

**Les**  
**ressources**

FICHE TECHNIQUE

# INONDATIONS PAR DÉBORDEMENT DE COURS D'EAU

## COMMENT LES MODÉLISER



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

## PRÉSENTATION DE LA SÉRIE

Cette série de fiches a pour objectif d'éclairer tous les acteurs commanditaires ou destinataires d'études d'aléas et de vulnérabilité sur les problématiques liées aux phénomènes d'inondations. Elle s'adresse aux élus comme aux services techniques des collectivités, syndicats de bassin, ainsi qu'aux services de l'État, mais également aux aménageurs, bureaux d'études, etc.

Elle apporte des clés de compréhension sur les différents outils et méthodes utilisés pour modéliser et représenter les phénomènes physiques d'inondation ainsi que ceux mobilisés pour l'évaluation de la vulnérabilité des biens et des personnes. Elle met également l'accent sur des recommandations pour conduire et comprendre les études selon l'état de l'art en vigueur.

## INTRODUCTION

---

**L**e risque inondation représente le premier risque naturel en France en termes de nombre de communes et d'habitants affectés. Différents phénomènes peuvent en être à l'origine : débordement de cours d'eau fluvial ou torrentiel, ruissellement, remontée de nappe, submersion marine. Il peut résulter d'un seul ou de plusieurs de ces phénomènes, lesquels vont alors interagir et se combiner pour amplifier l'inondation. En France, les inondations par débordement de cours d'eau sont susceptibles de toucher plus de 17 millions d'habitants et plus de 9 millions d'emplois. Devant un tel enjeu, des politiques publiques ont été mises en place pour prendre en compte le risque inondation dans l'aménagement du territoire et dans la gestion de crise.

Ces politiques publiques de prévention des risques reposent sur une connaissance préalable de l'aléa, sensiblement améliorée par l'utilisation de modèles hydrauliques. Ces derniers permettent en effet de mieux appréhender et de quantifier les phénomènes physiques qui caractérisent les niveaux d'aléa (hauteurs d'eau, dynamique d'inondation : vitesses d'écoulement et de montée des eaux). Ils donnent aussi accès à d'autres paramètres, tels que les temps de propagation de la crue ou bien encore la durée de l'inondation.

Ces modèles apportent aux acteurs du territoire et aux décideurs des éléments techniques nécessaires à la définition d'une réponse adaptée à une problématique et à un secteur donné. Ainsi, la modélisation des inondations est devenue au fil du temps un outil très utile, parfois indispensable, pour prévenir les risques et s'en protéger.

Cette fiche décrit les méthodes et outils classiquement utilisés pour modéliser une inondation par débordement de cours d'eau fluvial. Ceux qui s'appliquent aux autres types d'inondation, mentionnés précédemment, ne sont pas abordés ici, tout comme les modélisations hydro-sédimentaires couplant les flux hydrauliques et le transport d'éléments solides. Elle a vocation à apporter une aide aux différents acteurs mobilisés lors de la réalisation d'études hydrauliques d'inondation par débordement de cours d'eau fluvial afin de faciliter la compréhension et l'appropriation des méthodes de modélisation.

## SOMMAIRE

---

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 1 • Quel type de modèle numérique hydraulique choisir ?    | 4  |
| 2 • Données d'entrée des modèles                           | 8  |
| 3 • Les modèles unidimensionnels 1D                        | 12 |
| 4 • Les modèles bidimensionnels 2D                         | 14 |
| 5 • Les modèles couplés 1D/2D                              | 16 |
| 6 • Calage et validation d'un modèle numérique hydraulique | 18 |
| 7 • Exploitations des résultats du modèle hydraulique      | 20 |
| 8 • Conclusion                                             | 23 |

# 1 • QUEL TYPE DE MODÈLE NUMÉRIQUE HYDRAULIQUE CHOISIR ?

## 1.1 Qu'est-ce qu'un modèle numérique hydraulique ?

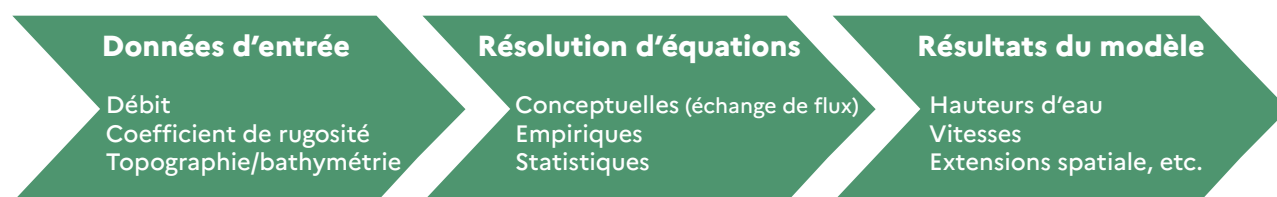
Les modèles numériques hydrauliques simulent le comportement d'un système physique (une rivière, par exemple) en utilisant un outil mathématique de simulation.

Ils se présentent sous la forme de logiciels comportant un ou plusieurs codes de calcul et une interface qui peut être couplée à un système d'information géographique (SIG) comme QGIS ou ArcGIS. Ils sont parfois regroupés au sein de systèmes (ou suite de logiciels).

Ces logiciels peuvent être gratuits ou payants, dans ce dernier cas, une licence est alors nécessaire pour les

utiliser, rendant le partage des modèles limité entre les structures et donc leur réutilisation. Par ailleurs, certains logiciels sont open source : c'est-à-dire que leur code est public, permettant une plus grande transparence quant aux équations prises en compte, hypothèses et partis pris techniques.

Leur objectif principal, dans le cadre du débordement de cours d'eau, est d'obtenir une représentation simplifiée des écoulements dans les fleuves et rivières et de pouvoir alors estimer la propagation de l'onde de crue, l'extension de l'inondation qui en résulte, les hauteurs d'eau atteintes, la cinétique<sup>1</sup>, etc.



Structure générale commune des modèles

## 1.2 Domaines d'utilisation

Les modèles hydrauliques numériques répondent aujourd'hui à de multiples usages et objectifs d'exploitations, leurs domaines d'utilisation sont donc très variés.

En France, la politique de prévention des risques est déