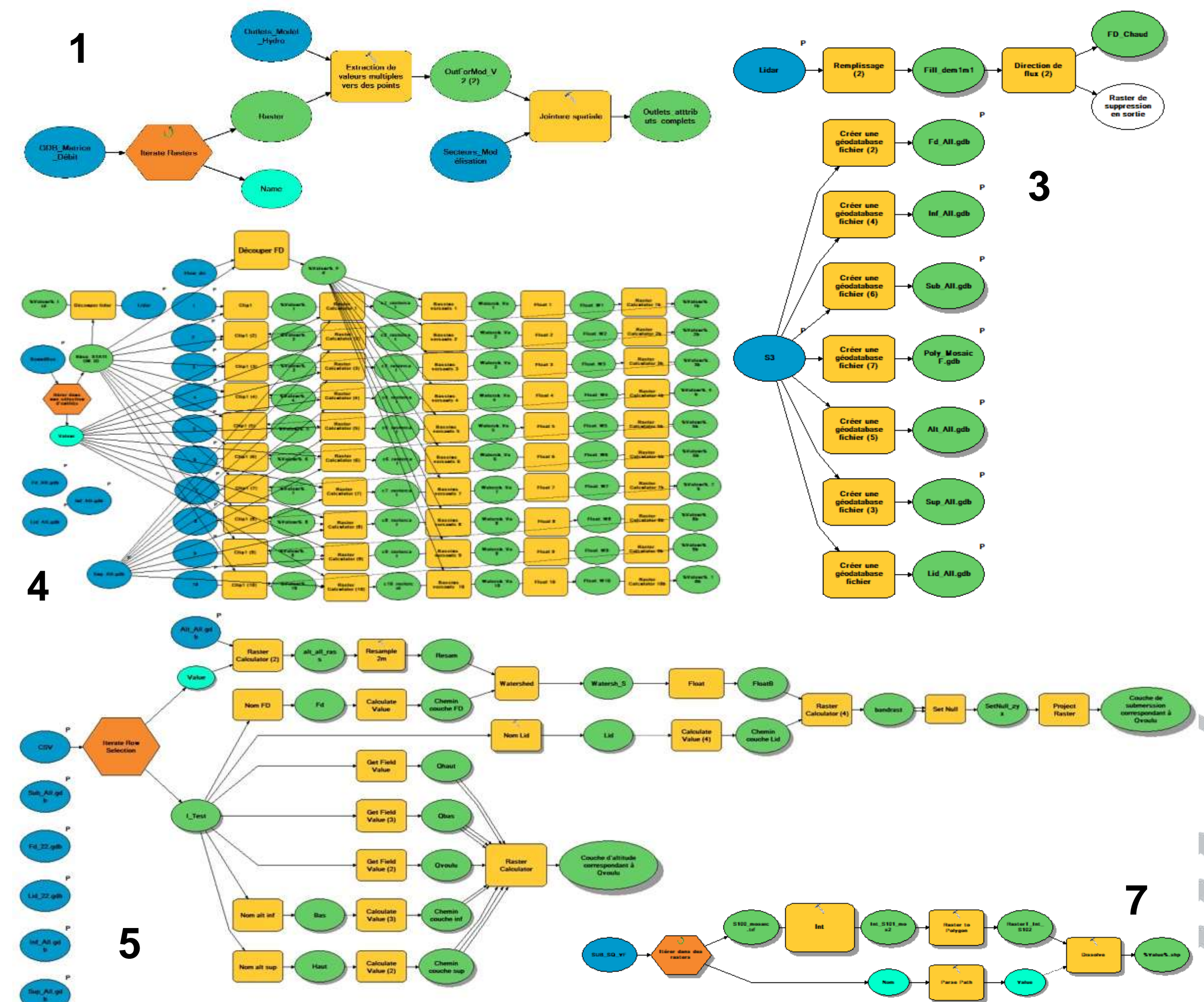


Extrait de présentation « Développement d'outils pour la cartographie territoriale des zones inondables (Colloque su la sécurité civile 2018)

Théorie et outils existants – Modélisation hydraulique

Outils

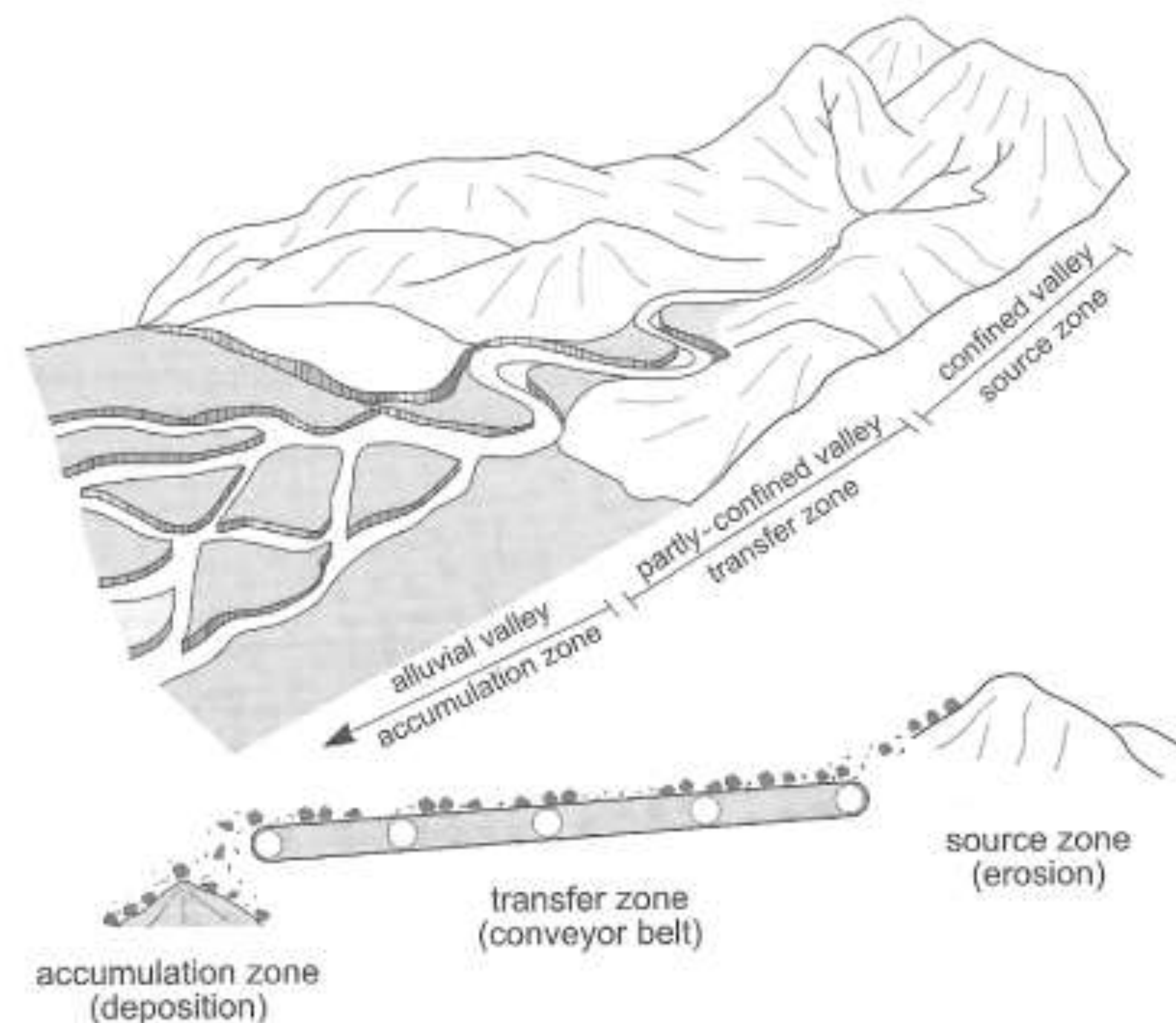
- ✓ **Modélisation hydraulique; 1D/2D.**
 - Le River Analysis System ([HEC-RAS](#) - Hydrologic Engineering Center's)
 - [H2D2](#) (INRS)
- ❖ **Modélisation large échelle; hydraulique inverse (voir Choné et al., 2020).**
 - Basée sur l'utilisation combinée d'outils SIG de traitement matriciel (lidar) et du modèle hydraulique Lisflood (Bates et De Roo, 2000)
- ✓ **Modélisation géostatistique dérivée des approches standards (Boyer-Villemaire et col. 2021)**
 - Basé sur l'utilisation combinée du ModelBuilder d'ArcGis et de scripts python.



Théorie et outils existants – Modélisation géomorphologique

Théorie

- Vise à reproduire les processus associés à la mobilité du cours d'eau : érosion, transfert, sédimentation; aggradation sur les gradients longitudinaux et transversaux.
- Processus dynamique et continu influencé par les variations de débit d'écoulement (débit morphogène); la morphologie de la section d'écoulement, la nature du substrat et des berges, l'occupation des sols, ...
- Érosion des berges, érosion des versants.

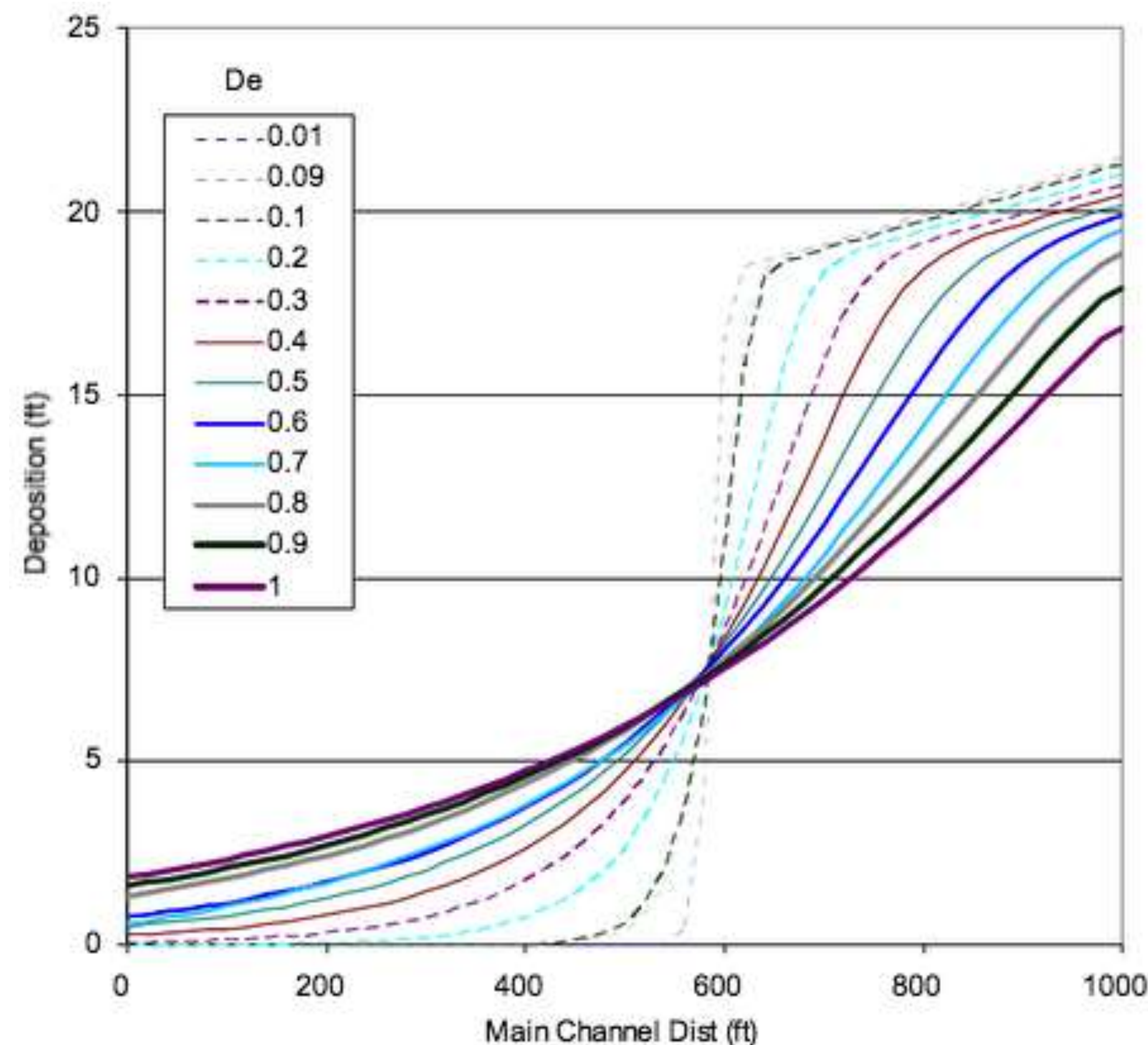


Zone source, zone de transport et zone de dépôt des sédiments à l'échelle du bassin versant. (Brierley et Fryirs, 2005).

Théorie et outils existants – Modélisation géomorphologique

Outils

- ✓ **Modélisation des flux solides associés à une modélisation hydrologique et/ou hydraulique**
- Couplé aux modèles hydrologiques et/ou hydrauliques, certains modules permettent de quantifier la fréquence, l'intensité et la magnitude de dépassement des seuils critiques d'érosion et des débits morphogènes et de localiser les zones d'érosion ou de sédimentation.



Profile d'épaisseur du dépôt sédimentaire le long du chenal principal – HEC-RAS (Gibson et al. 2011)

Théorie et outils existants – Modélisation géomorphologique

Outils

✓ **Modélisation des flux solides associés à une modélisation hydrologique et/ou hydraulique**

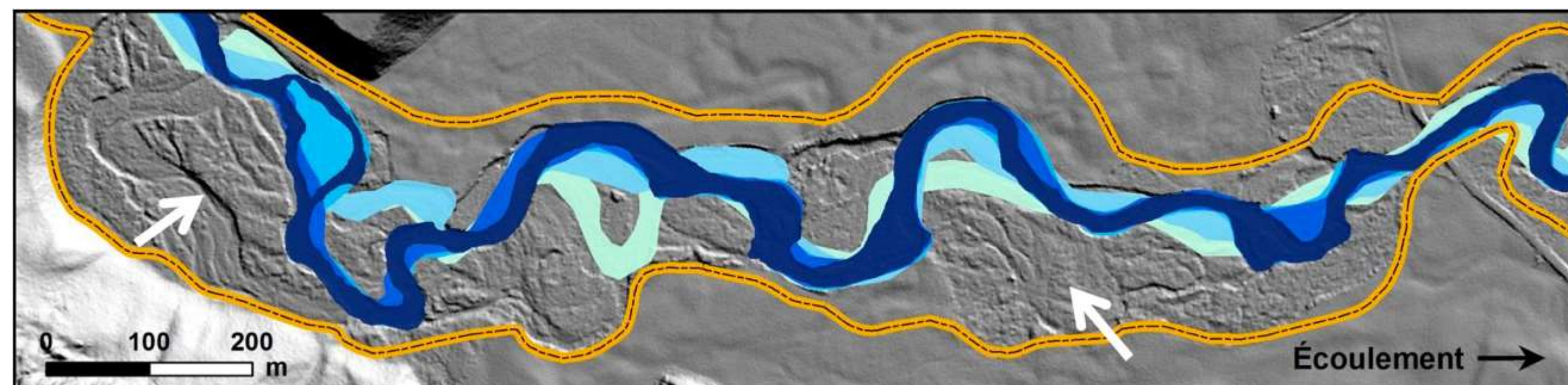
- Couplé aux modèles hydrologiques et/ou hydrauliques, certains modules permettent de quantifier la fréquence, l'intensité et la magnitude de dépassement des seuils critiques d'érosion et des débits morphogènes et de localiser les zones d'érosion ou de sédimentation.

❖ **Cartographie de l'espace de mobilité du cours d'eau et suivi du taux d'érosion**

- Méthode basée sur l'analyse hydrogéomorphologique par une étude rétrospective des images historique (cartographie multidate) et des données de terrain à haute résolution (transects de la bathymétrie, dépôts de surface, Lidar).
- Anticipation du comportement des segments homogènes de rivières (Demers et al., 2017).
- Projection de l'érosion à l'aide d'un taux annuel moyen de déplacement (Circé et al. 2016c; pour le domaine maritime).

✓ **Analyse indirecte non probabiliste**

- Cartographie de l'enrochement actuel des berges pour cibler les zones où l'érosion est dommageable et entraîne une intervention.
- Projection des efforts en connaissance du territoire. Identification et évaluation statique.
- Analyse non probabiliste pouvant être appliquée à d'autres aléas.



Espace de mobilité M50 pour le tronçon de la rivière Neigette. Les flèches indiquent des modèles d'érosion caractéristique des tronçons dynamiques qui sont intégrés dans l'espace M50. (Demers et col. 2017)

Table des matières

1

Théorie et outils existants

Climatique
Hydrologique
Hydraulique
Géomorphologique

2

Données et méthodologie

Climatique
Hydrologique
Hydraulique
Géomorphologique

3

Résultats et analyses

Hydrologique
Hydraulique
Géomorphologique

4

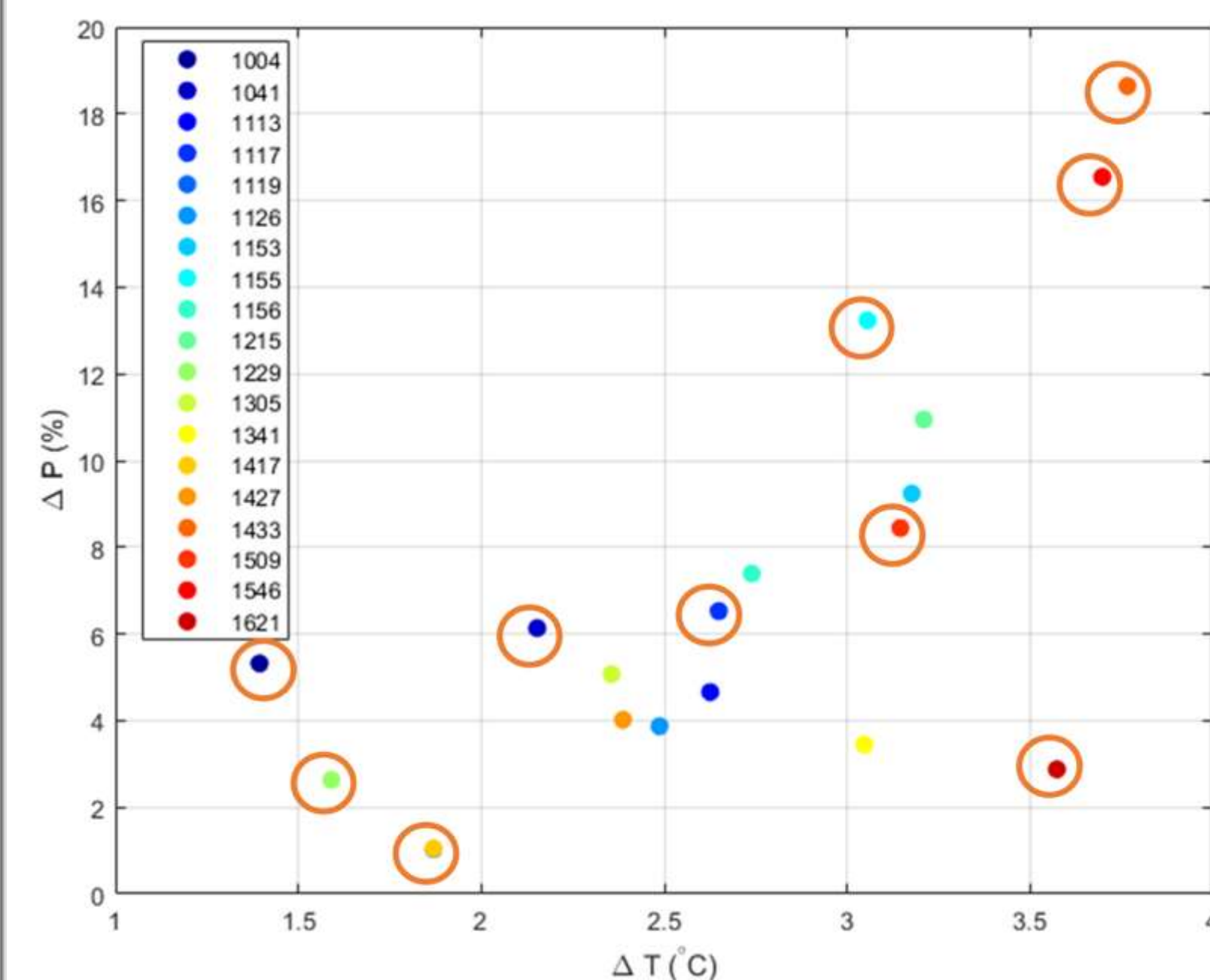
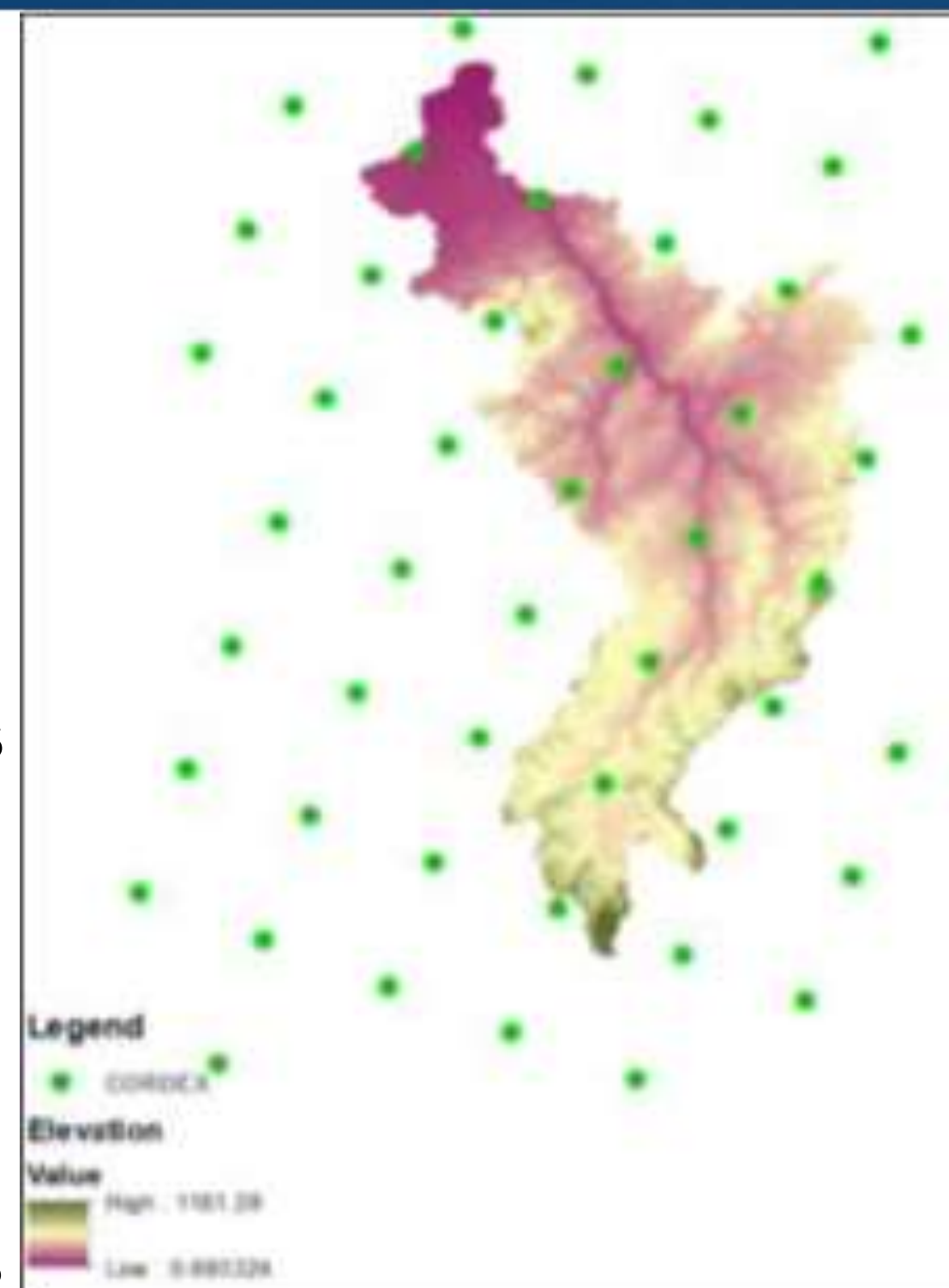
Conclusion; cibles et choix des outils



Données et méthodologies – Modélisation climatique

Méthodologie

1. Identification de l'étendue du site d'analyse;
2. Identification des besoins en couverture temporelle (Horizons). Ces horizons seront comparés à un horizon de référence;
3. Choix des valeurs des scénarios radiatifs couverts (RCP - optimiste, conservateur et/ou pessimiste pour analyse de sensibilité);
4. Extraction des informations ponctuelles ou matricielles;
5. Identification de la chaîne de modélisation envisagée (optimisation échantillon/effort et temps de traitement);
6. Prétraitement pour importation géomatique dans les modèles hydrologiques.



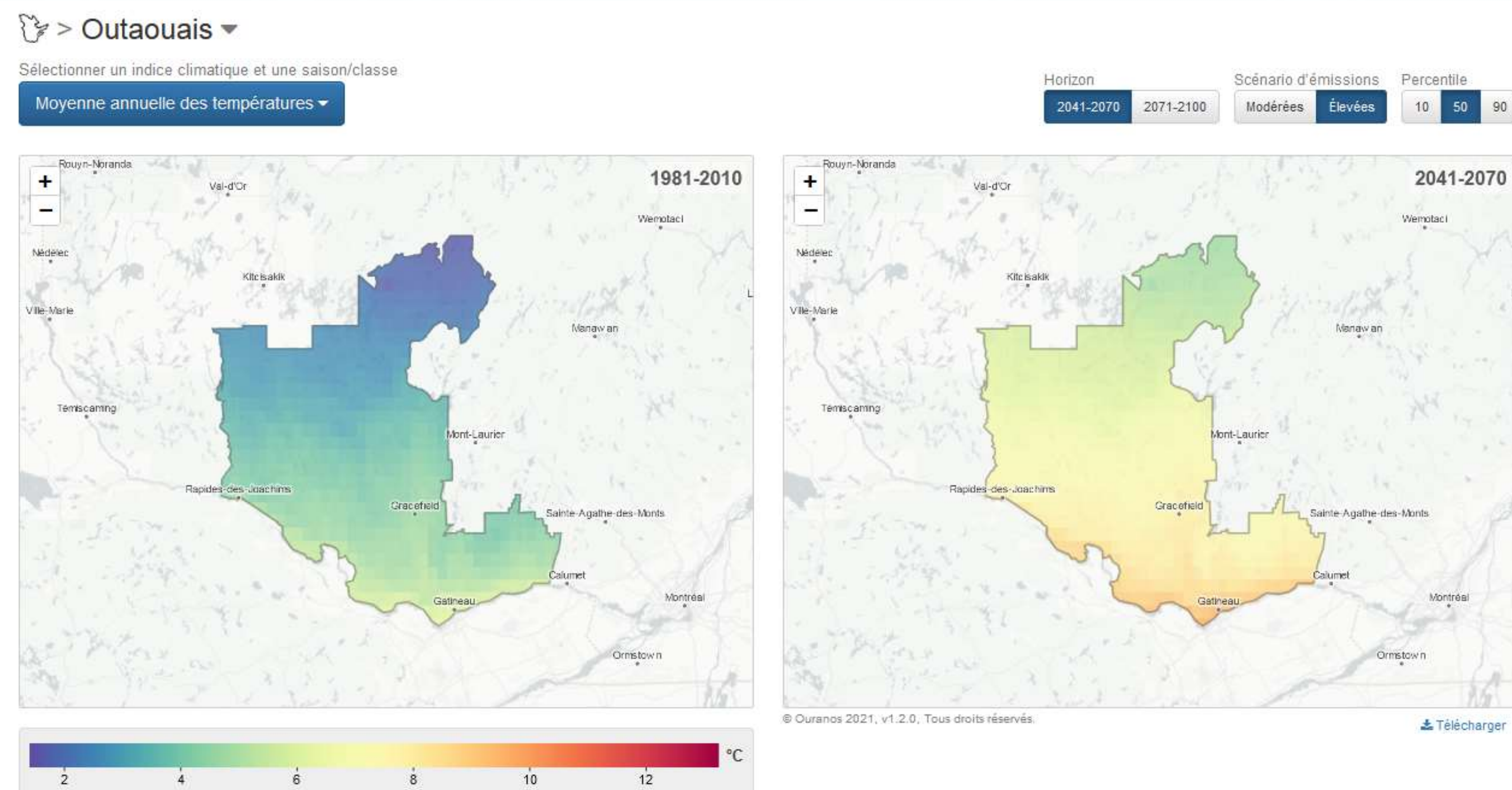
Localisation des point prédictifs (CORDEX) et étendue des variations paramétriques couvertes par les différentes simulations pour selection. (Leconte et Bizhanimanzar, 2020)

- *La représentation statistique du nombre d'échantillons issus de ces scénarios peut nécessiter l'extraction de plusieurs résultats pour un même RCP (représentativité pour le calculs des percentiles pour différents horizons)*

Données et méthodologies – Modélisation climatique

Méthodologie

1. Identification de l'étendue du site d'analyse;
2. Identification des besoins en couverture temporelle (Horizons). Ces horizons seront comparés à un horizon de référence;
3. Choix des valeurs des scénarios radiatifs couverts (RCP - optimiste, conservateur et/ou pessimiste pour analyse de sensibilité);
4. Extraction des informations ponctuelles ou matricielles;
5. Identification de la chaîne de modélisation envisagée (optimisation échantillon/effort et temps de traitement);
6. Prétraitement pour importation géomatique dans les modèles hydrologiques.



Interface de simulations climatiques (modèle régional)
issue de la page du portail climatique du Québec
(Ouranos)

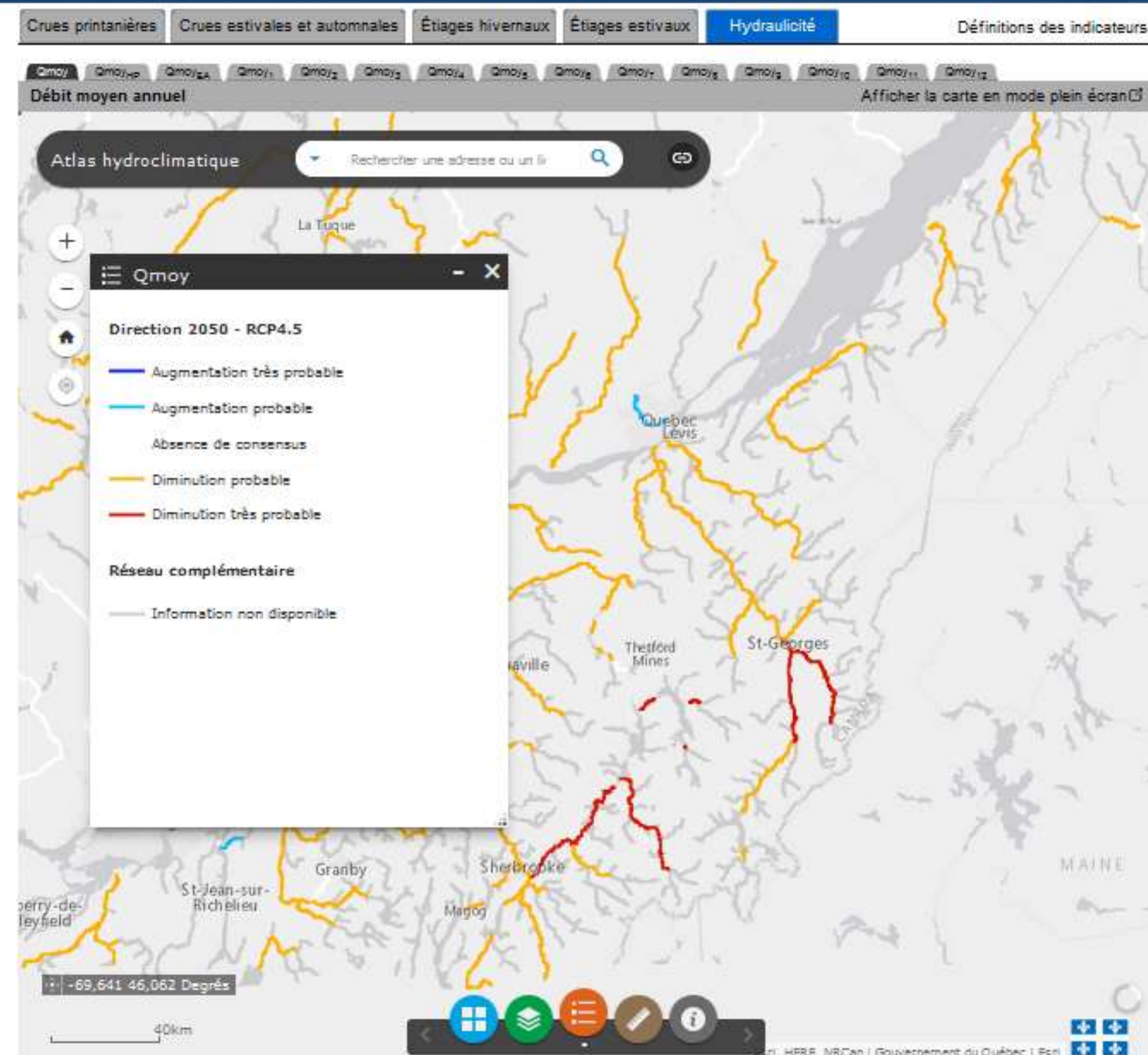
- *La représentation statistique du nombre d'échantillons issus de ces scénarios peut nécessiter l'extraction de plusieurs résultats pour un même RCP (représentativité pour le calculs des percentiles pour différents horizons)*

Données et méthodologies – Modélisation hydrologique

Données et méthodologie – Atlas hydroclimatique du Québec Méridional

1. Identification des biefs à l'étude;
2. Identification des récurrences, périodes, récurrences et scénarios RCP souhaitées pour l'étude;
3. Extraction des informations ponctuelles (localisation non ajustable);
4. Prétraitement pour importation géomatique dans les modèles hydrauliques (conditions amont et/ou aval).

Les données sources et plus d'indications sur les conditions de leur production sont accessibles depuis le site de la DEHA.



Interface de simulations hydrologiques issue de la page de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (DEHA)

Données et méthodologies – Modélisation hydrologique



Données – Modélisation hydrologique déterministe et fréquentielle

Données matricielles

- Topographie (lidar / MNT)
- Couverture
- Usage du territoire
- Pédologie

Données ponctuelles et temporelles

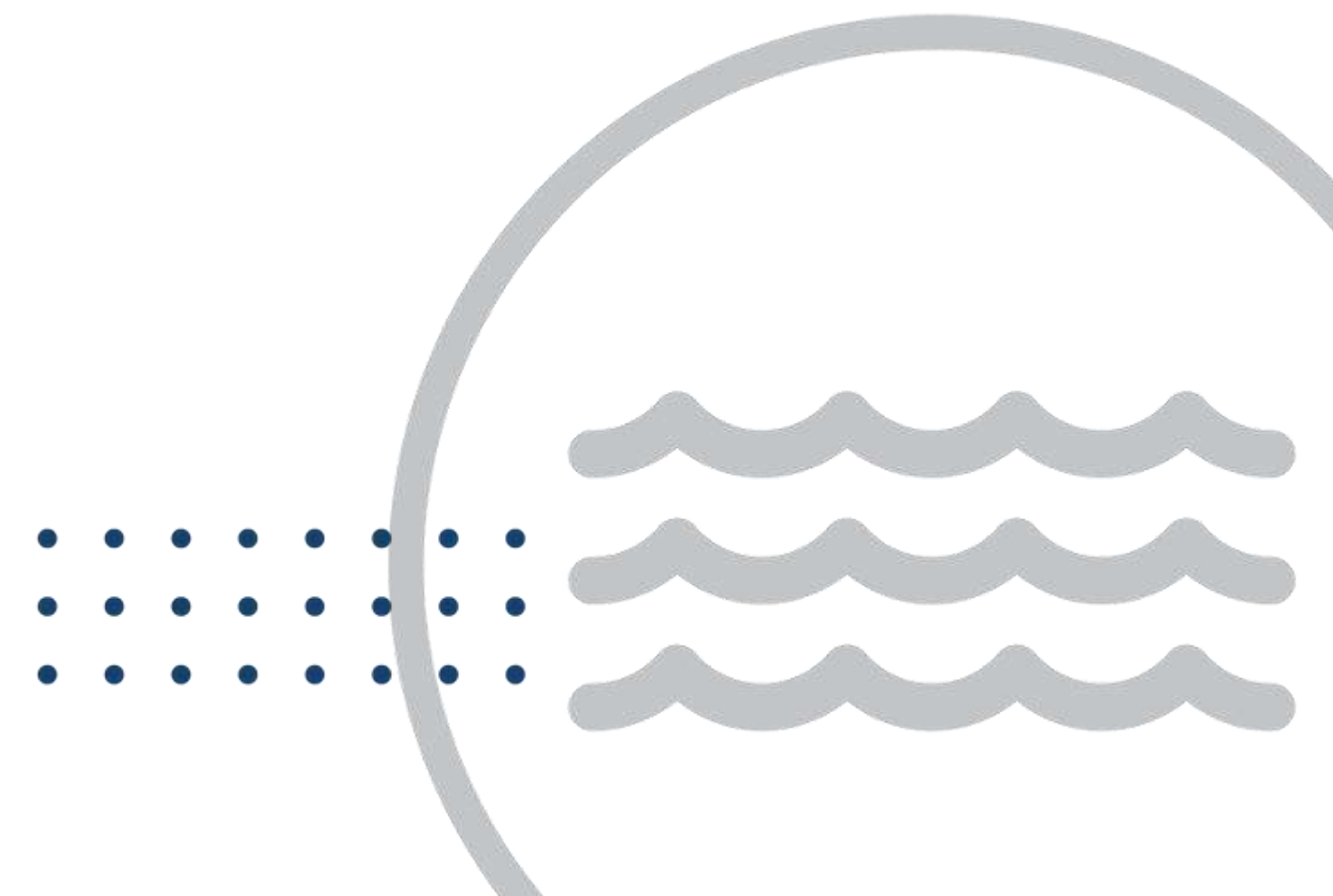
- Chroniques climatiques (pluviométrie, nivomètre, température) actuelles et futures;
- Chroniques débitmétriques (évènement de référence);
- Données associés à la recharge et à la décharge des ouvrages de rétention (incluant MHH dans le cas de l'utilisation des modules associés).

Données et méthodologies – Modélisation hydrologique



Méthodologie

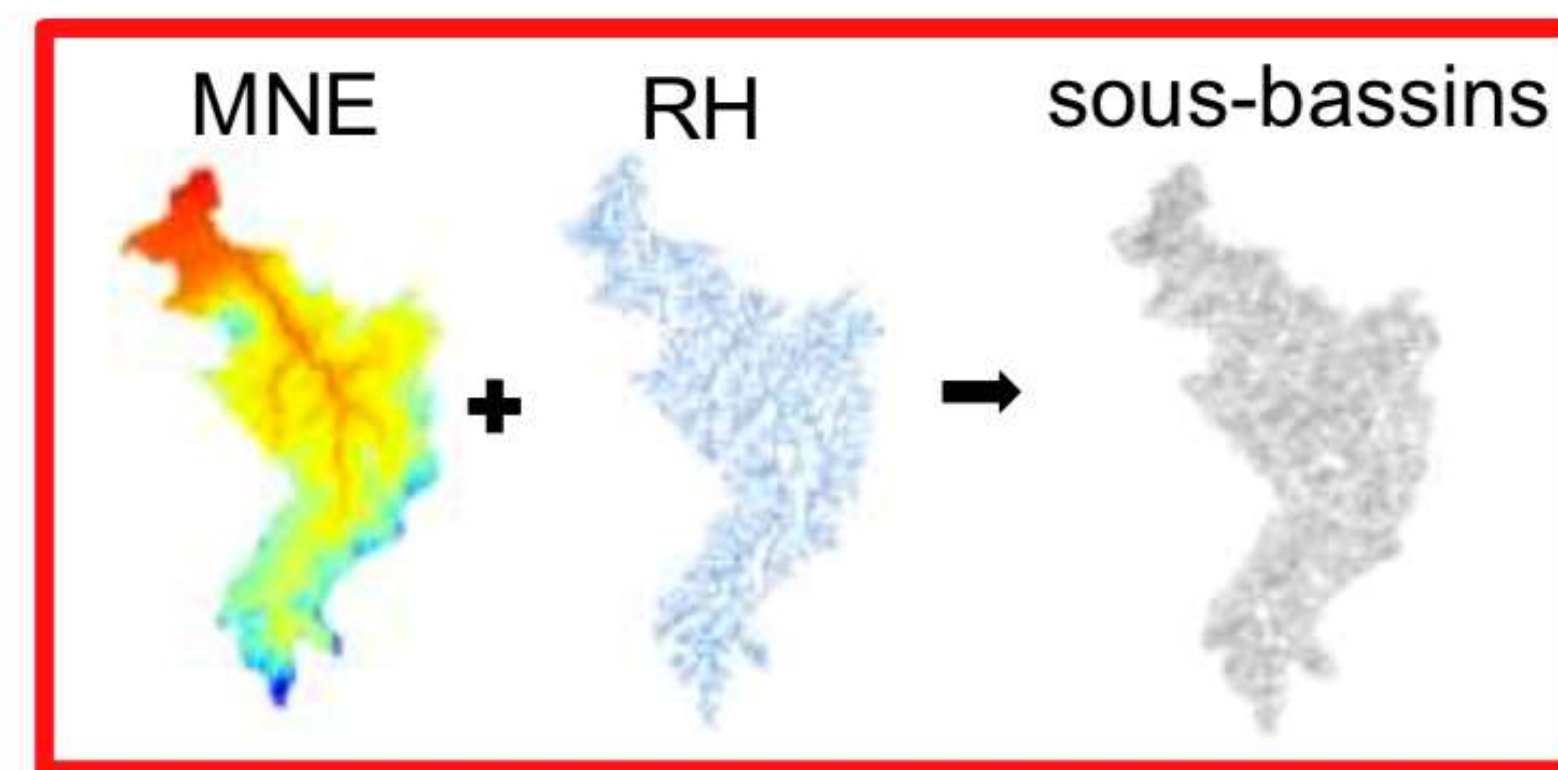
1. Montage du modèle;
2. Calibration (séquentielle ou non) sur un ou plusieurs évènements connus;
3. Définition des scénarios d'aménagement;
4. Simulations prospectives;
5. Extraction de l'information aux exutoires d'intérêt pour traitement statistique avant modélisation hydraulique.



Données et méthodologies – Modélisation hydrologique

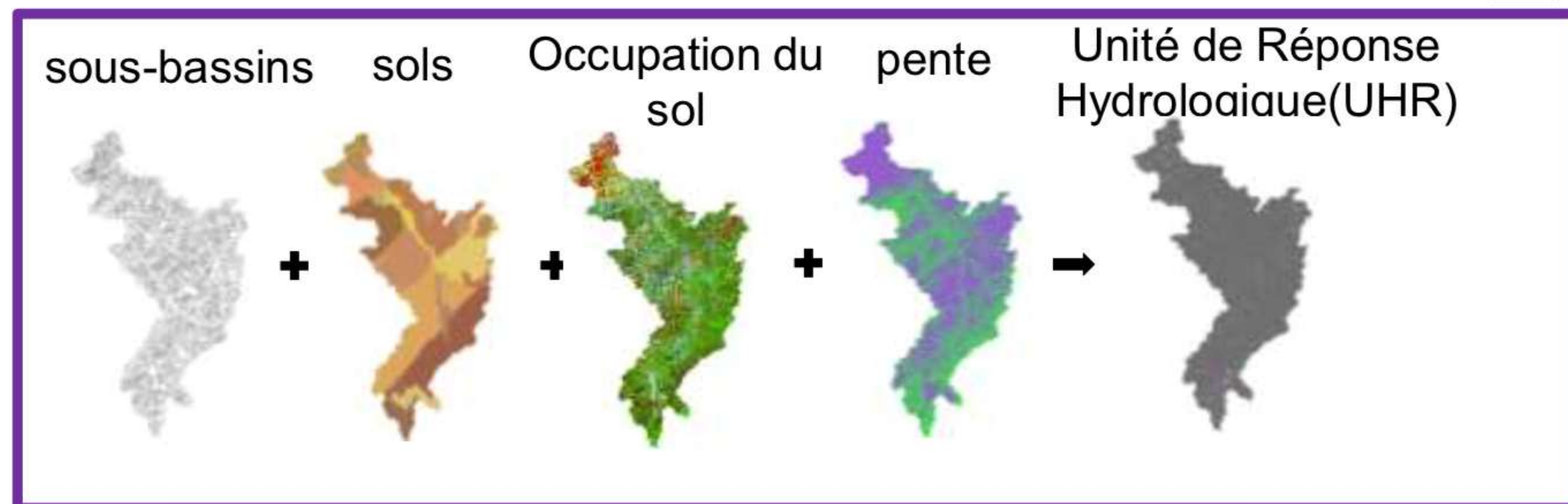
Montage du modèle

- Analyse géomatique des territoires physiques et des bassins versants.
- Calcul depuis l'information topographique des directions et accumulations de flux; génération du réseau hydrographique et sous-bassins versants;
- Paramétrisation des caractéristiques hydrologiques (ex. *curve number* - *CN*) du territoire = $f(\text{couverture, utilisation, pédologie, ...})$ du territoire (lookup table);
- Agrégation à l'échelle de surfaces aux caractéristiques uniformes (URH); équation résolue pouvant être différentes (ex. MHH équivalent).



1

Procédure de montage d'un modèle hydrologique SWAT. (Leconte et Bizhanimanzar, 2020)



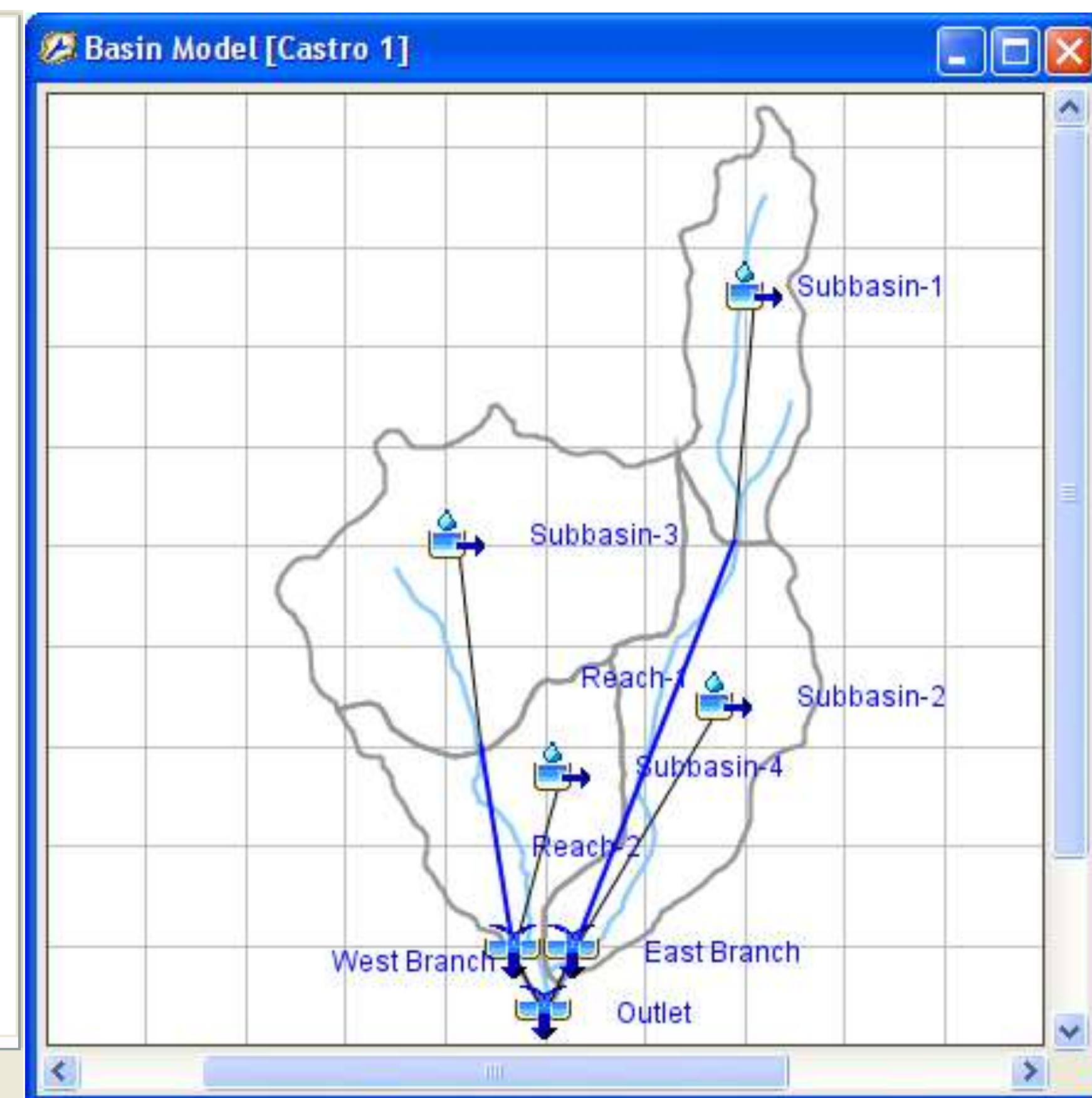
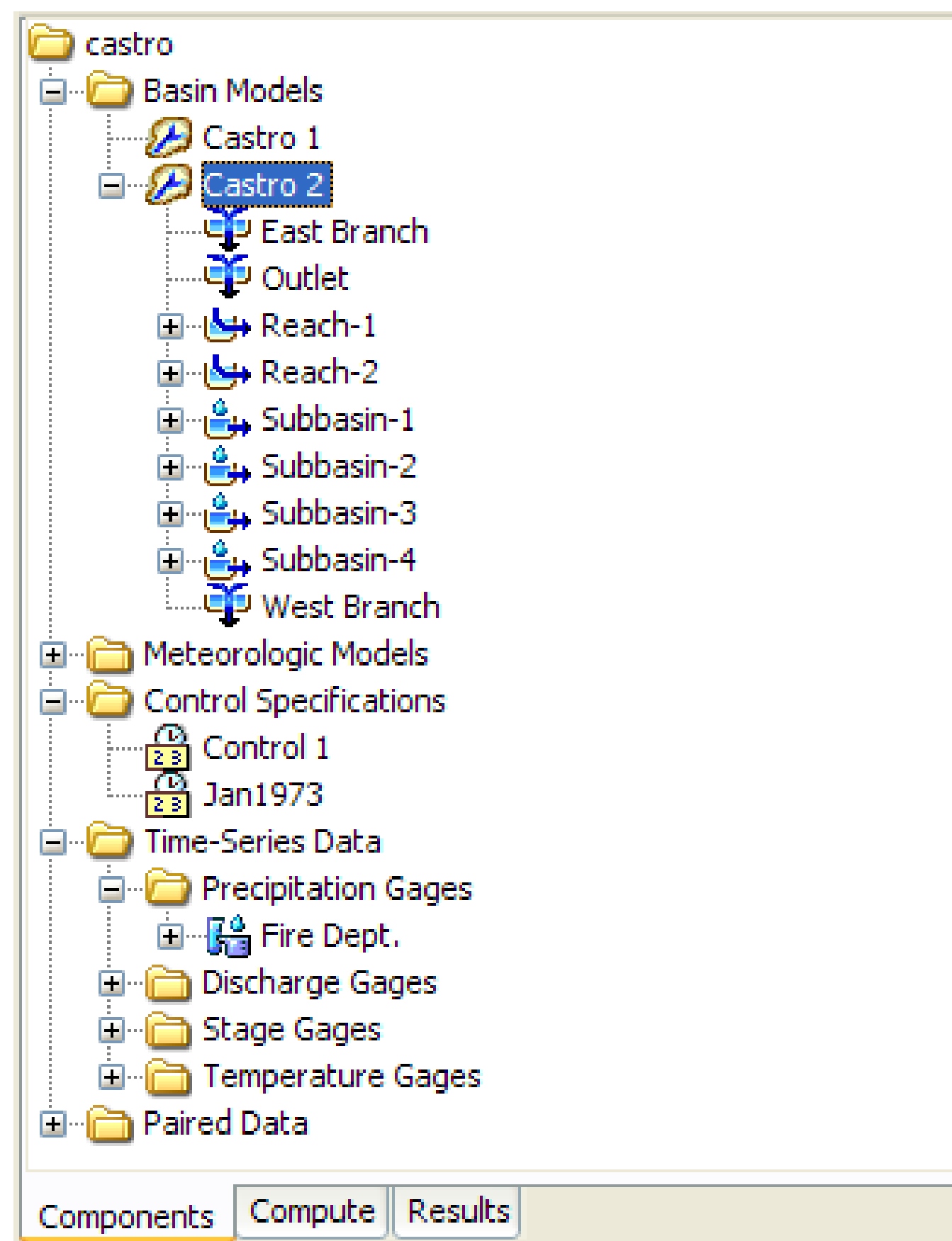
2

Données et méthodologies – Modélisation hydrologique

Calibration

- Composition d'un portefeuille de données (sous bassin versant, chroniques, ouvrages, ...); interconnectés dans une interface unique
- Paramétrisation fine des différents modules (pas de temps, décharges, ...);
- RUN !

De l'importance de définir judicieusement la taille des sous-bassins versants et la localisation de leurs exutoires notamment si les extrants ont pour vocation d'être utilisés comme intrants à la modélisation hydraulique (conditions aux limites).



Données et méthodologies – Modélisation hydrologique

Calibration

- Avec les données débitmétriques et climatiques aux stations couvrant la période de référence. Un prétraitement de correction ou de remplissage des lacunes peut être nécessaire.
- La paramétrisation des caractéristiques hydrologiques est assurée de manière itérative pour reproduire de manière satisfaisante la temporalité et l'intensité des événements.
- Calibration séquentielle sur de grands BV

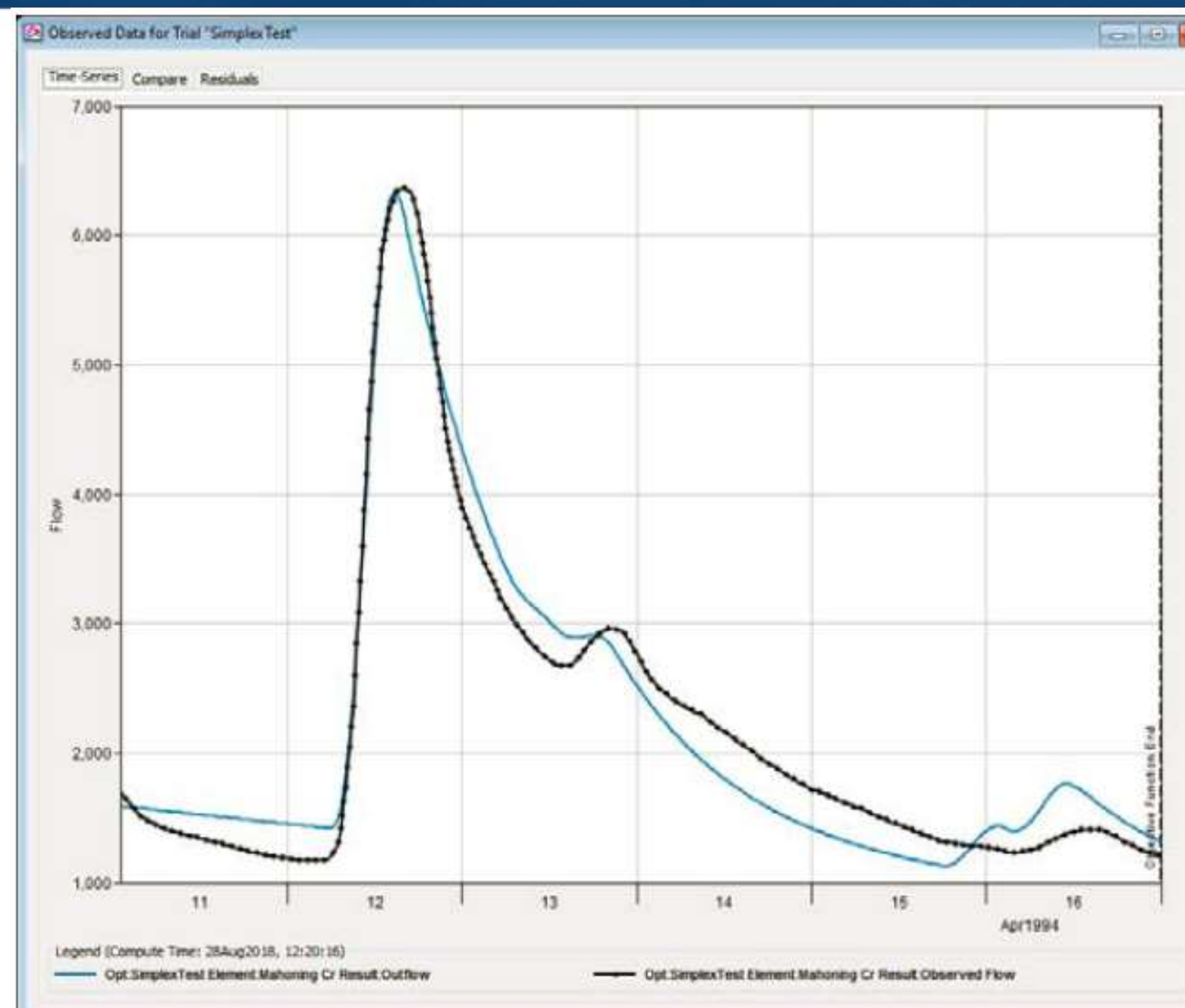


Figure 349. Observed Data Time-Series graph.

Exemple de résultat de calibration sur un évènement hydrologique (HEC-HMS User's Manual – 2018)

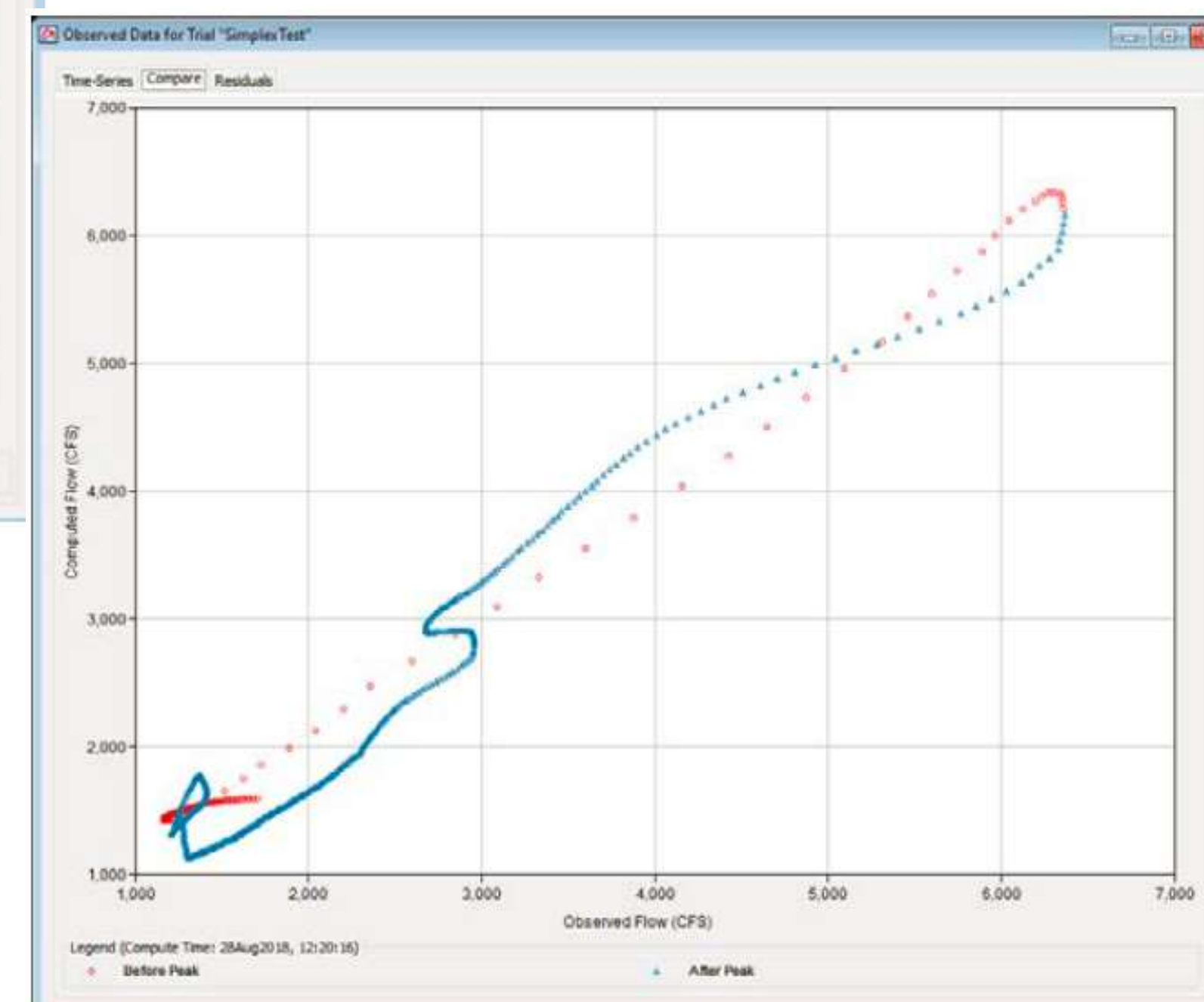


Figure 350. Observed Data Comparison graph.

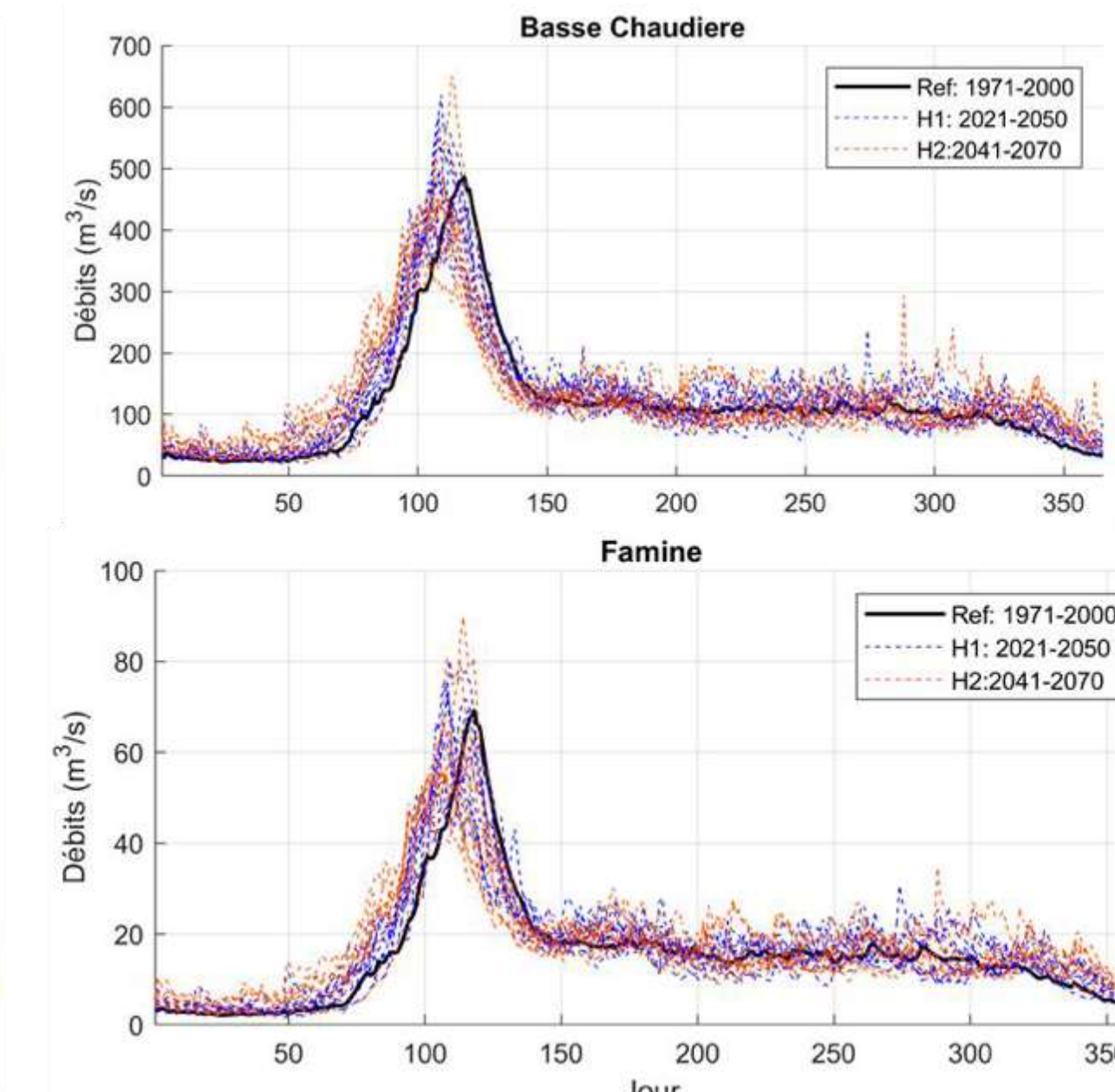
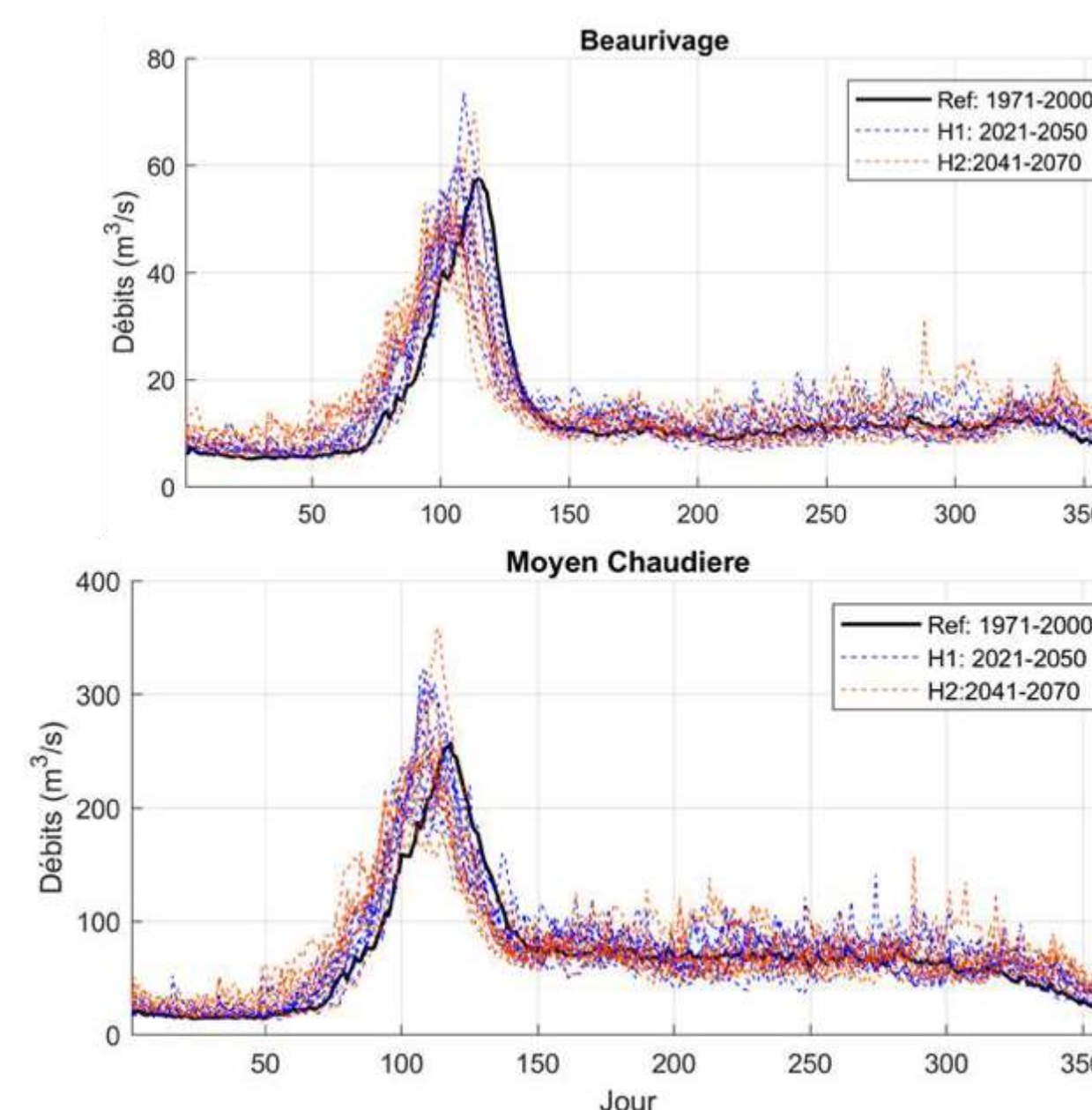
Données et méthodologies – Modélisation hydrologique

Modélisation prospective

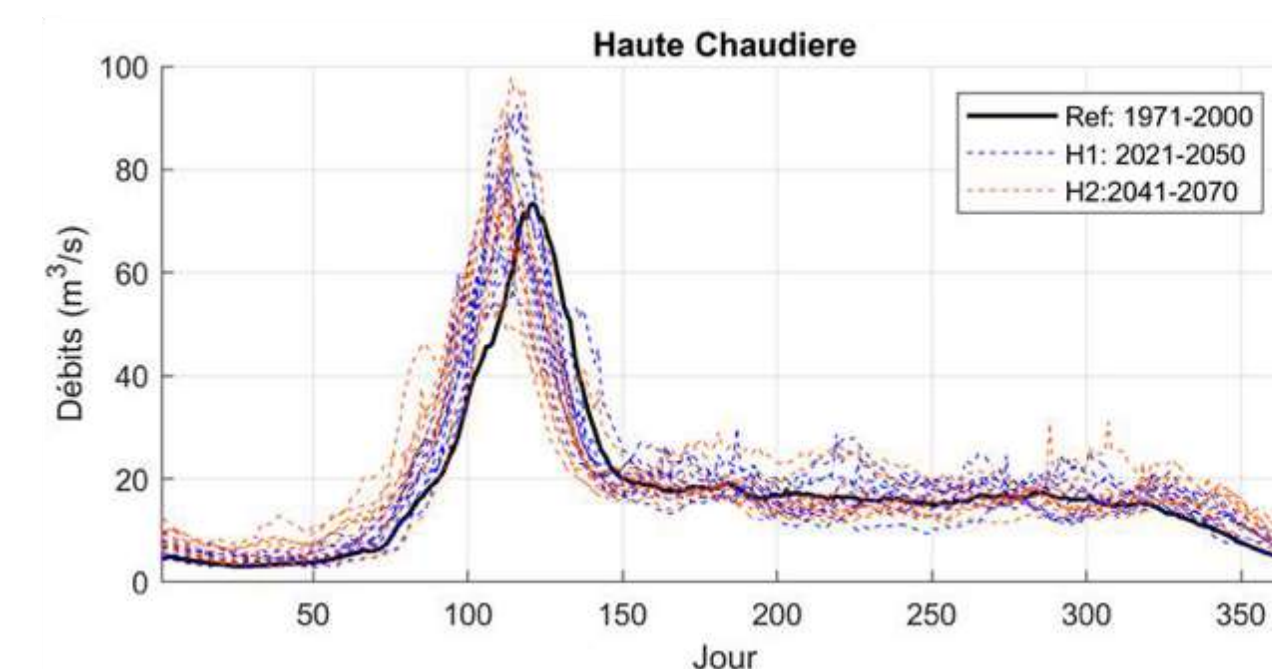
À l'aide :

- Des données matricielles de scénarisation de modification du territoire physique.
- Des données climatiques issues de la modélisation climatiques.

L'information peut alors être interrogée à chaque exutoire des bassins versants constitutif de l'arborescence hydrographique ainsi que pour chaque infrastructure pouvant exister sur le territoire.



Résultats de simulations prospectives en climat future. (Leconte et Bizhanimanzar, 2020)



Données et méthodologies – Modélisation hydraulique



Données - Modélisation 1D/2D

Données matricielles

- Topographie (lidar / MNT)
- Couverture

Données issues de campagnes de terrain (géométrie et caractéristiques hydrauliques)

- Relevés terrain dont bathymétrie (cross sections)
- Informations sur la rugosité (associée aux sections et aux données matricielles)
- Relevés des ouvrages et obstacles (localisation, dimensionnement; ...)

Données ponctuelles et temporelles

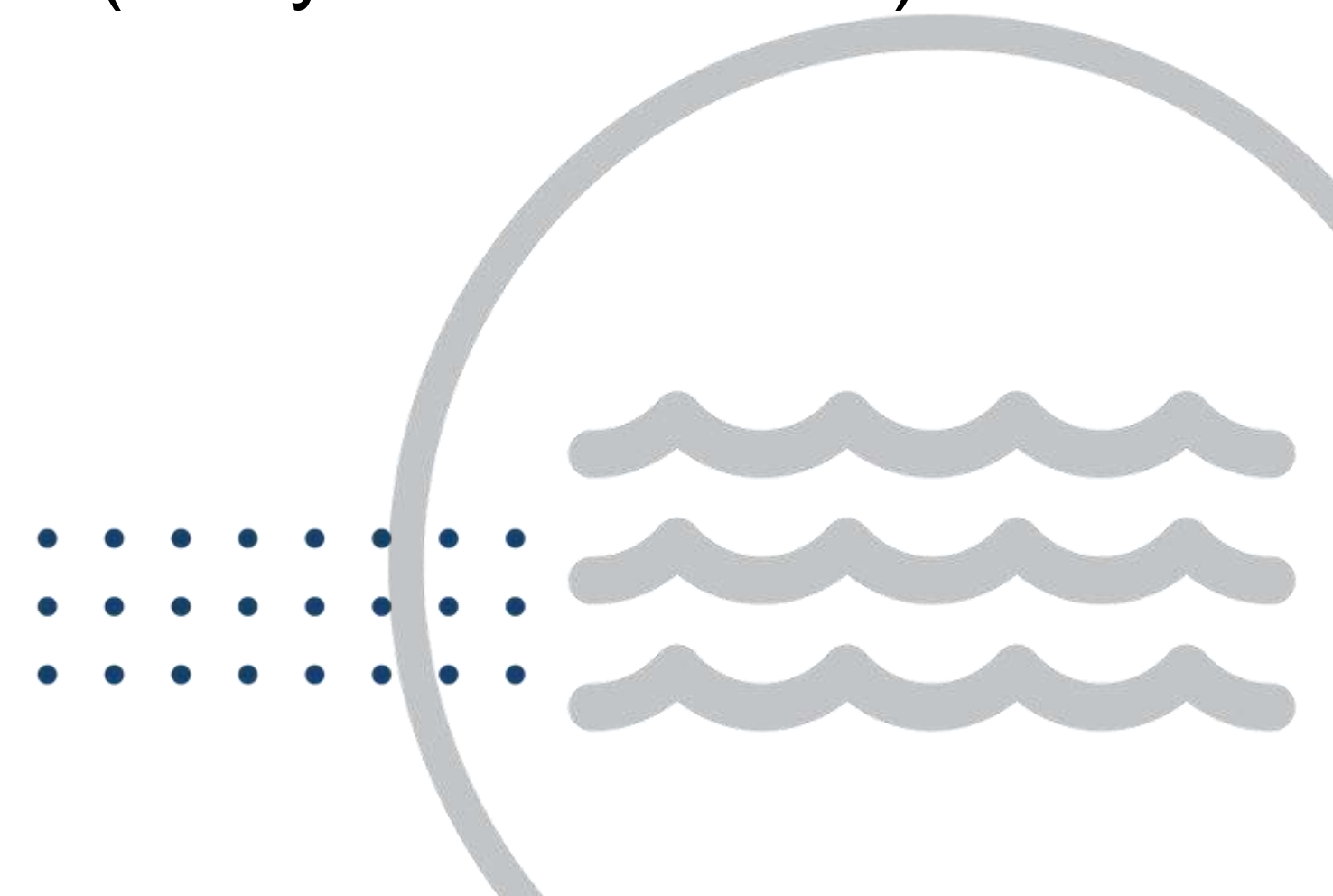
- Chroniques débitmétriques (mesurés et/ou depuis la modélisation hydrologique)
- Chroniques des niveaux d'eau dans le chenal et la plaine inondable synchrones avec les données débitmétriques de calibration.
- Données associées au remplissage et à la décharge des ouvrages hydrauliques (barrages, seuils, ...)

Données et méthodologies – Modélisation hydraulique



Méthodologie - Modélisation 1D/2D

1. Montage du modèle;
2. Calibration sur un ou plusieurs évènements connus;
3. Définition des scénarios structuraux;
4. Simulations prospectives;
5. Extraction de l'information de submersion dans le chenal et sur la plaine inondable (étendue, submersion) ainsi que des vecteurs de vitesse et de directions d'écoulement (analyse de l'érosion).



Données et méthodologies – Modélisation hydraulique

Montage du modèle

1. Définition du bief à l'étude : deux conditions aux limites, préférentiellement, flux (amont) et potentiel imposé (aval) - CSV
2. Structuration du chenal 1D : sections et ligne des hautes eaux (identification transversale du lit mineur)
3. Correction, paramétrisation et interpolation de la structure du chenal.
4. Ajout des structure hydrauliques / liens hydrauliques.

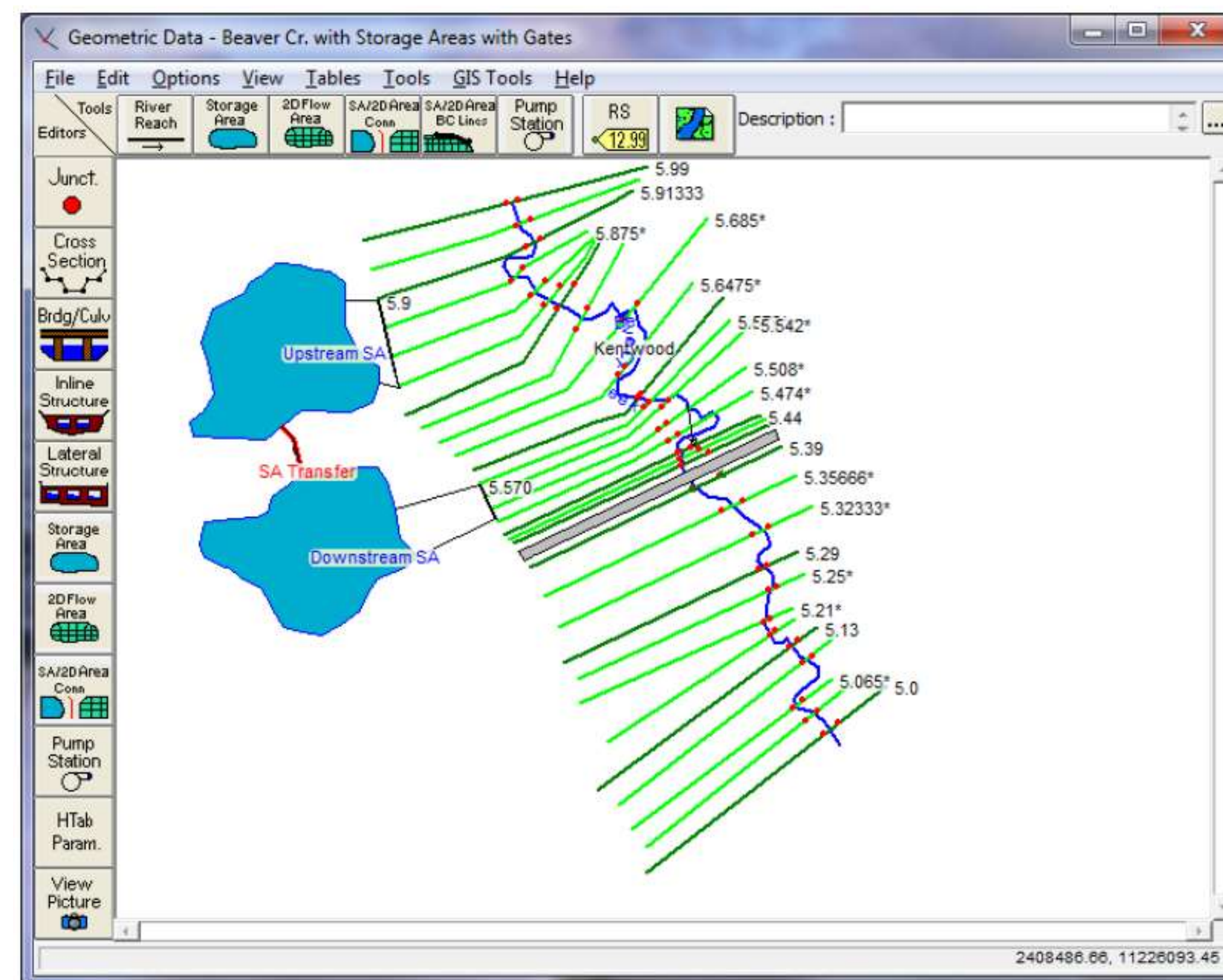


Figure 5-39 Example Schematic with Storage Areas

Données et méthodologies – Modélisation hydraulique

Montage du modèle

1. Définition du bief à l'étude : deux conditions aux limites, préférentiellement, flux (amont) et potentiel imposé (aval)
2. Structuration du chenal 1D : sections et ligne des hautes eaux (identification transversale du lit mineur)
3. Correction, paramétrisation et interpolation de la structure du chenal.
4. Ajout des structure hydrauliques / liens hydrauliques.

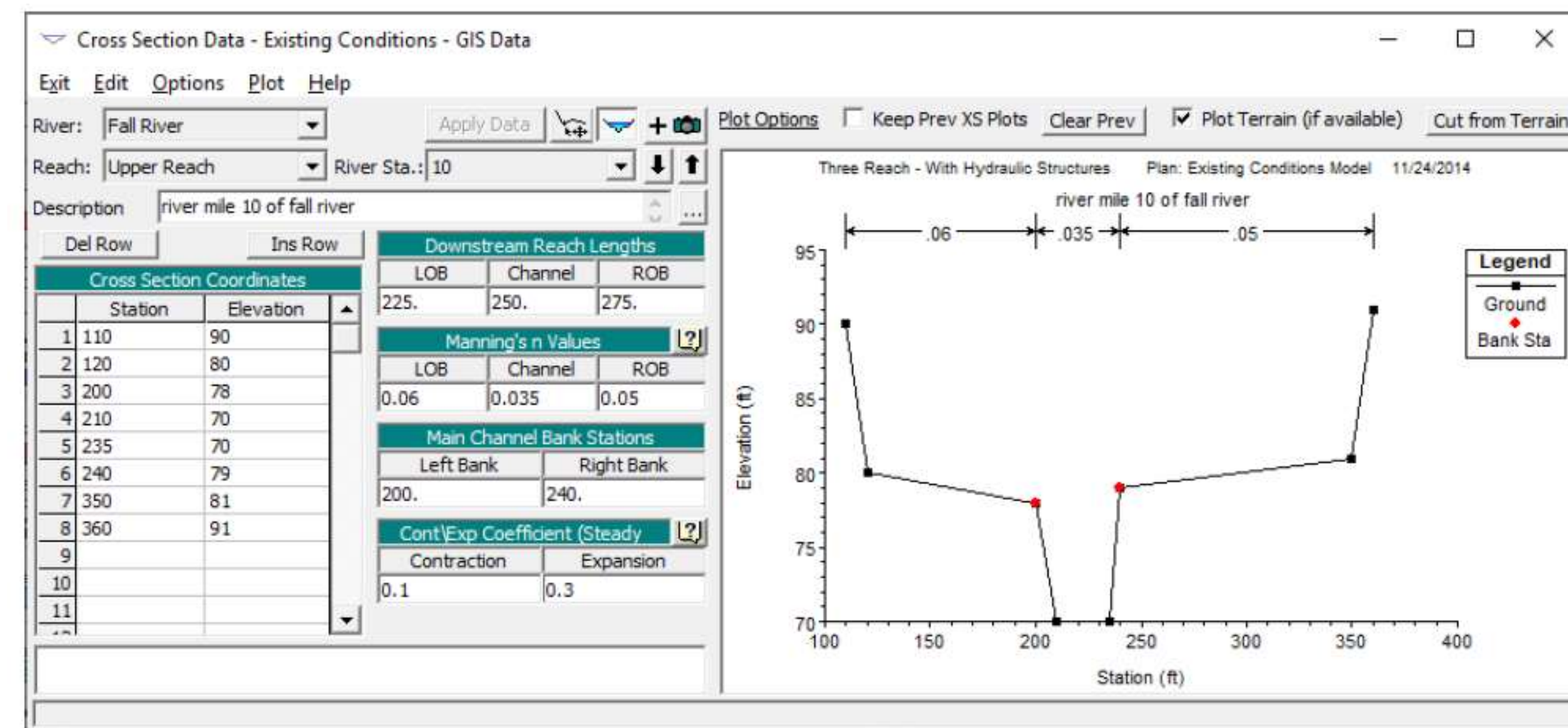


Figure 3-6. Cross Section Data Editor

Données et méthodologies – Modélisation hydraulique

Montage du modèle

1. Définition du bief à l'étude : deux conditions aux limites, préférentiellement, flux (amont) et potentiel imposé (aval)
2. Structuration du chenal 1D : sections et ligne des hautes eaux (identification transversale du lit mineur)
3. Correction, paramétrisation et interpolation de la structure du chenal.
4. Ajout des structure hydrauliques / liens hydrauliques.
5. Arrimage au modèle numérique de terrain (identification zone de calcul) et maillage (éléments ou différences finies)

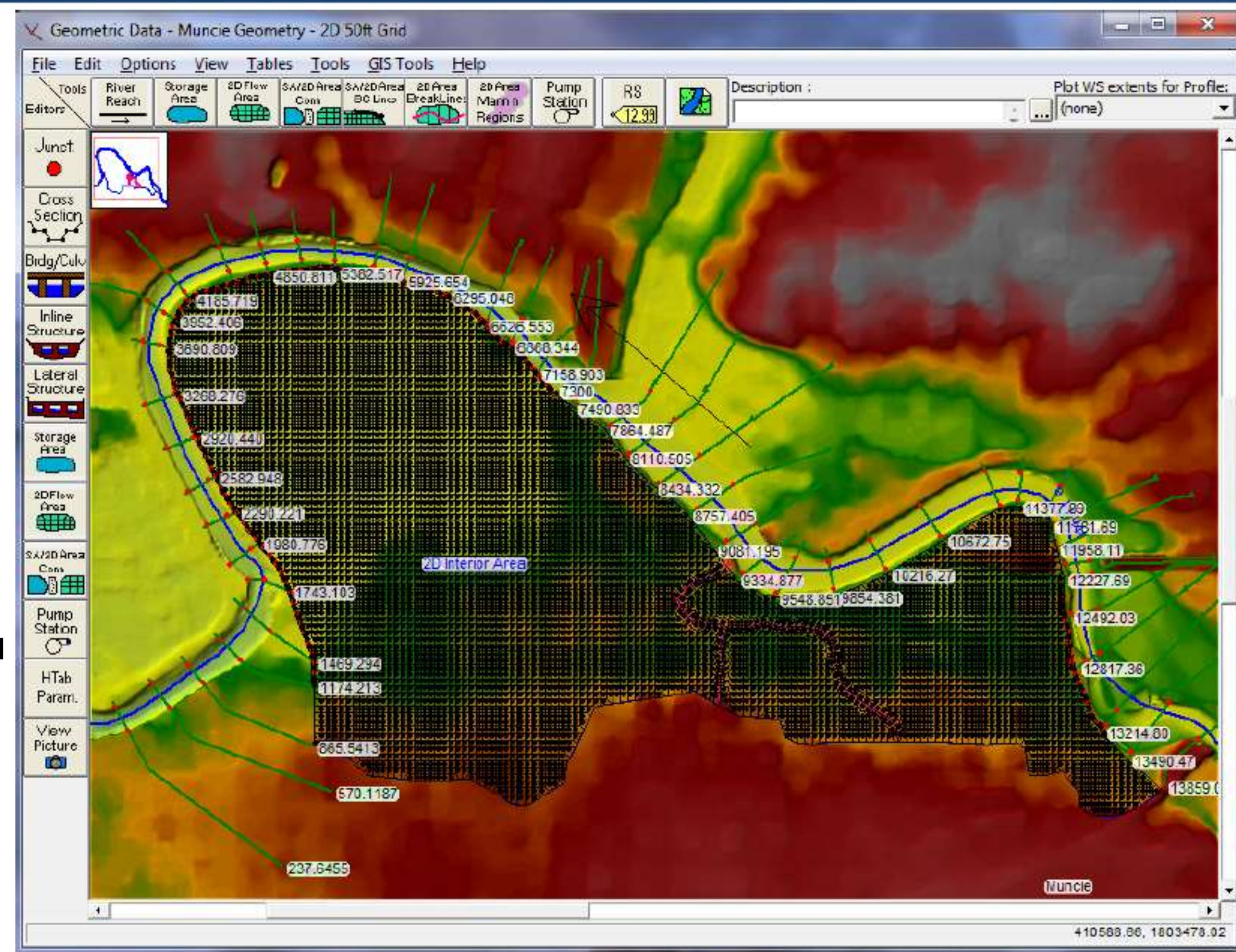


Figure 5-44. Example 2D computational mesh for an interior of a levee protected area.

Données et méthodologies – Modélisation hydraulique

Montage du modèle

1. Définition du bief à l'étude : deux conditions aux limites, préférentiellement, flux (amont) et potentiel imposé (aval)
2. Structuration du chenal 1D : sections et ligne des hautes eaux (identification transversale du lit mineur)
3. Correction, paramétrisation et interpolation de la structure du chenal.
4. Ajout des structure hydrauliques.
5. Arrimage au modèle numérique de terrain (identification zone de calcul) et maillage (éléments ou différences finies)
6. Attribution des paramètres de calibration (coefficient de rugosité Manning / Strickler;) de la plaine inondable.
7. Arrimage temporel et spatiale des chroniques de référence (débits, niveaux).

Land Cover to Manning's n (2D Flow Areas Only)

Set Manning's n to Override Default Land Cover Values

Selected Area Edit Options

Add Constant ... Multiply Factor ... Set Values ... Replace ...

Land Cover Layer		Geometry Overrides (Blank for Default Values)		
	Name	Default Mann n	Base Mann n (blank for default)	Flat Area
1	nodata		0.06	0.054
2	building	10	100	100
3	medium density residential	0.08	0.08	0.072
4	open space	0.04	0.04	0.036
5	park	0.06	0.06	0.054
6	trees	0.12	0.12	0.108
7	urban	0.1	0.1	0.09

Associated Layer: d:\... \Example Data\2D Unsteady Flow Hydraulics\Muncie\LandCover\LandCoverUserShapefile.tif

OK Cancel

Figure 5-78. Manning's n by Land Class Table.

Données et méthodologies – Modélisation hydraulique

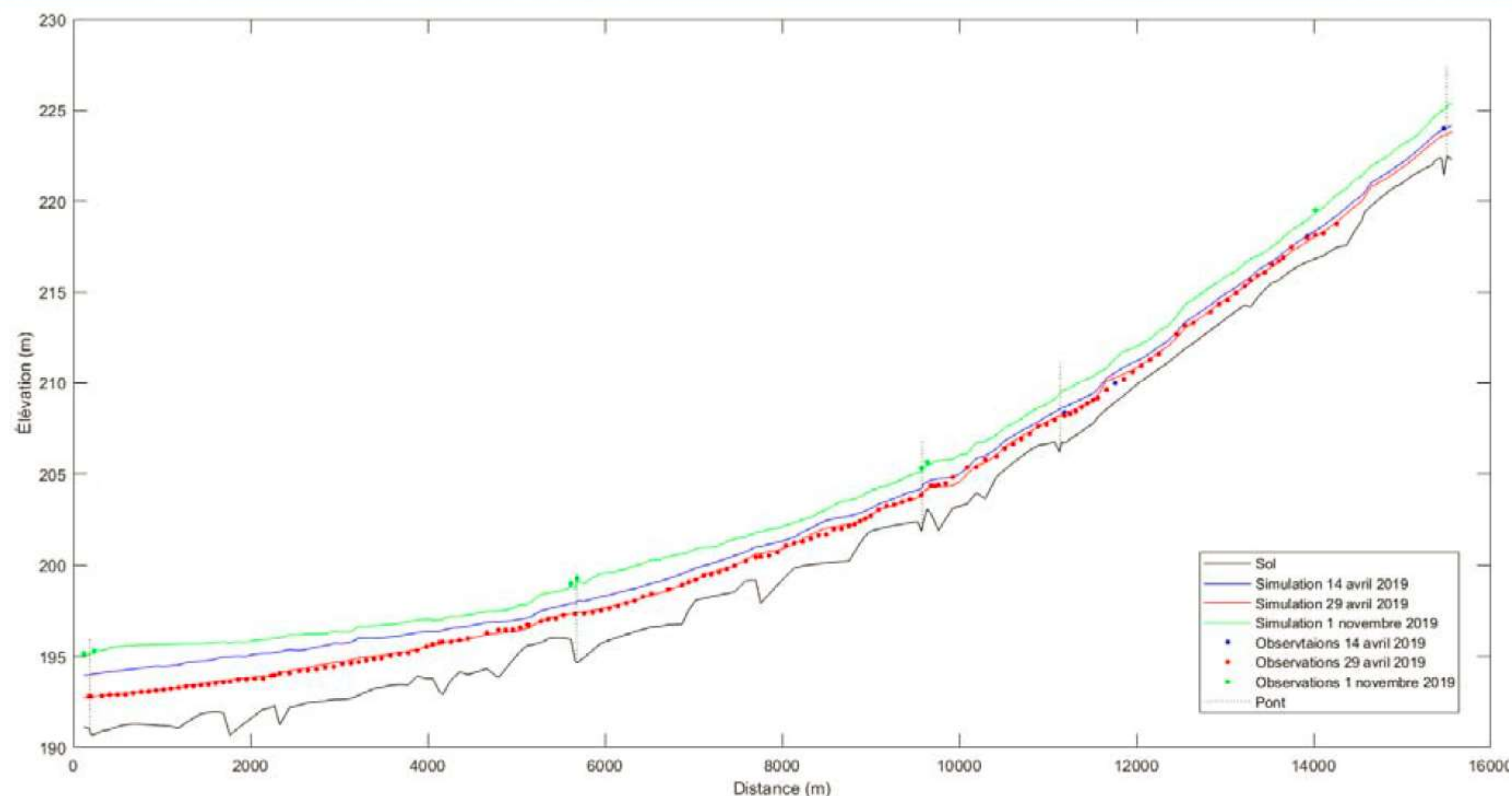
Calibration

Deux niveaux :

- Chenal (1D)
- Plaine inondable (2D)

Deux régimes possibles :

- Permanent (statique)
- Transitoire (évènement)



On compare avec les valeurs observées de niveau d'eau. Des ajustements des paramètres hydrauliques sont à envisager.

*Des erreurs critiques peuvent apparaître lors de la calibration dues à l'absence d'eau dans le chenal : les équations ne peuvent être résolues >> **Run, Re-Run et Re-Run again...***

Données et méthodologies – Modélisation hydraulique

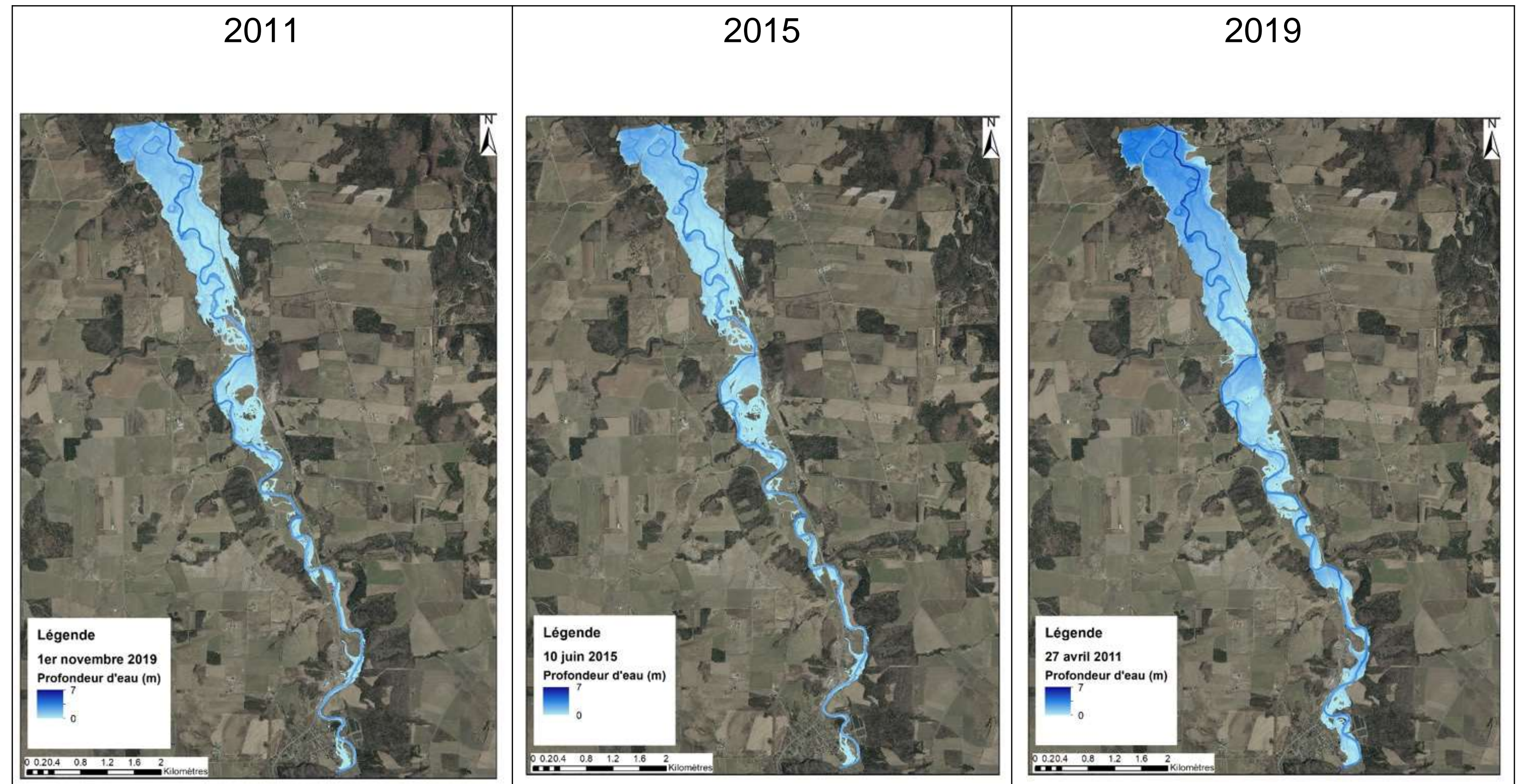
Calibration

Deux niveaux :

- Chenal (1D)
- Plaine inondable (2D)

Deux régimes :

- Permanent (statique)
- Transitoire (événement)

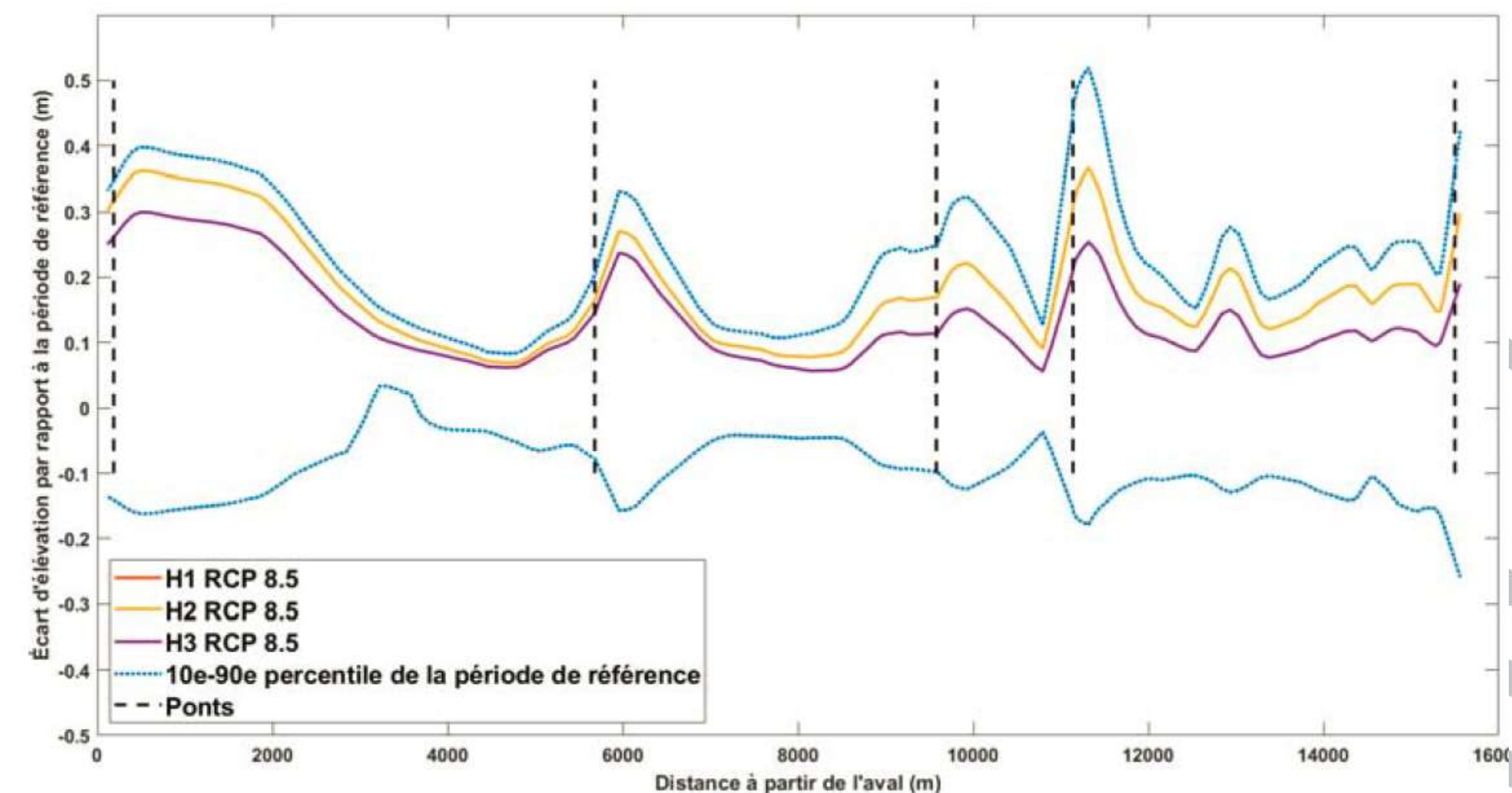
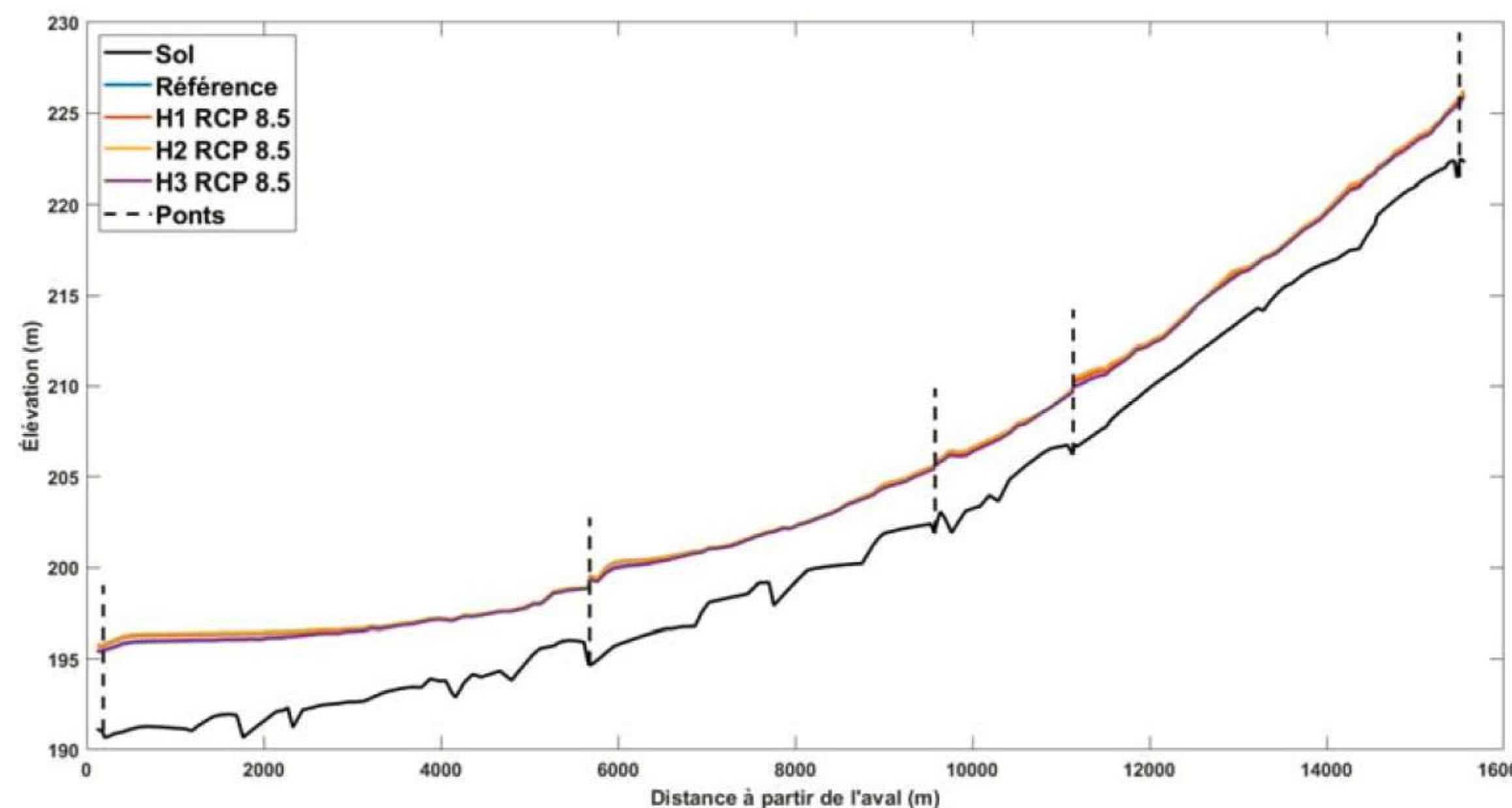


Cartes de profondeur de submersions issues de la calibration du modèle HEC-RAS sur la rivière Coaticook (Depuis Trudel et Gobji, 2020)

Données et méthodologies – Modélisation hydraulique

Modélisation prospective

- *Extrants de la modélisation hydrologique prospective en amont et en aval de la section d'intérêt.*
- *Statistiques de répartition des débits correspondants aux différents scénarios de RCP issus de la modélisation hydraulique.*



Exemple de (gauche) niveaux d'eau simulés et (droite) écart par rapport à la période de référence pour la PDA1% - RCP 8.5. (Depuis Trudel et Gobji, 2020)

Données et méthodologies – Modélisation hydraulique

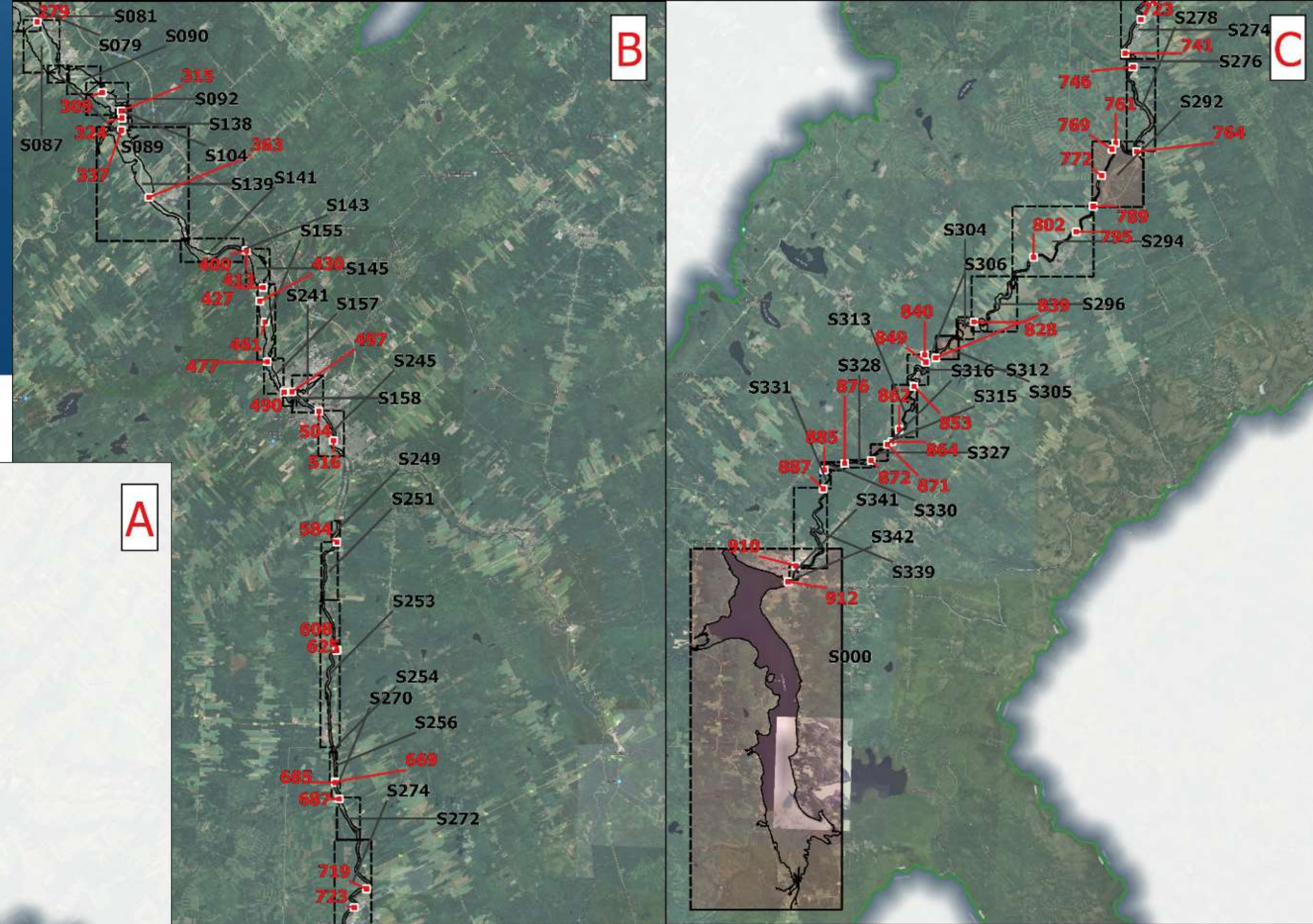
Données – Modélisation géostatistique dérivée de la méthode large échelle

- Un .shp de points correspondants aux exutoires retenus au centre des chenaux, après les confluences. Ces points sont ajustés pour correspondance des confluences avec flowacc du modèle hydraulique d'origine;
- Débits maximums issus de l'analyse statistique des simulations hydrologiques aux exutoires retenus;
- Un shp. du zonage du secteur d'étude fragmenté incluant la plaine inondable et contenant minimalement un point d'exutoire du modèle hydrologique;
- Un portefeuille de données matricielles issues des simulations hydrauliques précédentes (1D/2D; large échelle, ...) :
 - ✓ Raster d'altitude du niveau d'eau couvrant l'ensemble de la zone d'étude et correspondant à des récurrences connues;
 - ✓ Les raster de débit au centre des chenaux correspondants à ces récurrences;
 - ✓ Une couche de masque du lit mineur des chenaux;
 - ✓ Le lidar.

Numéro simulation	Code du débit simulé	Débit minimum SQ avec CC (SWAT)	Q 2ans (Atlas)	Q 20ans (Atlas)	Q 100ans (Atlas)	Q 350ans (Atlas)	Débit maximum SQ avec CC (SWAT)
1	qmin	100%					
2	qinter1	90%	10%				
3	qinter2	80%	20%				
4	qinter3	70%	30%				
5	qinter4	60%	40%				
6	qinter5	50%	50%				
7	qinter6	40%	60%				
8	qinter7	30%	70%				
9	qinter8	20%	80%				
10	qinter9	10%	90%				
11	1		100%				
12	2		90%	10%			
13	3		80%	20%			
14	4		70%	30%			
15	5		60%	40%			
16	6		50%	50%			
17	7		40%	60%			
18	8		30%	70%			
19	9		20%	80%			
20	10		10%	90%			
21	11			100%			
22	12			80%	20%		
23	13			60%	40%		
24	14			40%	60%		
25	15			20%	80%		
26	16				100%		
27	17				80%	20%	
28	18				60%	40%	
29	19				40%	60%	
30	20				20%	80%	
31	21					100%	
32	res_qmax						100%

Récurrences des couches sources employées pour l'étude de cas de la rivière Chaudière. (Boyer-Villemaire et col. 2021)

Données et méthodologies – Modélisation hydraulique



Légende

- Sortie modèle SWAT
- Secteur de modélisation DEH
- ▭ Emprise de secteur de modélisation DEH
- ▭ Emprise de secteur non modélisé
- ▭ Limite de bassin versant

0 10 20 30 km

Secteur uniformes de modélisation géostatistique et exutoires retenus pour le cas de la rivière Chaudière. (Boyer-Villemare et col. 2021)

Données et méthodologies – Modélisation hydraulique

Méthode – Modélisation géostatistique dérivée de la méthode large échelle

Hypothèses :

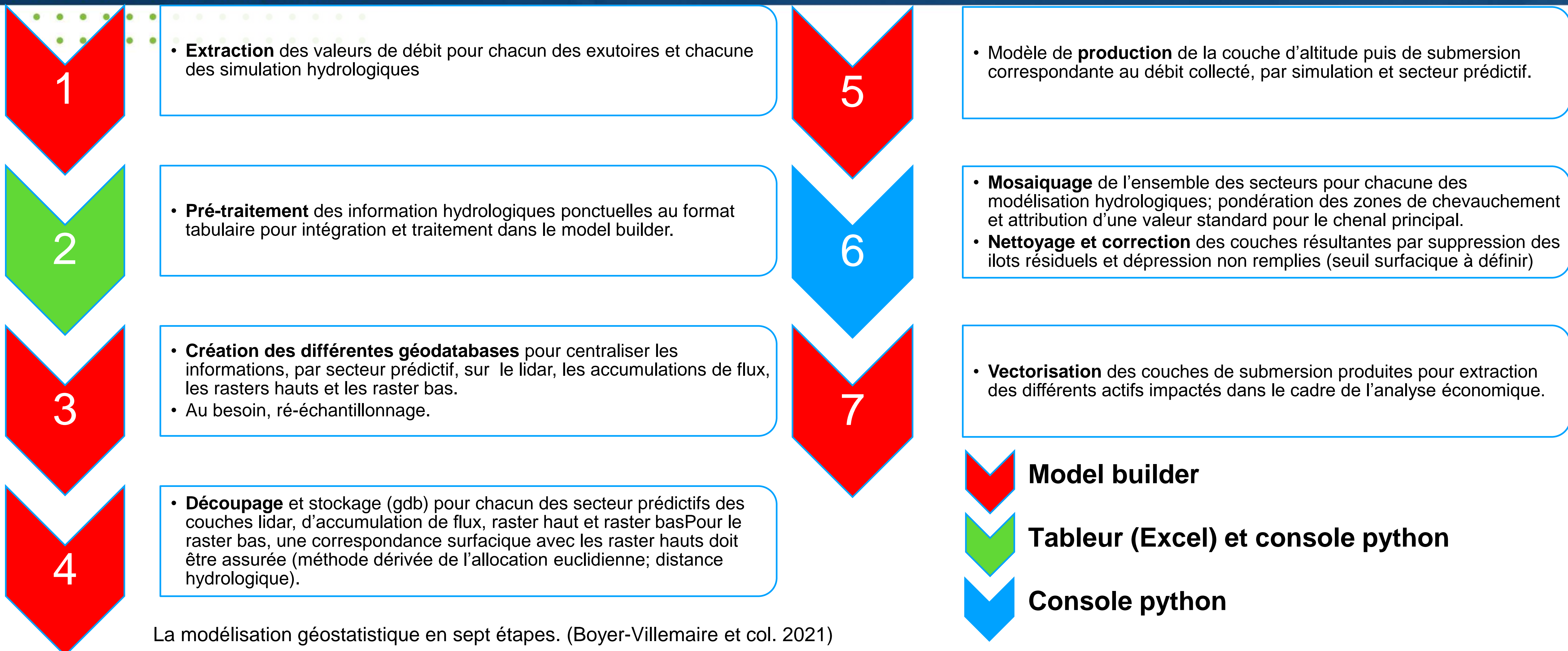
- Les relations $H=f(Q)$, au centre du chenal, peuvent être considérées linéaires (sans phénomène d'hystérésis) sur une distance hydrologique suffisamment courte, peu influencée par les apports latéraux majeurs, et entre deux récurrences proches.
- Les récurrences produites par les modèles hydrologique Hydrotel et SWAT sont comparables et se situent sur la même courbe $H=f(Q)$

Pour chaque secteur, la relation suivante est utilisée :

$$A_v = (A_s - A_i) * Q_v (Q_s - Q_i) + (A_s - (A_s - A_b) * Q_i (Q_s - Q_i))$$

Où Q_v est la valeur de débit pour laquelle la couche d'altitude est souhaitée, Q_s la valeur de débit supérieure issue des matrices source, Q_i , la valeur directement inférieure, A_v la couche d'altitude modélisée, A_s la couche d'altitude supérieure et A_i la couche d'altitude inférieure.

Données et méthodologies – Modélisation hydraulique



Données et méthodologies – Modélisation géomorphologique

Données et méthodologie – Statique (source - versants) ou hydrologique (Sediment yield = source et transport dans le bassin)

Statique

- Caractéristiques physiques du territoire et des sols

Résolution géomatique des équations RUSLE

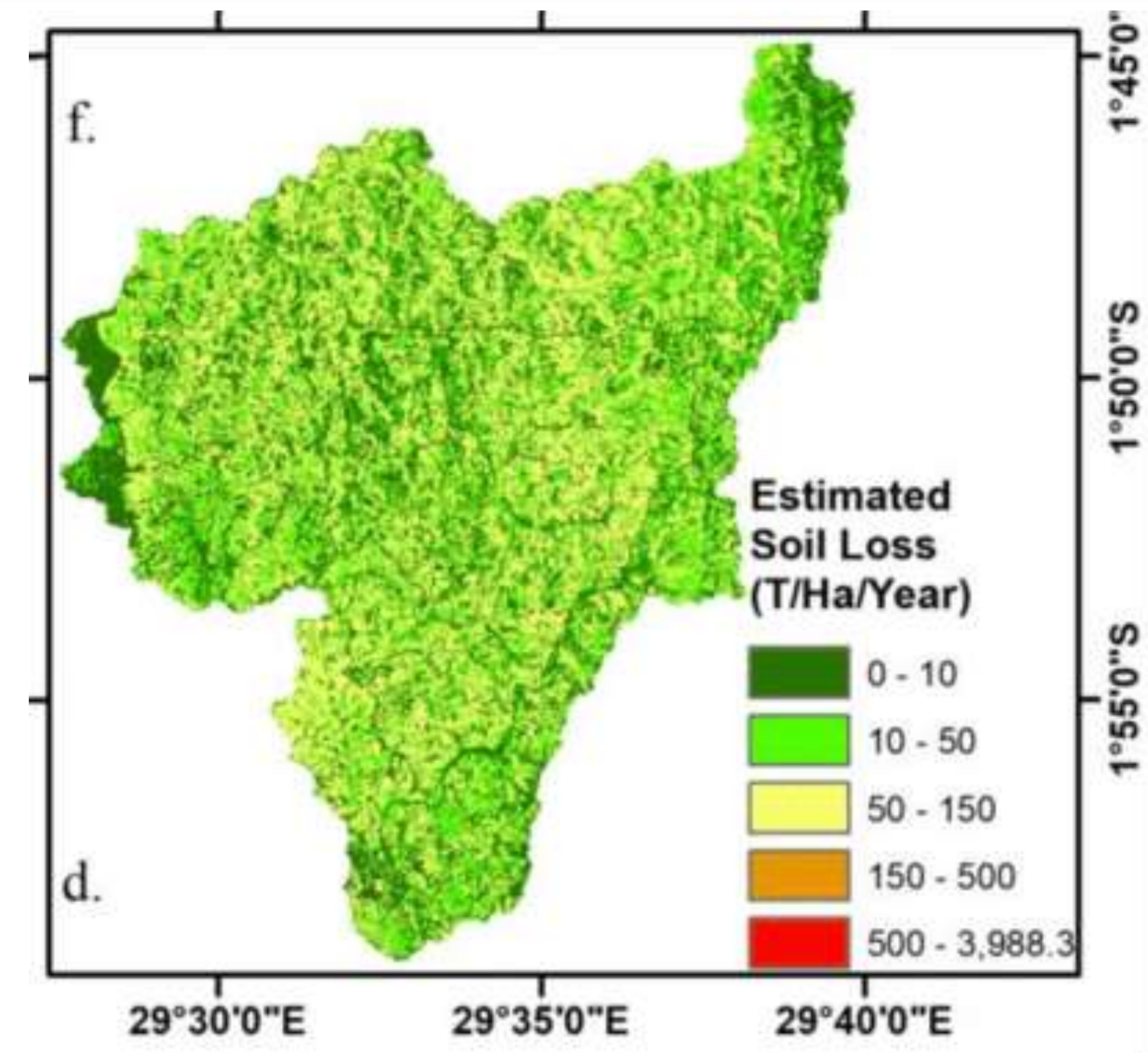
Érosion = Climat x Propriétés pédologiques x Topographie x Conditions à la surface du sol x activités anthropiques.

Hydrologique

- Modèle hydrologique fonctionnel (RUN)
- Campagnes de suivi des flux de sédiments (calibration, optionnel)

Résolution numérique de l'équation MUSLE (bassin) et différentes méthodes de calcul du transport (flux; advection, dispersion, ...)

- Paramétrisation dépendante de la méthode de calcul du transport retenue (capacité de transport, coefficient de dispersion par type de particule, ...).



Exemple de calcul taux d'érosion des sols via l'utilisation de l'équation RUSLE (Rutazuyaza et al. 2020)

Données et méthodologies – Modélisation géomorphologique

Données et méthodologie – Hydraulique (Érosion, transport et dépôt dans le chenal)

- Modèle hydraulique fonctionnel (RUN);
- Nature des sédiment (berges, lit, ..);
- Granulométrie (%);
- Température de l'eau;
- Campagnes de suivi des flux de sédiments (caractérisation, sources, ..);
-

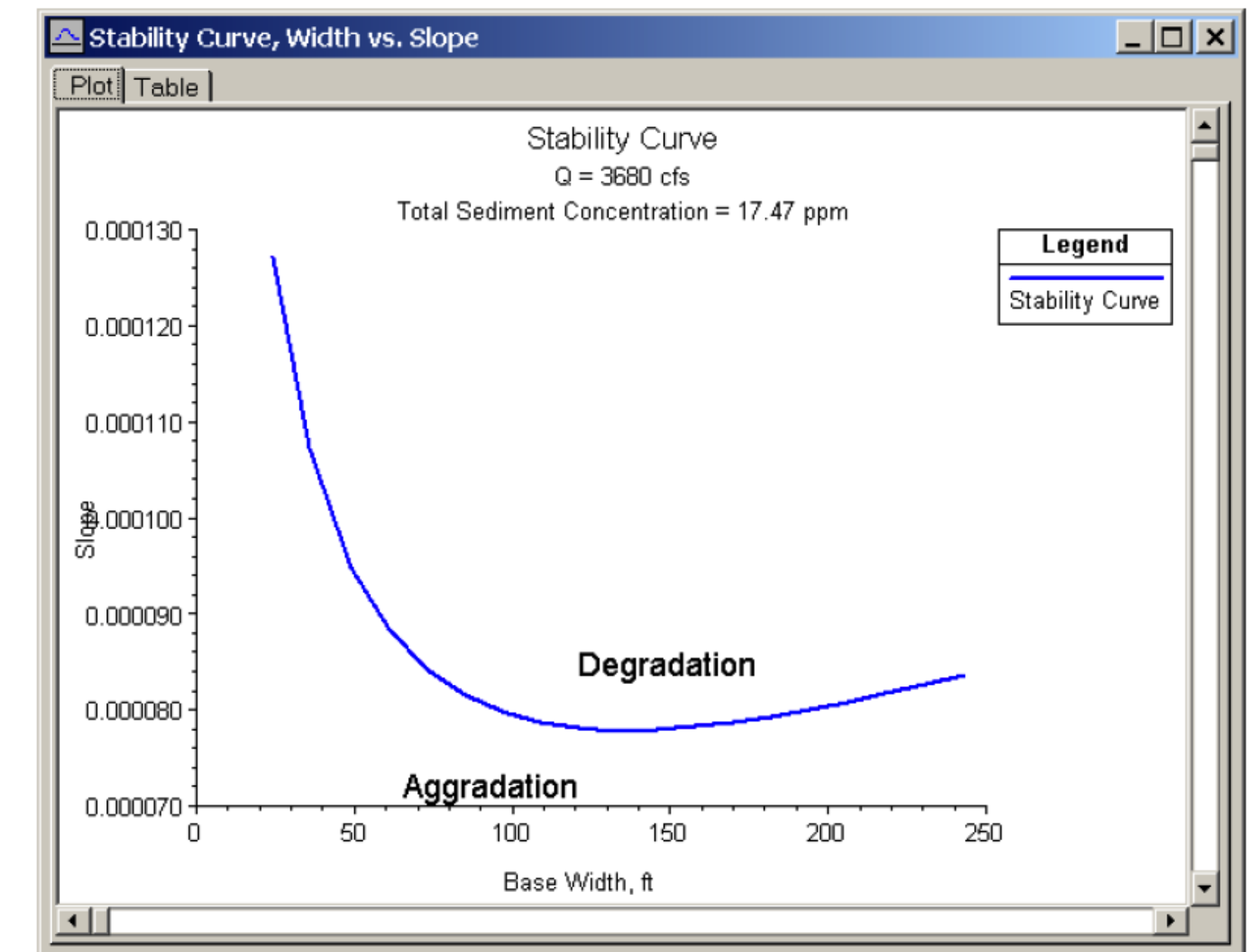
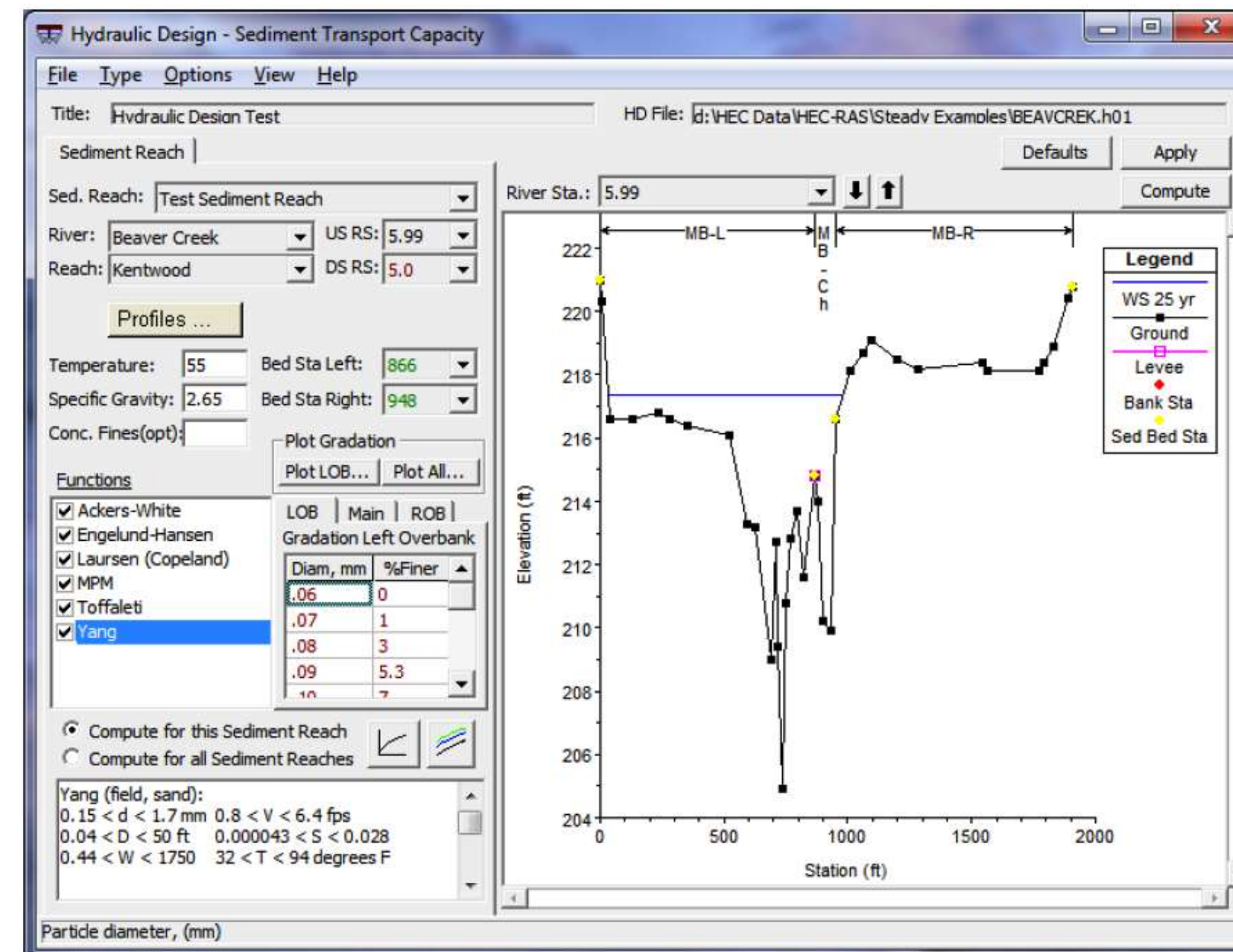


Figure 13-9. Stability Curve

Interface d'attribution des caractéristiques de capacité de transport d'une section (gauche) et courbe d'équilibre entre érosion et aggradation résultant (droite). (HEC-RAS User's Manual – 2021)

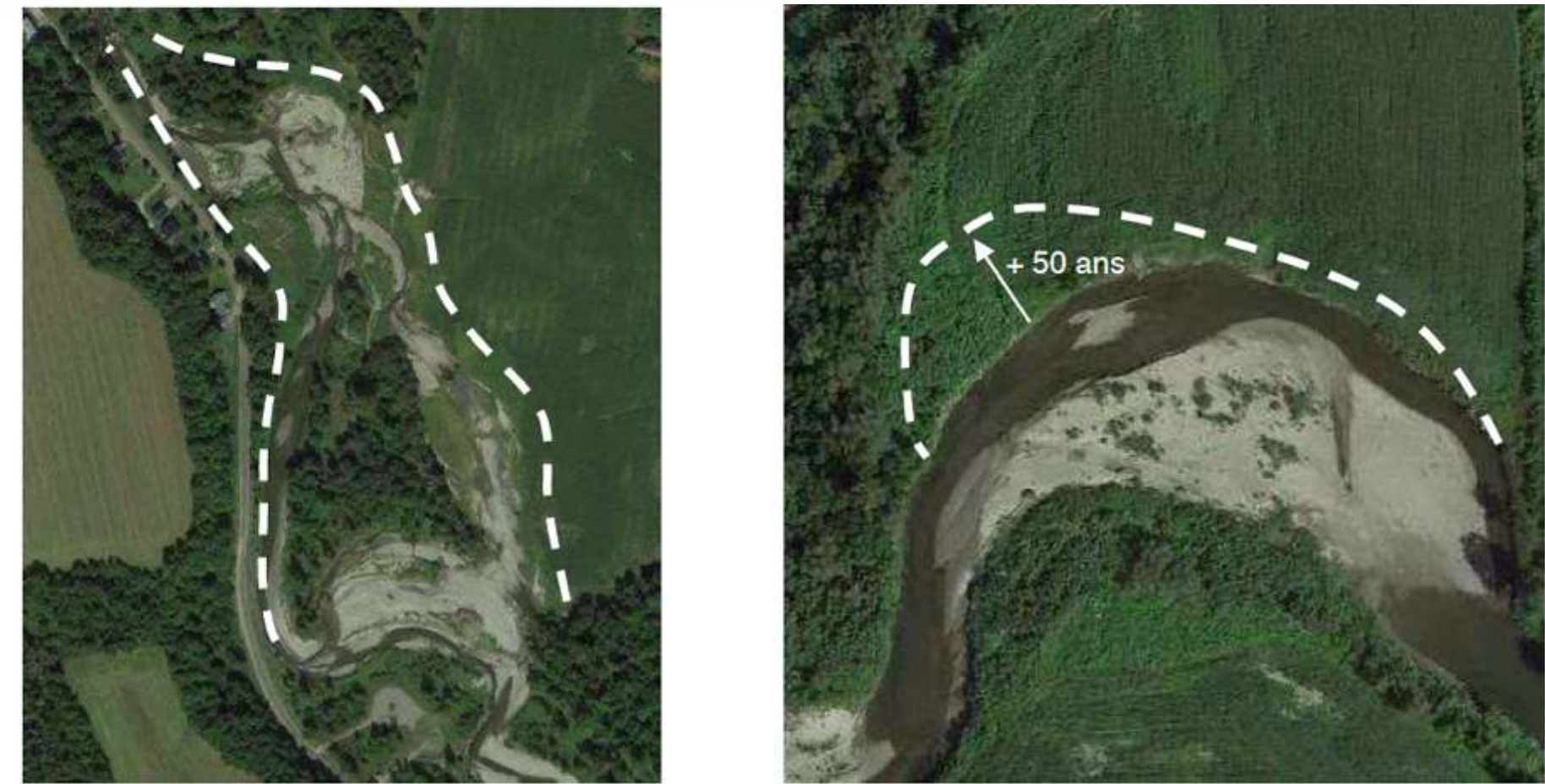
Données et méthodologies – Modélisation géomorphologique

Données.

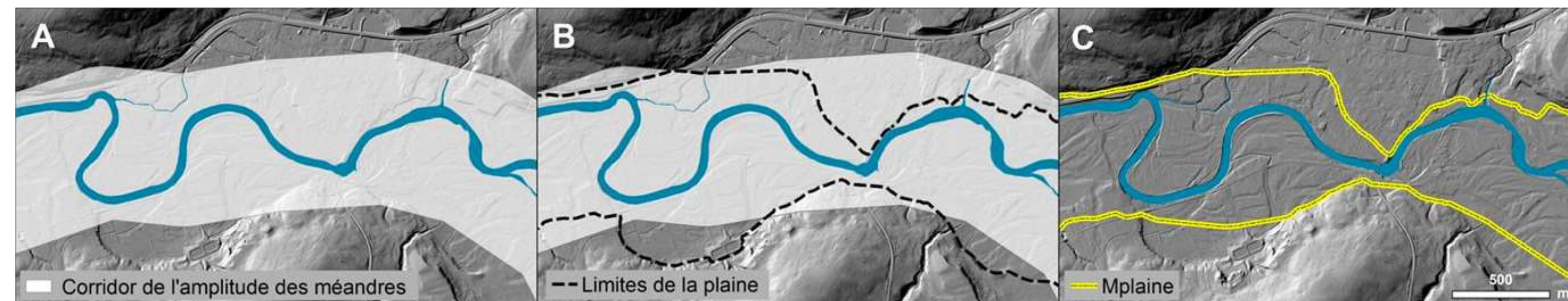
- Imagerie satellitaire actuelle et rétrospective
- Matrice lidar actuelle et rétrospective

Méthodologie.

- Analyse des styles fluviaux
- Étude des modèles d'érosion (incision régressive, avulsion, cônes alluviaux, ...)
- Extrapolation du processus d'érosion
- Corridor de migration et plaine alluviale (croisement)



Extrait de présentation « Développement d'outils pour la cartographie territoriale des zones inondables (Colloque su la sécurité civile 2018)



Exemple de processus de délimitation de la zone M_{plaine} pour un tronçon de la rivière Mitis. (Demers et col. 2017)

Données et méthodologies – Modélisation géomorphologique

Données – Analyse non probabiliste

Pouvant au moins partiellement être obtenues auprès des MRC.

- Imagerie satellitaire actuelle et rétrospective;
- Informations sur les enrochements passés et actuels (fichiers de forme);
- Espace de mobilité (M_{50}/M_{plaine});
- Simulation hydraulique des vitesses d'écoulement pouvant permettre d'identifier et/ou de confirmer les espaces mobiles.

Méthodologie

- Consultation sur l'identification de la localisation de l'aléa;
- Analyse géomatique des données existantes.

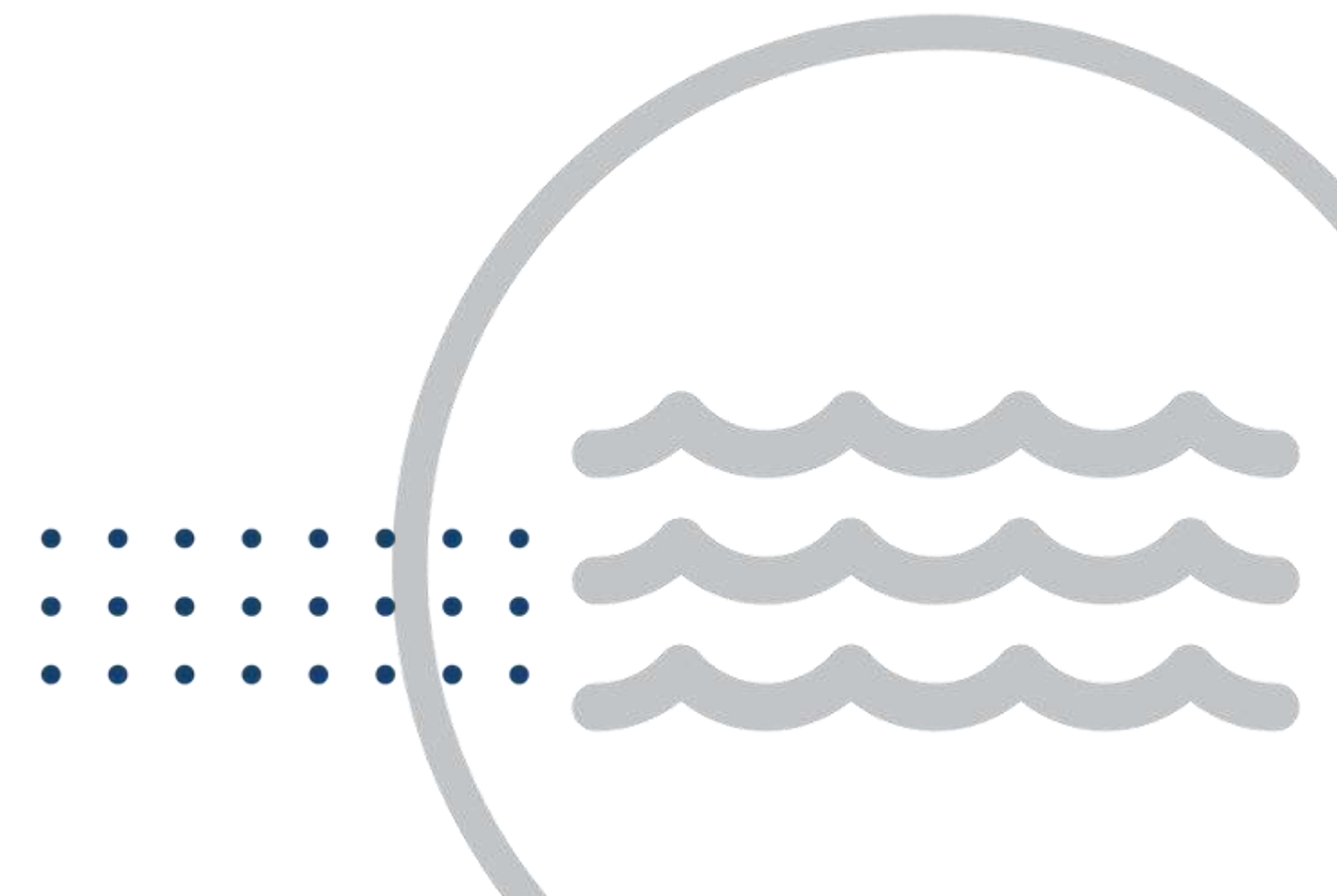


Table des matières



Théorie et outils existants

- Climatique
- Hydrologique
- Hydraulique
- Géomorphologique



Données et méthodologie

- Climatique
- Hydrologique
- Hydraulique
- Géomorphologique



Résultats et analyses

- Hydrologique
- Hydraulique
- Géomorphologique



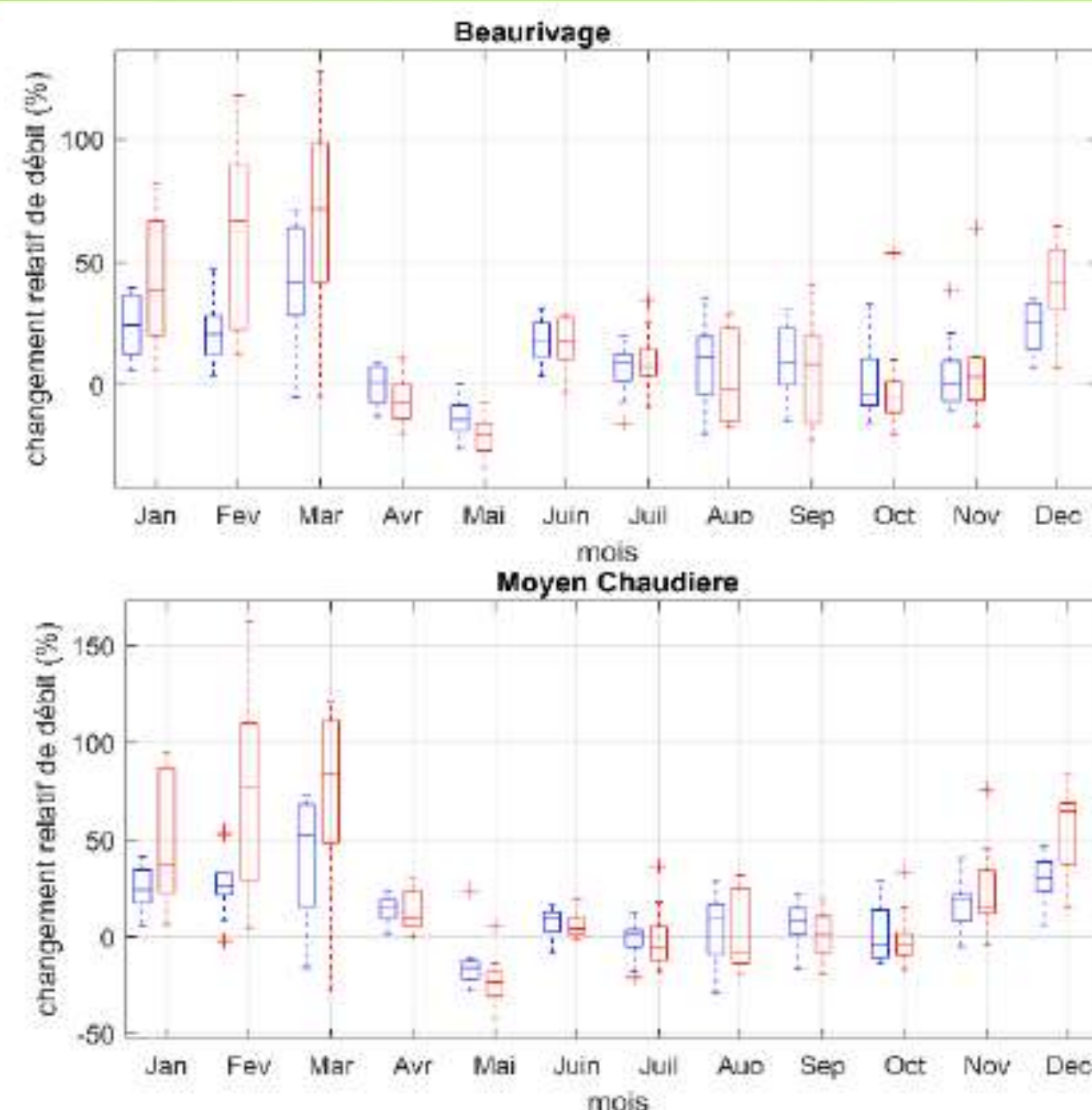
Conclusion; cibles et choix des outils

Résultats et analyse – Modélisation hydrologique

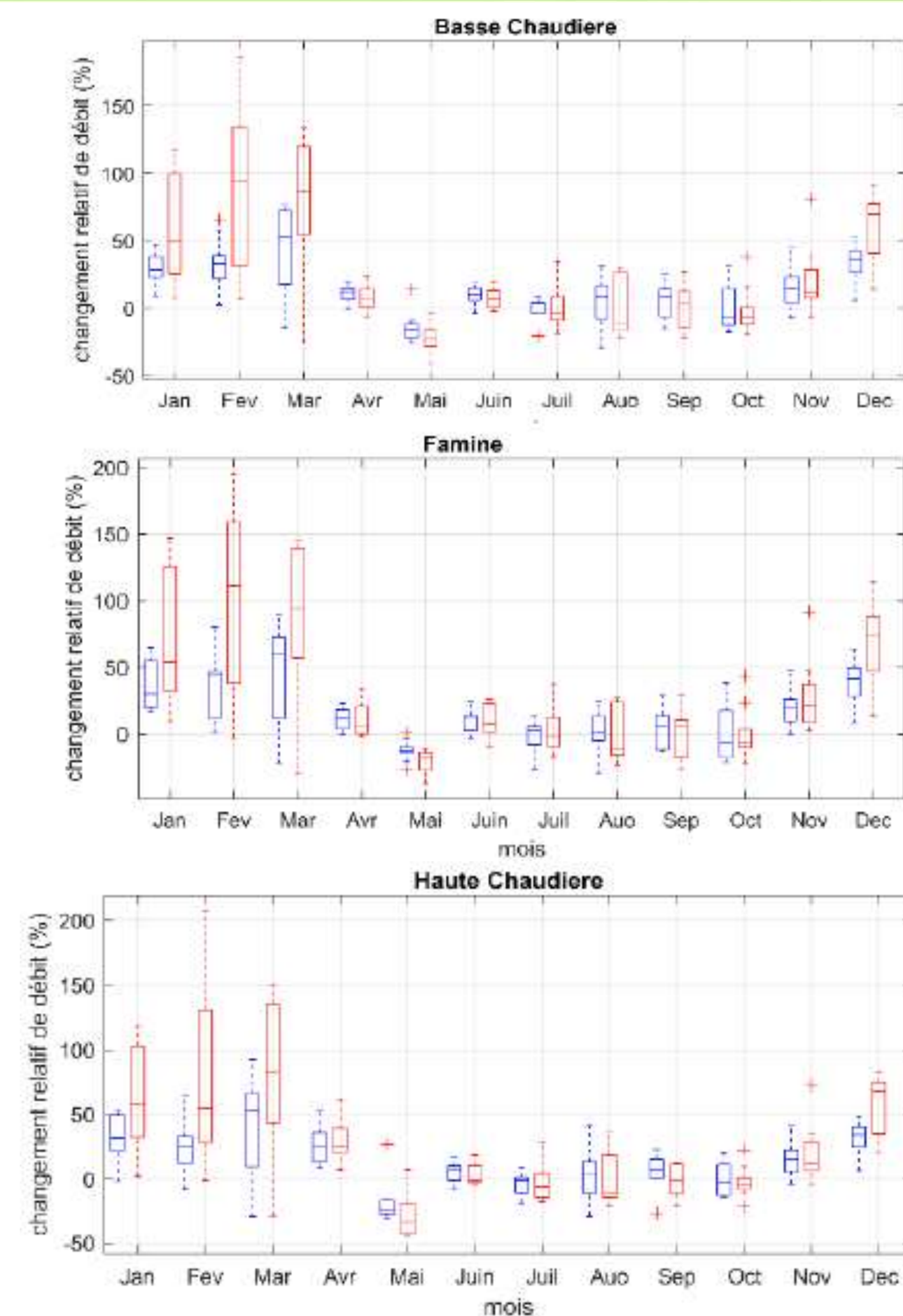
Résultats et analyse (modélisation déterministe et fréquentielle).

Traitement statistique et fréquentiel des données de débit en sortie de bassin-versant (moyens, maximums, annuels ou saisonniers) :

- Analyse statistique annuelle et saisonnière;
- Analyses de distributions fréquentielle (Gumbel, Loi log normale, Log Pearson III, ...);
- Valeurs de débit maximums par période de retour, horizon et scénario RCP;
- Calcul des médianes, 10^e et 90^e percentiles (considérées pour l'analyse de sensibilité des scénarios CC).



Variation saisonnière relative (par rapport à la période de référence) des débits mensuels des sous-bassins versants pour l'horizon H1 (2021-2050) en bleu et H2 (2041-2070) en rouge. (Leconte et Bizhanimanzar, 2020)

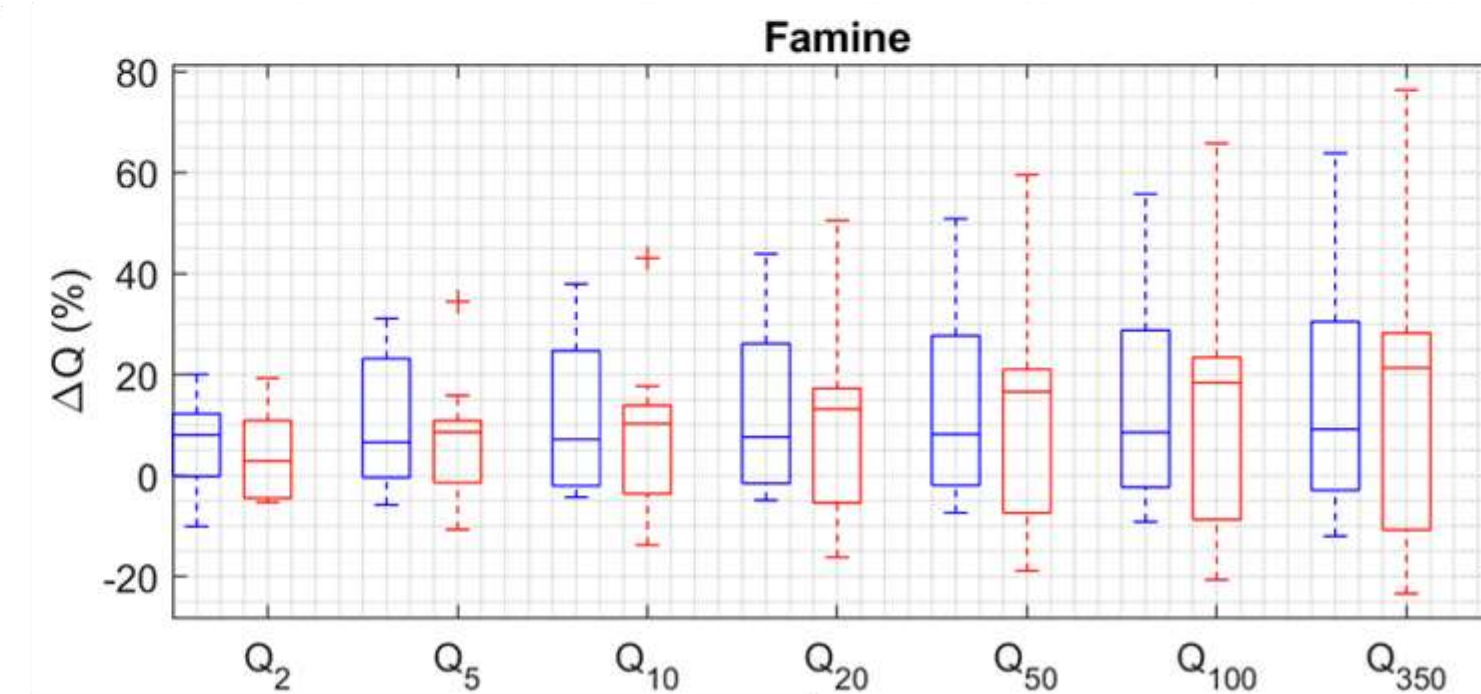
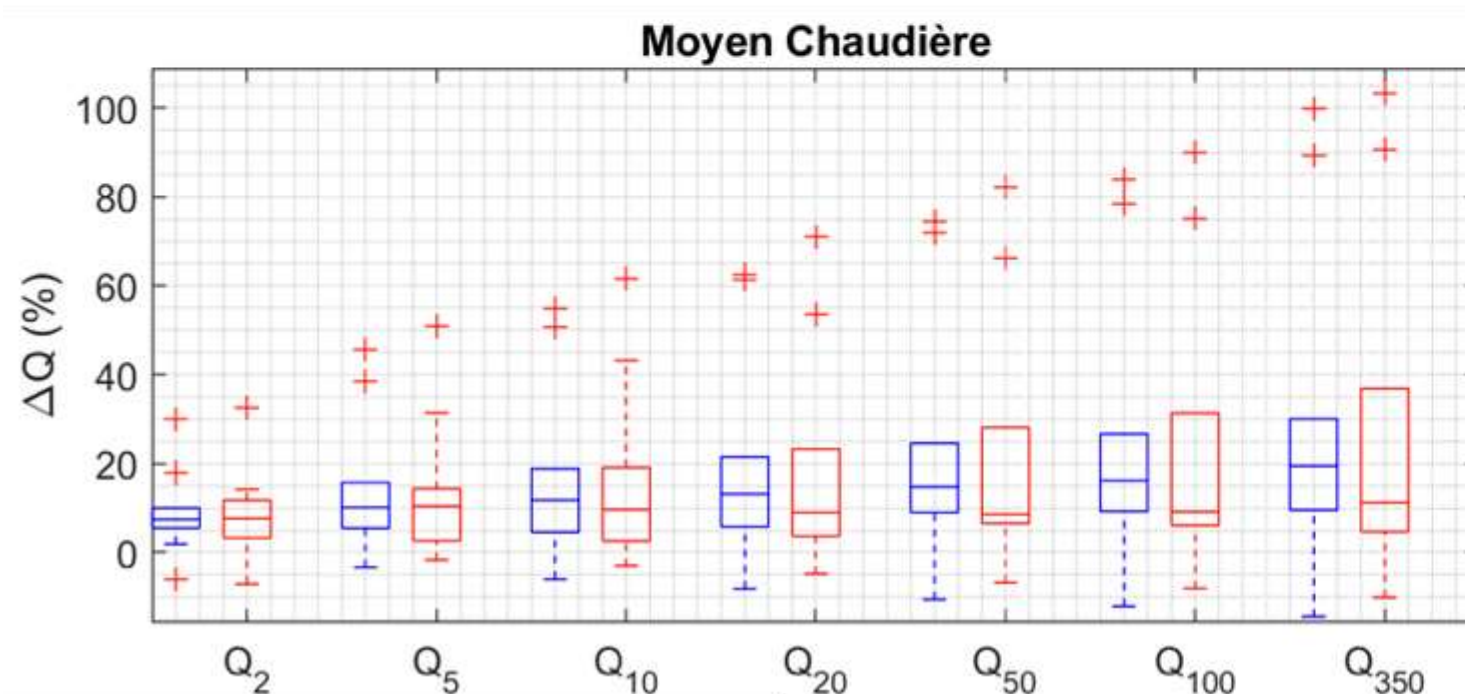
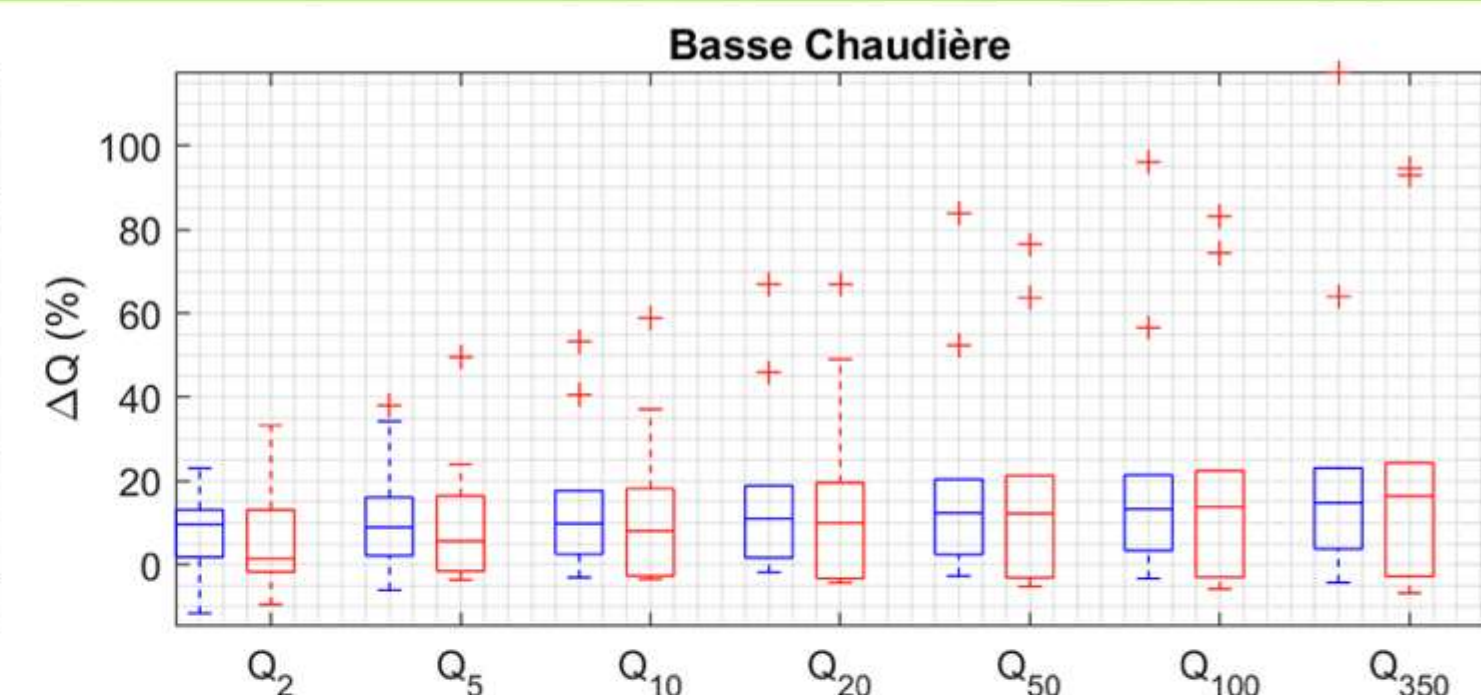
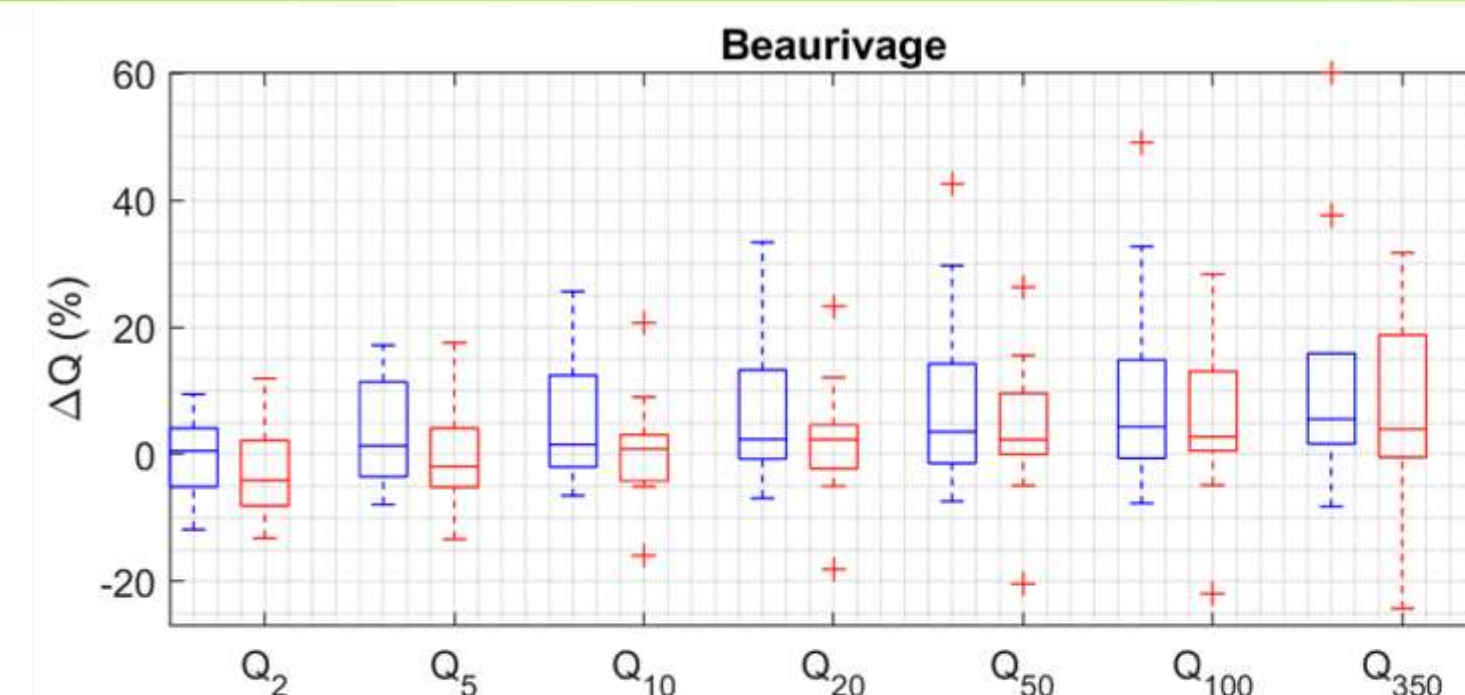


Résultats et analyse – Modélisation hydrologique

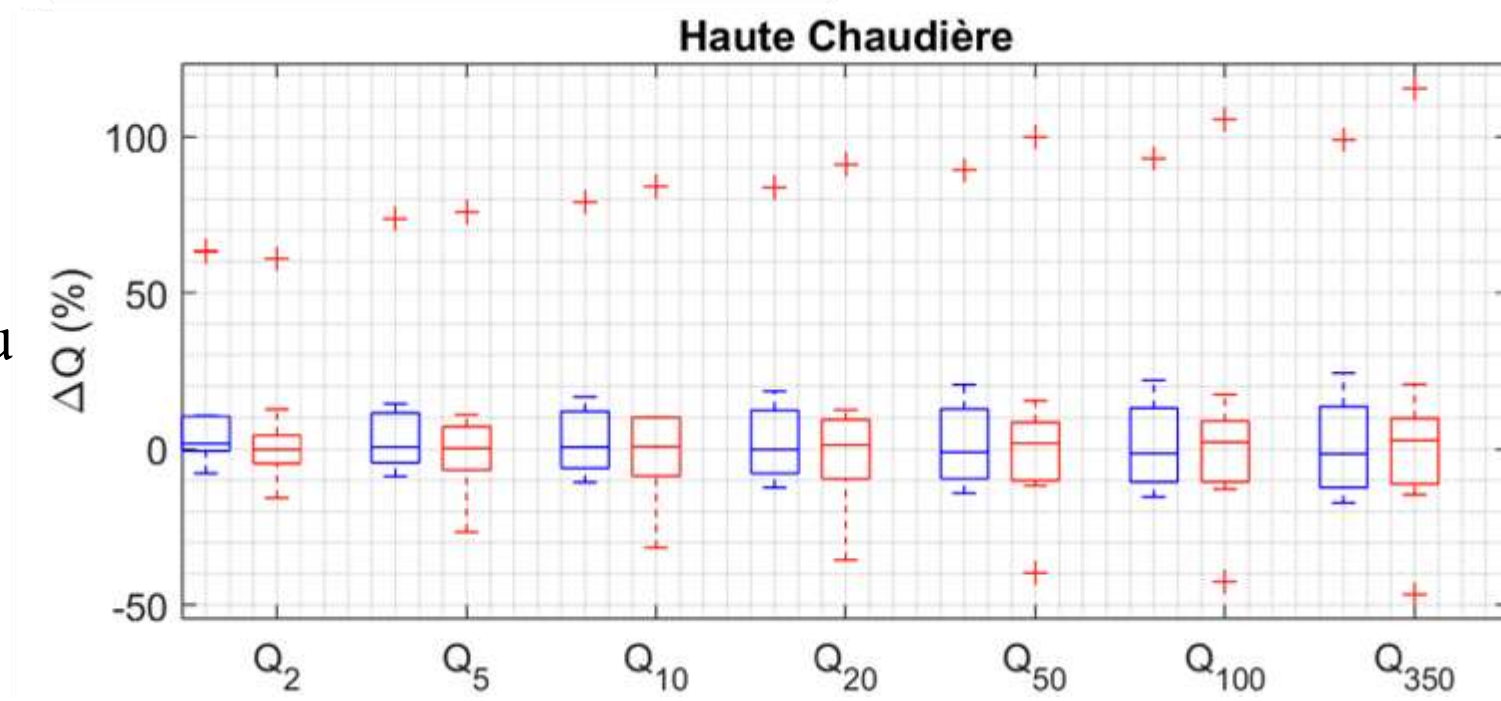
Résultats et analyse (modélisation déterministe et fréquentielle).

Traitement statistique et fréquentiel des données de débit en sortie de bassin-versant (moyens, maximums, annuels ou saisonniers) :

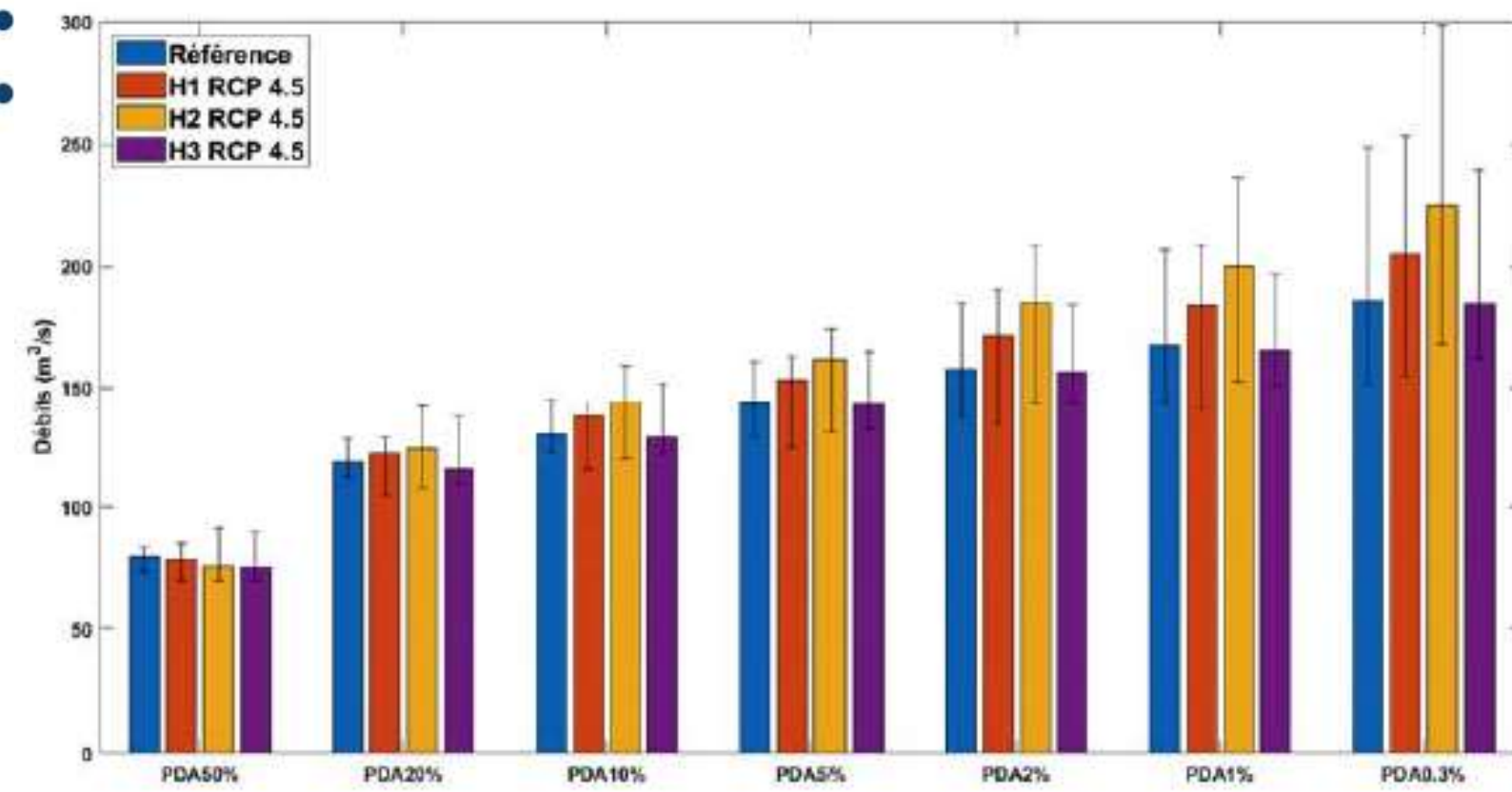
- Analyse statistique annuelle et saisonnière; saisonnière;
- Analyses de distributions fréquentielle (Gumbel, Loi log normale, Log Pearson III, ...); ...);
- Valeurs de débit maximums par période de de retour, horizon et scénario RCP;
- Calcul des médianes, 10^e et 90^e percentiles percentiles (considérées pour l'analyse de sensibilité des scénarios CC).



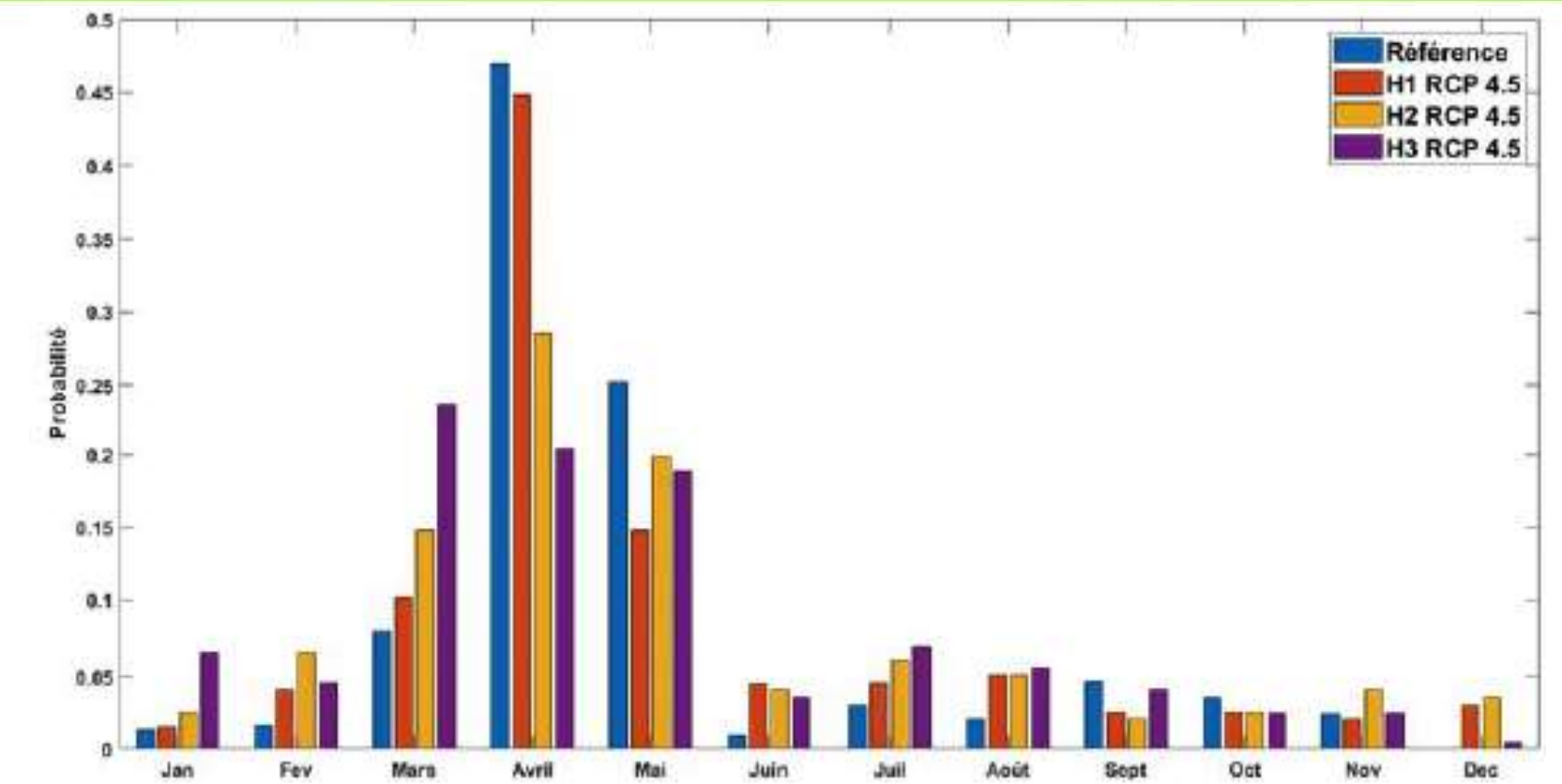
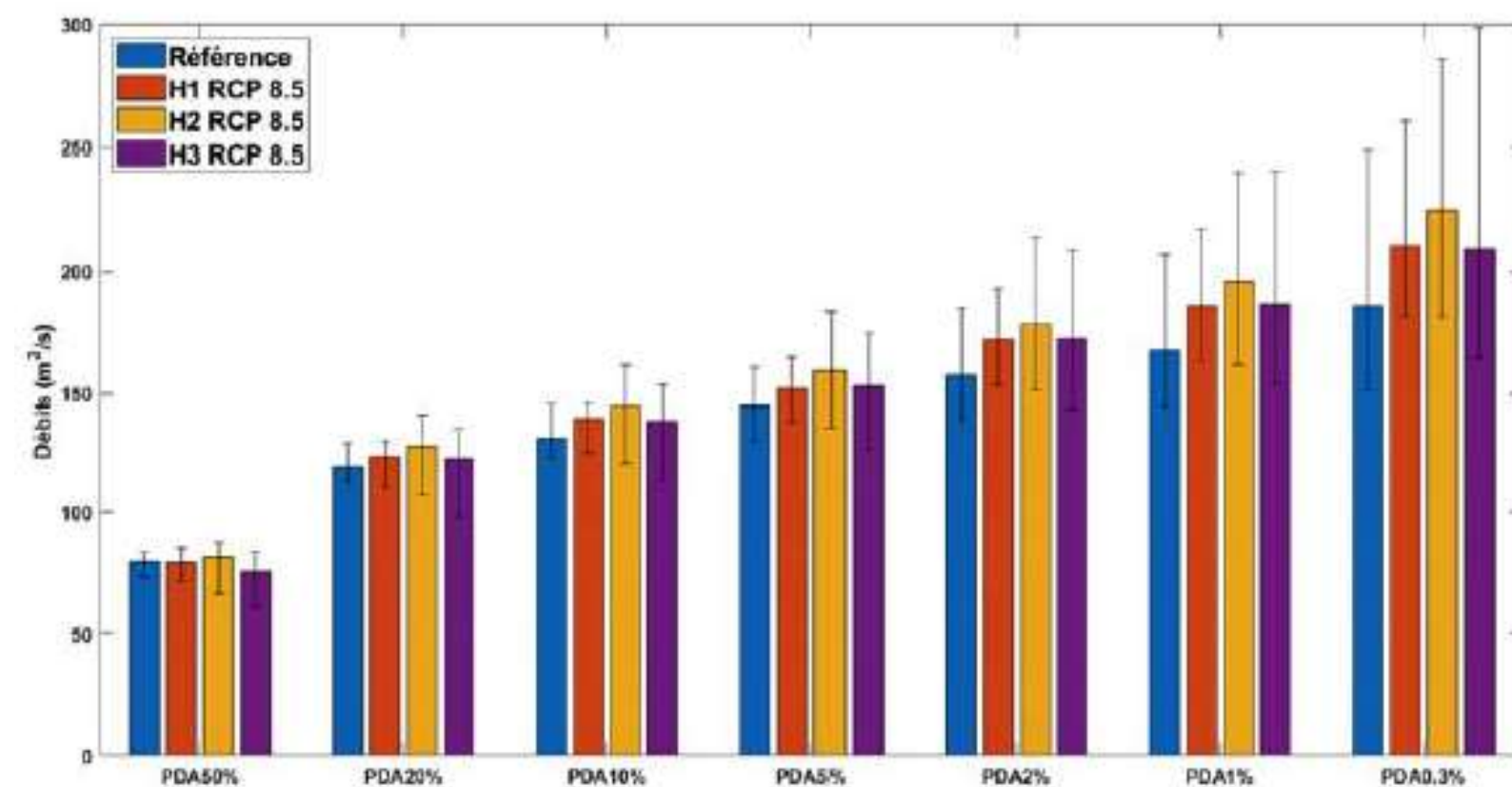
Variation de l'amplitude des débits des crues des sous-bassins par rapport à la période de référence pour l'horizon H1 (2021-2050) en bleu et H2 (2041-2070) en rouge. (Leconte et Bizhanimanzar, 2020)



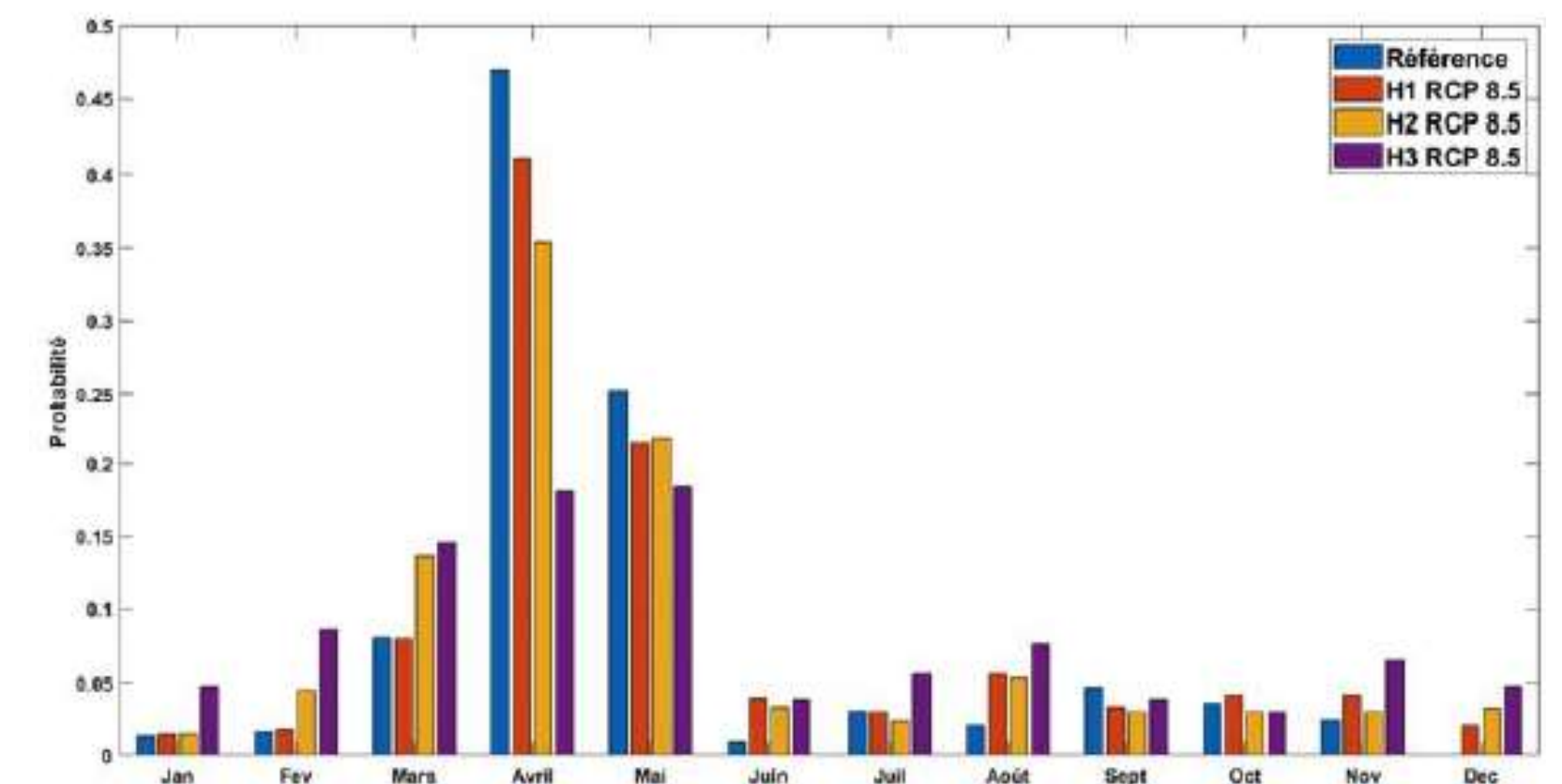
Résultats et analyse – Modélisation hydrologique



a)



a)



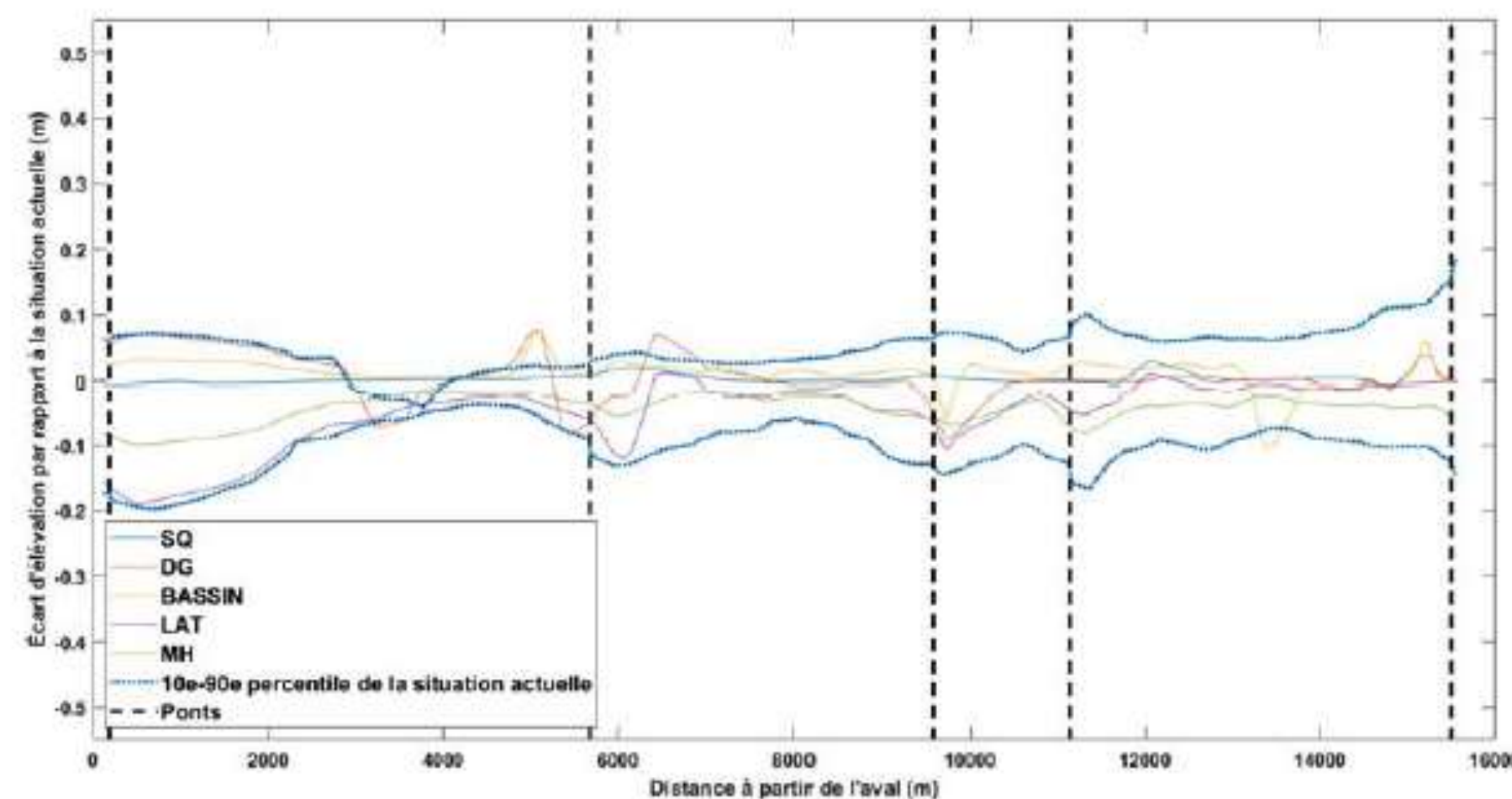
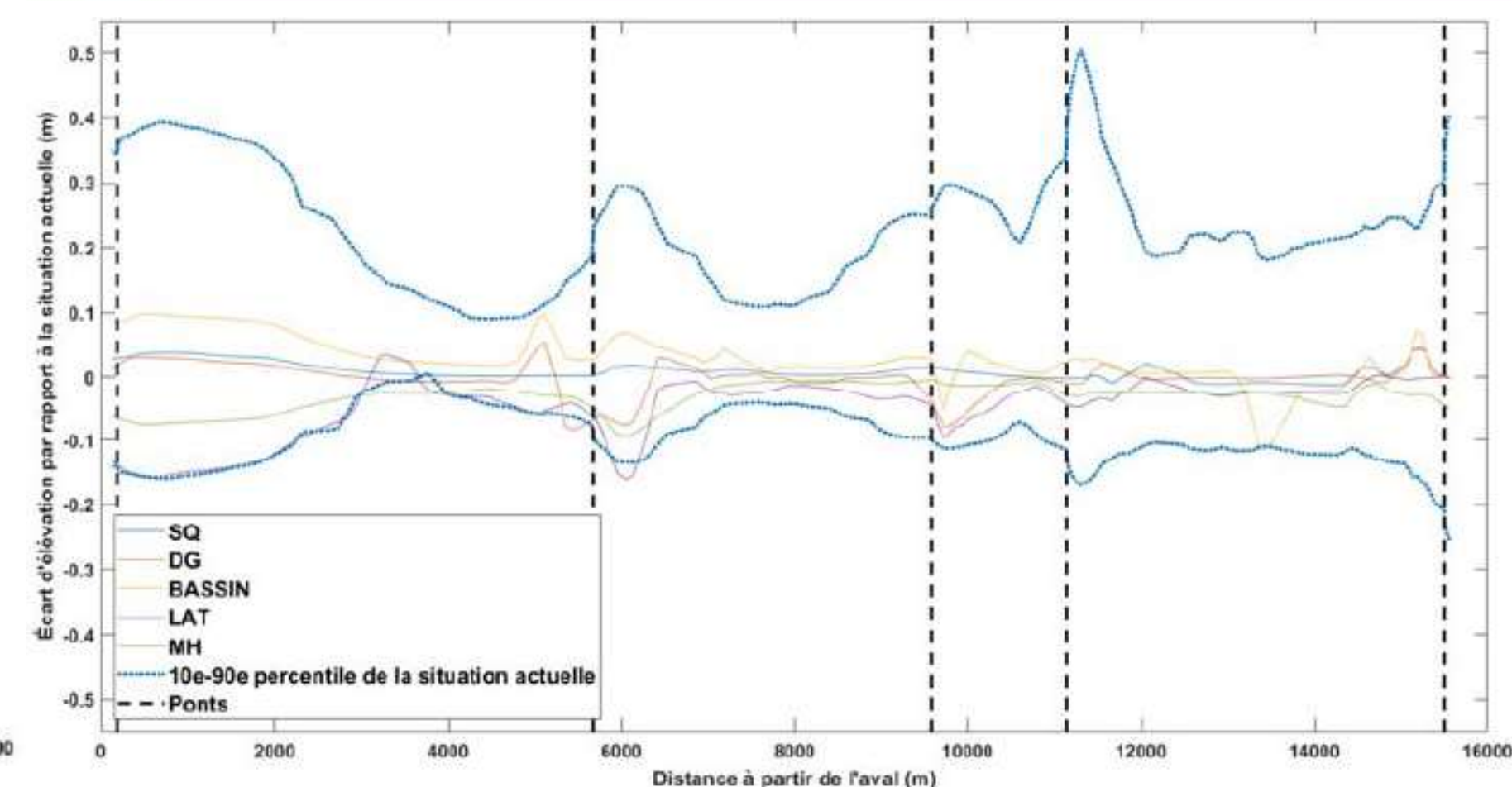
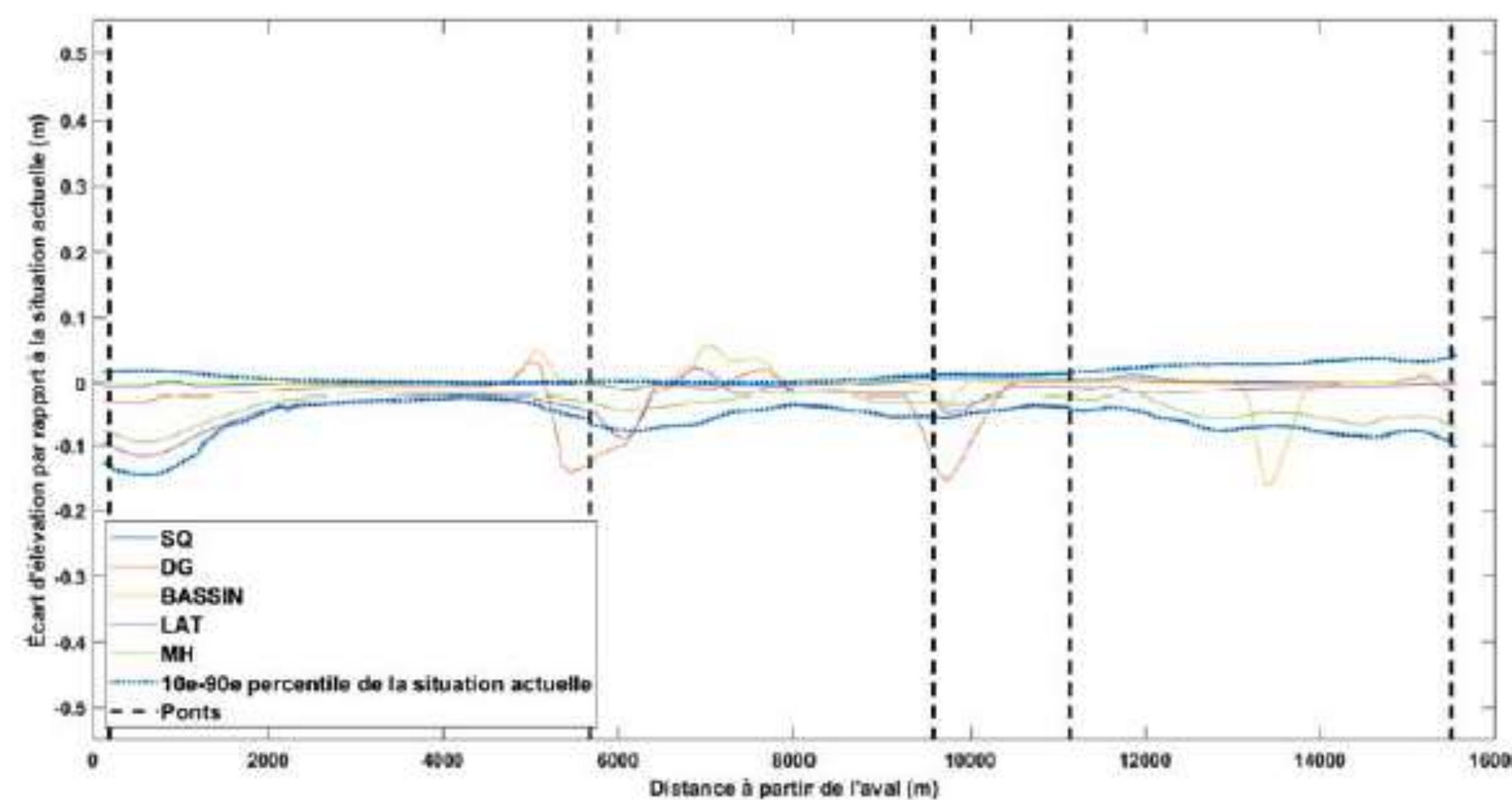
PDA pour les différents horizons pour a) RCP 4.5 et b) RCP 8.5. Les barres d'erreur représentent les 10e et 90e percentile de l'ensemble de PDA calculées. (Trudel et Gobji, 2020)

Probabilité d'occurrence du maximum selon les mois a) RCP 4.5 et b) RCP 8.5. (Trudel et Gobji, 2020)

Résultats et analyse – Modélisation hydraulique

Résultats et analyse (1D/2D).

- Analyse comparative des niveaux d'eau par rapport au SQ et à l'horizon de référence
- Identification longitudinale des zones de débordement

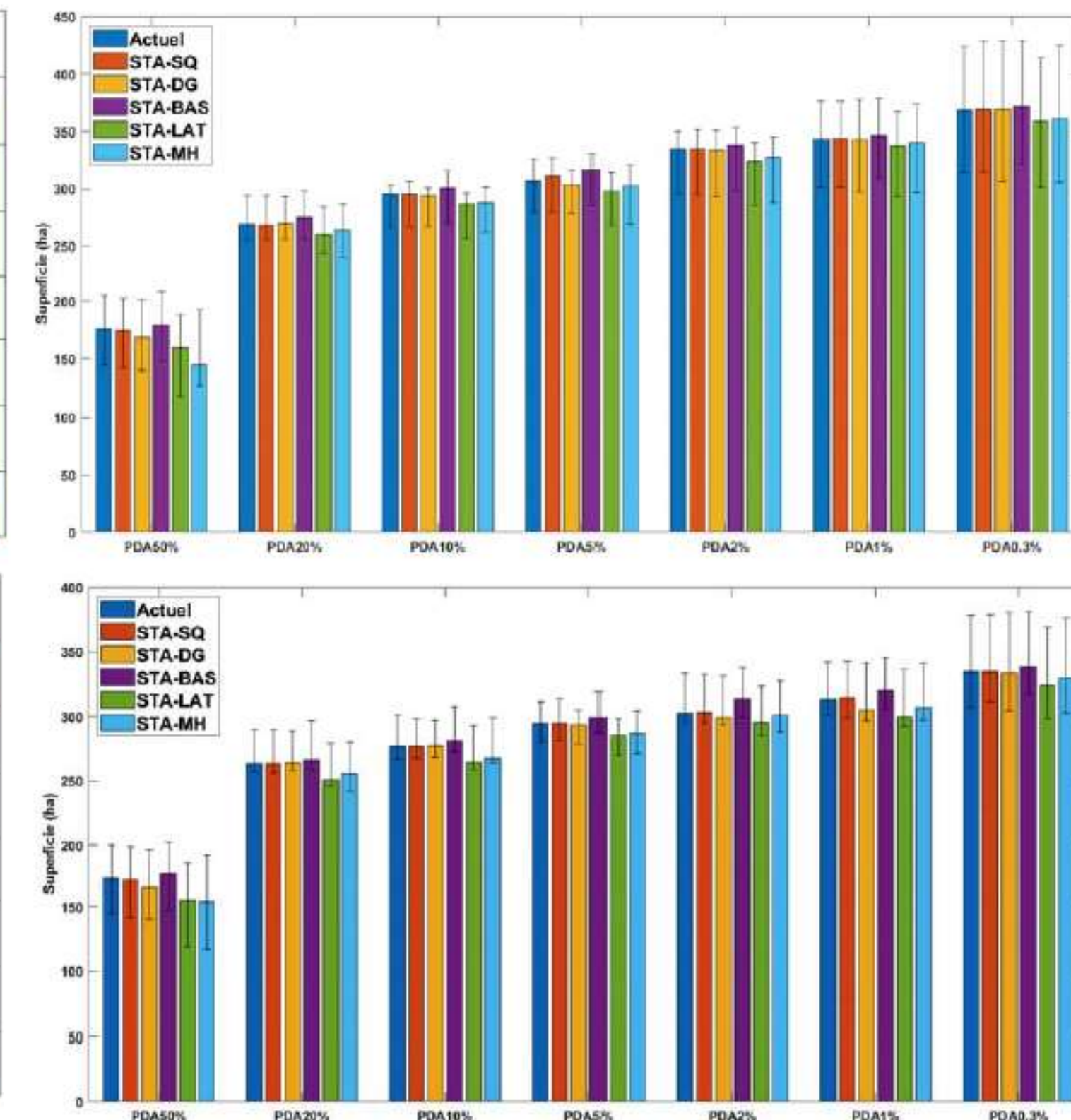
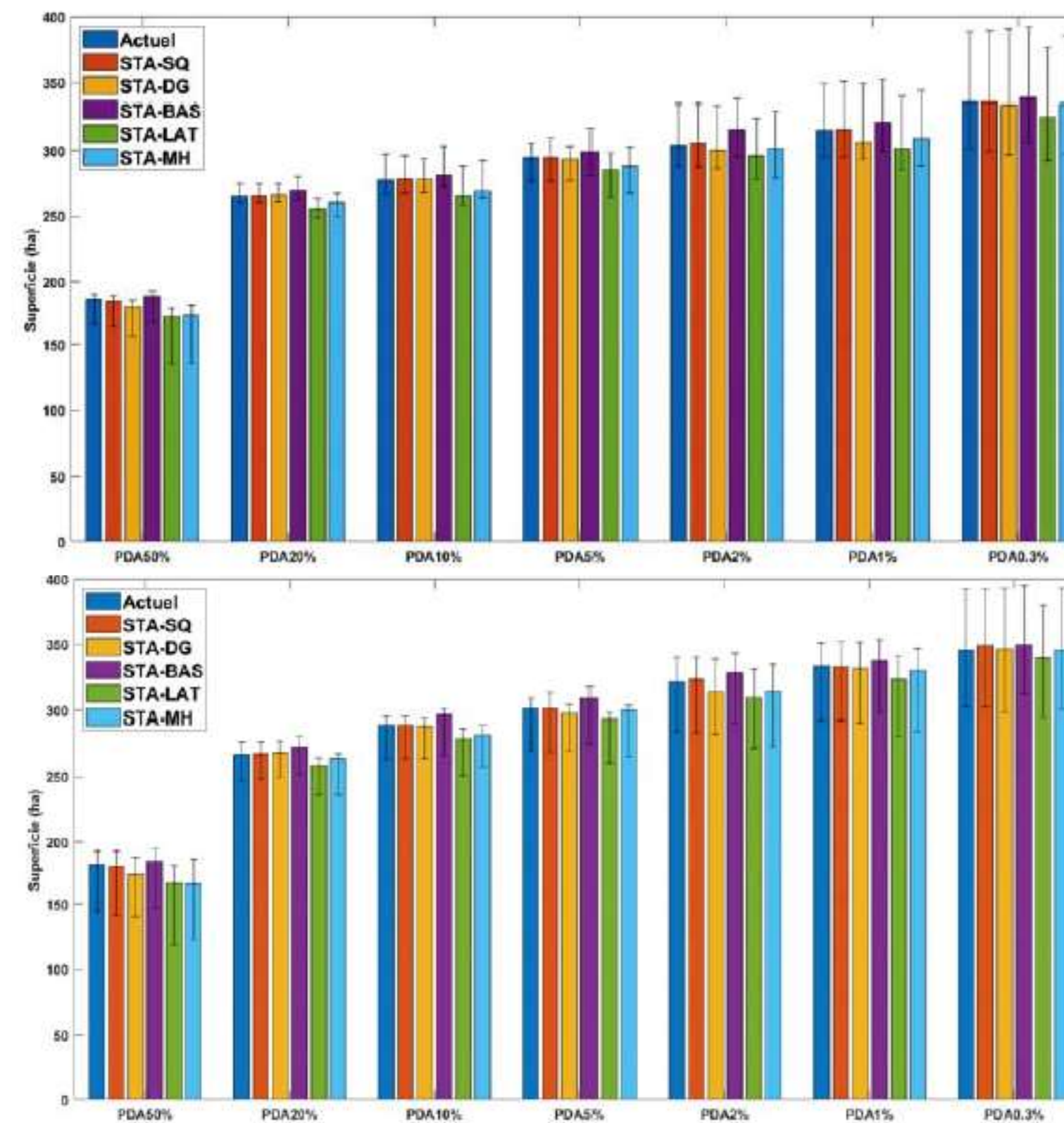


Écart de niveau d'eau par rapport à la situation actuelle pour a) une PDA de 50%, b) une PDA de 5% et c) une PDA de 1%. (Trudel et Gobji, 2020)

Résultats et analyse – Modélisation hydraulique

Résultats et analyse (1D/2D).

- Analyse comparative des niveaux d'eau par rapport au SQ et à l'horizon de référence
- Identification longitudinale des zones de débordement
- Analyse comparative des surfaces submergées
- Couches matricielles de profondeur d'eau correspondantes
- Vecteurs vitesse



Superficie de la plaine inondable pour différentes PDA et stratégies pour a) la période de référence, b) l'horizon 1, c) l'horizon 2 et d) l'horizon 3 (Depuis Trudel et Gobji, 2020)

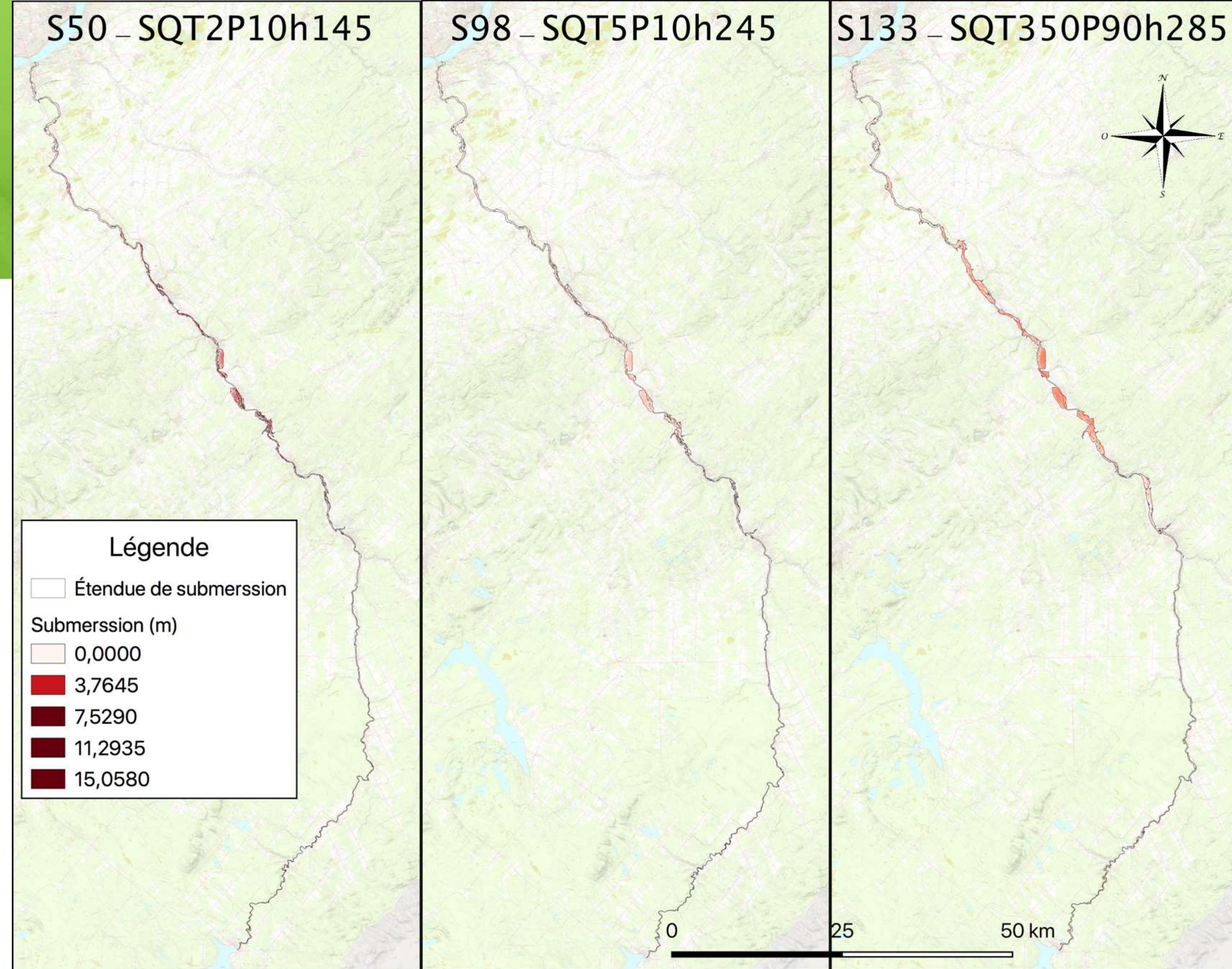
Résultats et analyse – Modélisation hydraulique

Résultats et analyse (géostatistique).

- Une gdb contenant les couches d'altitude de niveau d'eau
- Une gdb contenant les couches de submersion nettoyées
- Une gdb contenant les polygones d'étendue de submersion

Erreur moyenne d'environ 20 cm <> large <> large échelle

Analyse comparative par dénombrement dénombrement et quantification des impacts

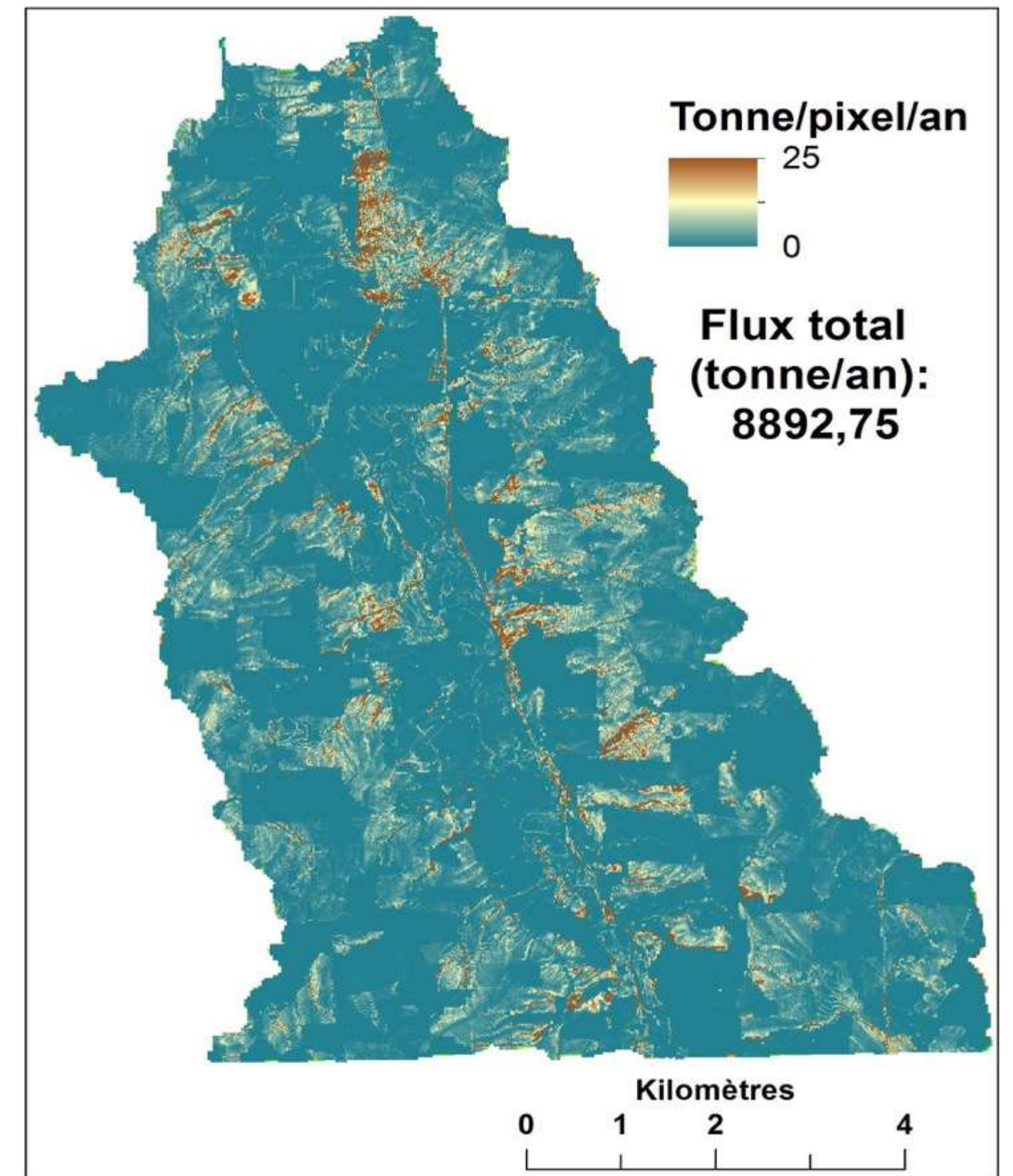
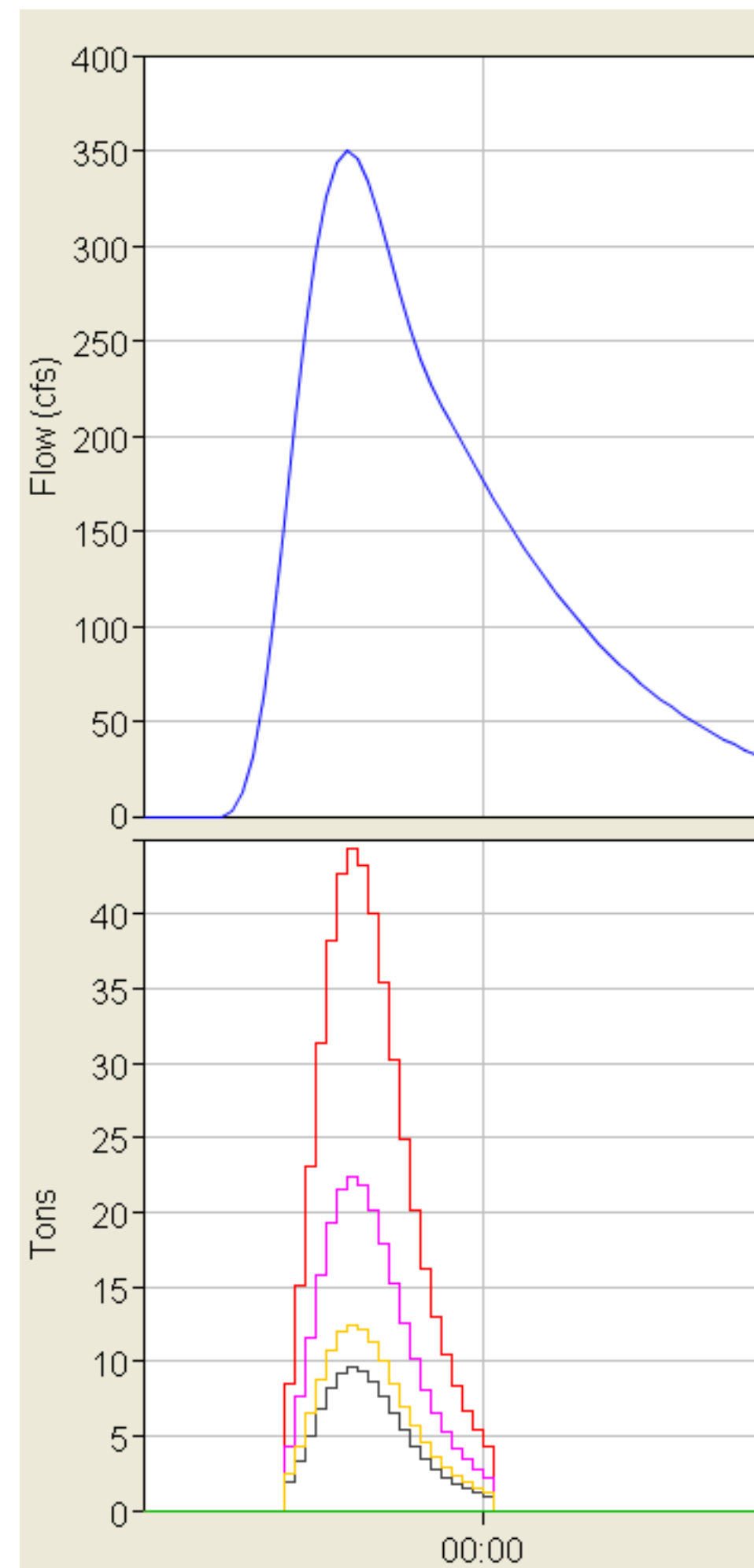


Exemple de cartes de submersions produites à l'aide de la méthode géostatistique (Boyer et col. 2021)

Résultats et analyse – Modélisation géomorphologique

Résultats et analyse (statique / hydrologique).

- (statique) Répartition des charges et flux sédimentaires sur les versants; identification des secteurs problématique (cônes alluviaux, épaisseur des sols ...)
- (hydrologique) Suivi à l'exutoire des sous bassins versants des charges et flux sédimentaires projetés.
- Sédimentation des ouvrages;
- ...



Décharge sédimentaire au cours d'une crue test (gauche; Gibson et al. 2011); zonage et quantification des flux sédimentaires sur les versants de la rivière Coaticook (haut; Boyer-Villemare et col. 2021).

Résultats et analyse – Modélisation géomorphologique

Résultats et analyse (hydraulique).

- Charge et capacité de transport sédimentaire à chaque section;
- Zones d'accumulation;
- Zones de décrochement;
- Transport cumulatif (perte nette sur la section);
- Evolution morphologie du lit;
- ...

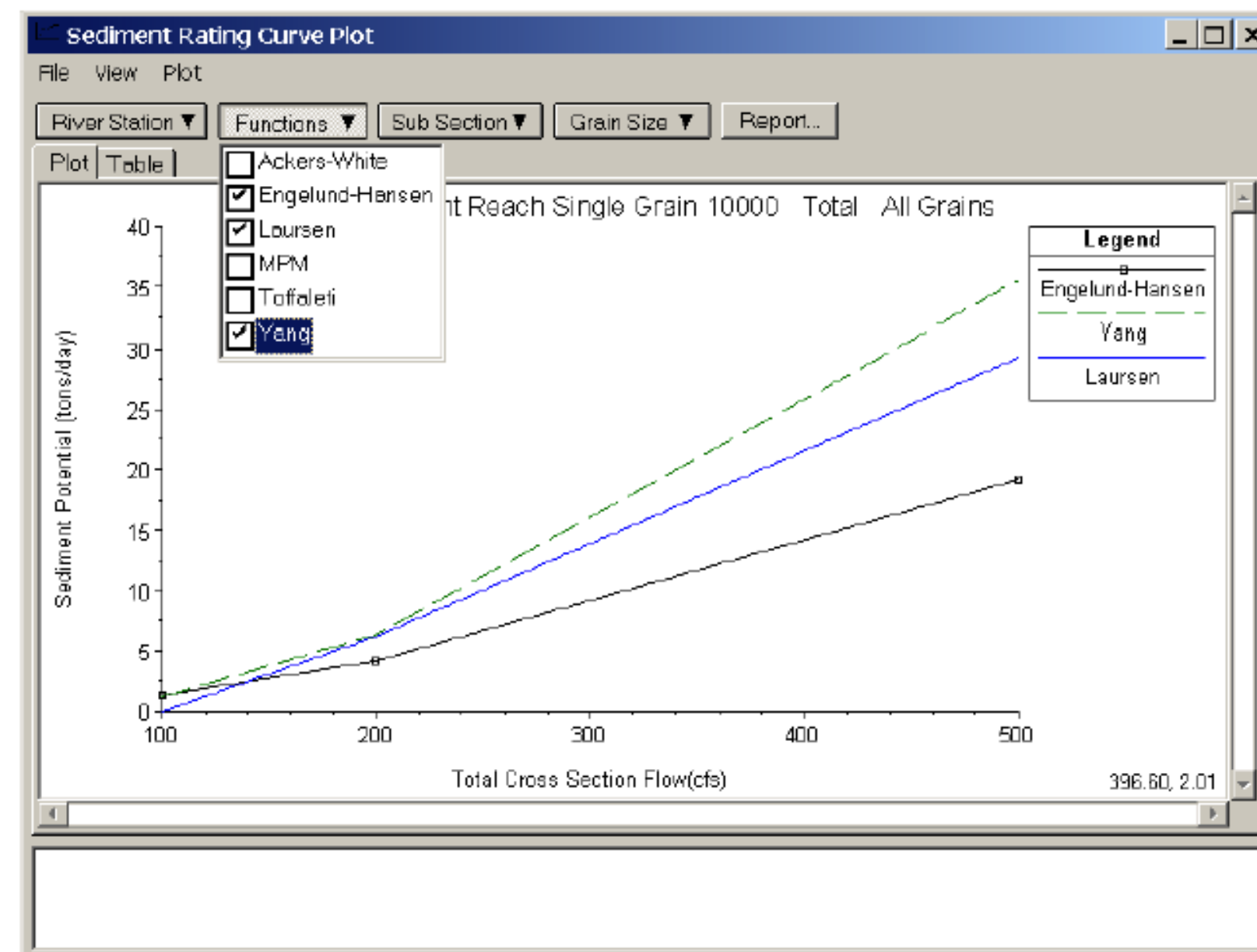
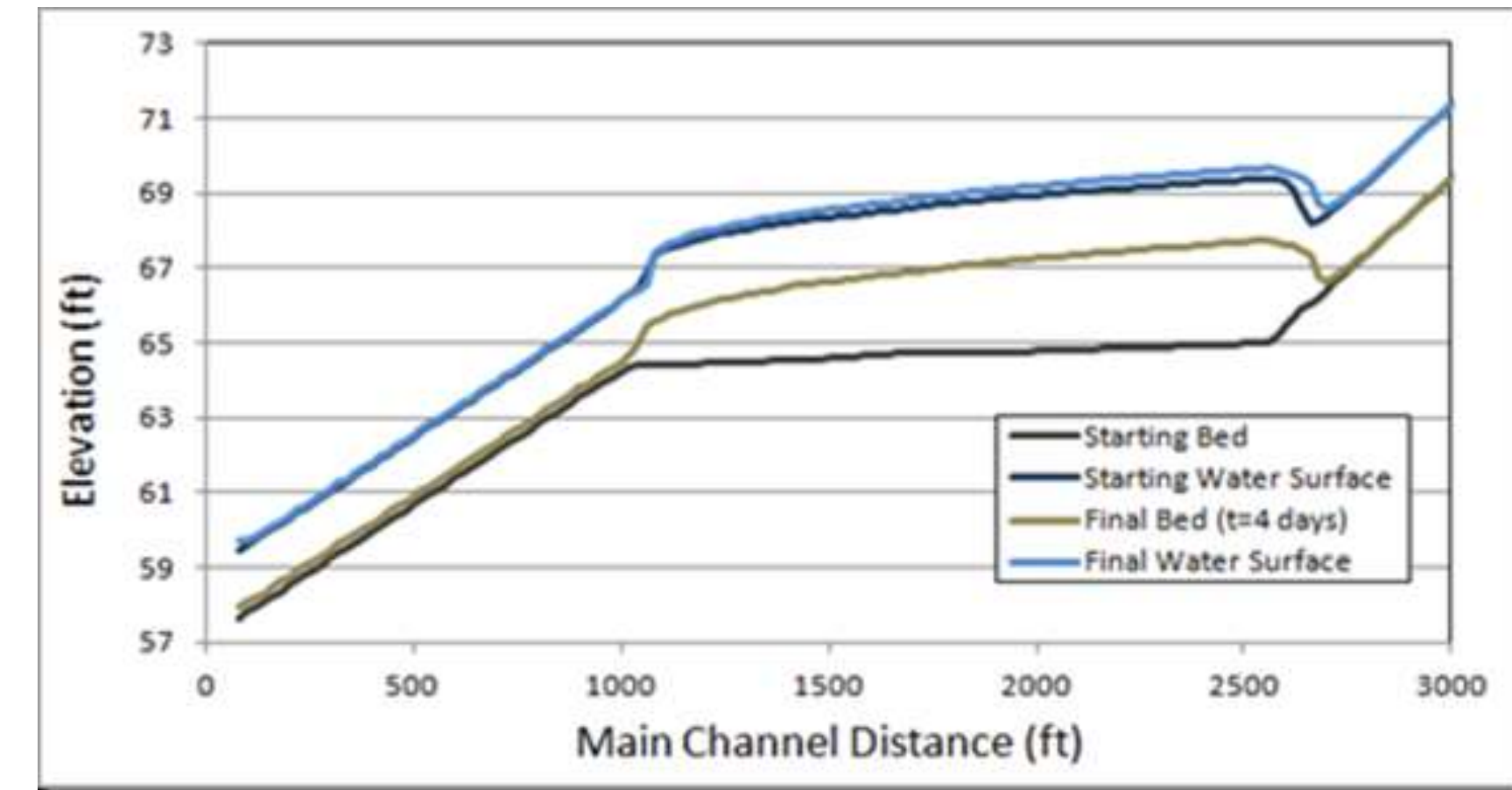


Figure 13-13. Sediment Transport Capacity Rating Curve



Évolution des la capacité de transport sédimentaire le long du bief étudié (gauche); évolution du début à la fin de la simulation (transitoire) de l'élévation du lit de la rivière (HEC-RAS User's Manual – 2021)

Résultats et analyse – Modélisation géomorphologique

Résultats et analyse (espace de mobilité).

- Zonage des espaces exposée’;
- Approche par probabilité d’occurrence annuelle;
- Quantification (ou estimation) possible des taux d’érosion annuels (10 ans, 50 ans, ...) si couplé avec suivi.

Résultats et analyse (non probabiliste).

- Connaissance des berges (parcelles) vulnérables immunisées;
- Identification des zones vulnérables à forte probabilité d’érosion à courte échéance;
- Identification linéaire des taux d’enrochement et quantification économique des enrochements anticipés.

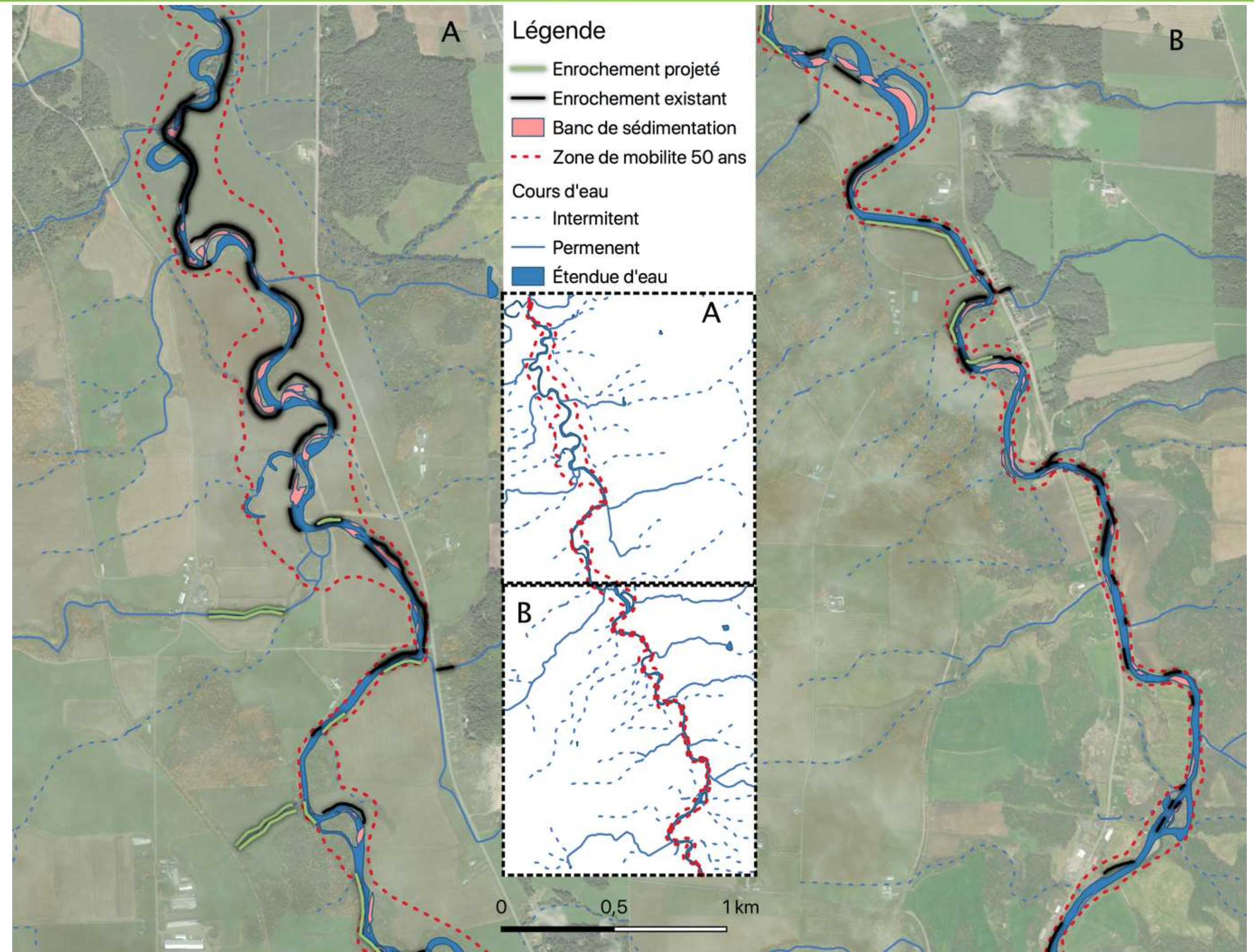


Table des matières



Théorie et outils existants

- Climatique
- Hydrologique
- Hydraulique
- Géomorphologique



Données et méthodologie

- Climatique
- Hydrologique
- Hydraulique
- Géomorphologique



Résultats et analyses

- Hydrologique
- Hydraulique
- Géomorphologique



Conclusion; cibles et choix des outils

Conclusion, cibles et choix de l'outil

Plusieurs éléments doivent être considérés dans le choix des outils.

- L'aléa étudié : Risques d'inondation // Risques d'érosion
- Cibles d'étude de l'étude : Analyse événementielle ou analyse fréquentielle
- Solutions étudiés : Stratégies d'aménagement; pratiques et réglementation // Étude d'impact et d'efficacité de la mise en œuvre d'une infrastructure verte ou grise (immunisation, contrôle de l'aléa)
- Échelle d'étude et résolution souhaitée.

Autres considérations importantes

- Informations et outils existants
- Optimisation des efforts : temps de travail, puissance de calcul, possibilité de faire du terrain.

De l'importance d'arrimer les choix en amont de l'analyse économique; d'où on part, où va-t-on; quels efforts déployer ?

Conclusion, cibles et choix de l'outil

Modélisation hydrologique

	Modélisation déterministe fréquentielle	Atlas hydroclimatique
Besoin en informations	<ul style="list-style-type: none"> • Topographie (lidar / MNT) • Occupation du sol • Pédologie • Chroniques climatiques • Chroniques débitométriques (événement de référence) 	<ul style="list-style-type: none"> • Aucunes
Usage	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation événementielle (transitoire) • Étude de l'impacte de solutions d'aménagements sur le ruissellement • Étude de l'effet des réservoirs et de leur gestion sur le débit. • Analyse de la qualité et de la quantité des échanges entre les réservoirs • Analyse des débits de récurrence et de leur évolution en contexte de CC (si couplé). 	<ul style="list-style-type: none"> • Débits maximaux de récurrence (statique) • Cartographie des zone inondables à différentes échelle • Analyse des tendances en hydrologie quantitative par cours d'eau/bief
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Large gamme de précision (processus) et de résolution (temporelle et spatiale) • Capte les effets des changements d'occupation du sol ou, de manière limité, de gestion des réservoirs. • Nombreuses possibilités d'application et d'usages (extrants souhaités, ...) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne nécessite pas de puissance de calcul • Intègre déjà le informations sur les changements climatiques et leur analyse fréquentielle (hydroclimatologie) • Méthode clé en main; paramétrisation minimale
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Nombre de paramètres et d'information; lourdeur de déploiement. • Processus de calibration • Demande de fortes puissances de calcul suivant la surface étudié. 	<ul style="list-style-type: none"> • Résolution et information sur la répartition du débit dans le chenal faible. • Aucune information sur le comportement de l'eau dans les versants (UHR; sous-BV) • Ne prends pas en compte la scénarisation de modification d'utilisation du territoire.

Conclusion, cibles et choix de l'outil



Modélisation hydraulique

	Modélisation 1D/2D	Modélisation géostatistique
Besoin en informations	<ul style="list-style-type: none"> • Campagnes bathymétriques • Relevés des ouvrages • Suivi de débits • Lidar • Données de calibration (mesurées) • Données issues de modélisation pluie/débit 	<ul style="list-style-type: none"> • Débit pixélisés au centre du chenal (méthode large échelle) • Couches de submersion associées Lidar • Données issues de modélisation pluie/débit
Usage	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation événementielle (transitoire) • Solutions structurelles 	<ul style="list-style-type: none"> • Débits maximaux annuels (permanent/statistique) • Solutions d'aménagement du territoire
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Précision (tridimensionnelle) et résolution (temporelle) • Capte les effets des structures hydrauliques sur le niveau • Modélisation 1D (chenal) 	<ul style="list-style-type: none"> • Déploie sur de très grandes surfaces • Méthode clé en main; paramétrisation minimale – Large échelle; ne nécessite pas de donnée bathymétrique (lit à une récurrence 2 ans; coefficient de rugosité constant dans le chenal principal)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Lourdeur du déploiement pour de petites surfaces (terrain, travail informatique) • Nécessite le montage et la calibration d'un modèle hydraulique • Développement circonscrit à une portion comprise entre deux points de mesure représentant les conditions aux limites amont et aval (peut nécessiter une modélisation séquentielle) 	<ul style="list-style-type: none"> • Erreur pouvant être importante localement et selon la récurrence étudiée. – Large échelle; Erreur quadratique moyenne de 20 à 30 cm. • Perte de l'information dans le chenal – Large échelle; lissée en fonction de la largeur du cours d'eau et la résolution du MNT. • Ne peut s'utiliser pour application réglementaire ou étude de génie.

Conclusion, cibles et choix de l'outil

Modélisation géomorphologique

	Modélisation des flux solides (trois méthodes)	Cartographie de l'espace de mobilité et suivi de l'érosion	Analyse non probabiliste
Besoin en informations	<ul style="list-style-type: none"> • Informations de l'équation RUSLE • Nature des sédiments (versants, berges, lit) • Si modélisé; mêmes besoins que pour un modèle hydrologique et/ou hydraulique • Campagnes de suivi des flux de sédiments 	<ul style="list-style-type: none"> • Imagerie satellitaire actuelle et rétrospective • Matrice lidar actuelle et rétrospective 	<ul style="list-style-type: none"> • Informations sur les enrochements passés et actuels • Espace de mobilité cartographié • Consultation
Usage	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation événementielle (transitoire) • Impact du choix des solutions sur les flux sédimentaires et la morphologie du chenal. • Identification sources, transport et dépôts 	<ul style="list-style-type: none"> • Suivi temporel de l'érosion (tendance) • Projection de la mobilité vraisemblable des cours d'eau • Zonage 	<ul style="list-style-type: none"> • Étude des parcelles à forte exposition à l'érosion (empirique) • Suivi statique de l'érosion • Cibler les efforts pour l'immunisation.
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Permet la quantification de la capacité de transport • Si modélisation, capte les impacts des CC sur les flux sédimentaires (complets) • Suivi quantitatif des flux sur les versants et dans les chenaux. 	<ul style="list-style-type: none"> • Déploie sur de très grandes surfaces • Permet la génération d'un suivi temporel de la localisation longitudinale et latitudinale du chenal principal 	<ul style="list-style-type: none"> • Besoin minimal en informations • Méthode clé en main; paramétrisation minimale. • Intègre une portion de l'analyse économique (ouvrages)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Lourdeur du déploiement pour de petites surfaces (suivi hydraulique) • Ne fournit pas ou peu d'information directe sur l'espace de mobilité • Difficulté de rendre compte des phénomènes d'aggradation 	<ul style="list-style-type: none"> • Information semi-quantitative • Ne tient pas compte des spécificité hydrauliques. • Suivi limité aux chenaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Suivi qualitatif; sans connaissance suivi réel des flux. • Analyse cantonnée aux berges (évolution du trait) • Ne peut être employé pour une application réglementaire ou étude d'ingénierie.

Conclusion, cibles et choix de l'outil

Suggestion d'arborescence décisionnelle

Cible	Échelle	Solution analysée	Modélisation hydrologique recommandée	Modélisation hydraulique recommandée	Modélisation géomorphologique recommandée
Événementiel	BV	Structurelle grise (immunisation/régulation)	Pluie/débit ou Atlas	1D/2D	Modélisation des flux (hydraulique)
		Structurelle verte (emprise)	Pluie/débit	1D/2D ou large échelle	Modélisation des flux (hydrologique / statique)
		Aménagement / réglementaire	Pluie/débit	1D/2D ou large échelle	Modélisation des flux (hydrologique / statique)
	Bief	Structurelle grise (immunisation/régulation)	Pluie/débit ou Atlas	1D/2D	Modélisation des flux (hydraulique) ou espace de mobilité ou non probabiliste
		Structurelle verte (emprise)	Pluie/débit	1D/2D ou large échelle	Modélisation des flux (hydrologique / statique) ou espace de mobilité ou non probabiliste
		Aménagement / réglementaire	Pluie/débit	1D/2D ou large échelle	Modélisation des flux (hydrologique / statique) ou espace de mobilité ou non probabiliste
Réccurrence (niveaux maximaux)	BV	Structurelle grise (immunisation/régulation)	Pluie/débit ou Atlas si non influençant le débit	1D/2D	Espace de mobilité ou modélisation des flux (hydraulique) ou non probabiliste
		Structurelle verte (emprise)	Pluie/débit	Large échelle ou 1D/2D	Espace de mobilité ou modélisation des flux (hydrologique / statique) ou non probabiliste
		Aménagement / réglementaire	Pluie/débit	Large échelle ou 1D/2D	Espace de mobilité ou modélisation des flux (hydrologique / statique) ou non probabiliste
	Bief	Structurelle grise (immunisation/régulation)	Atlas	1D/2D ou large échelle	Espace de mobilité ou non probabiliste
		Structurelle verte (emprise)	Atlas ou Pluie/débit	1D/2D ou large échelle	Espace de mobilité ou non probabiliste
		Aménagement / réglementaire	Atlas ou Pluie/débit	1D/2D ou large échelle	Espace de mobilité ou non probabiliste



Merci de votre
attention !

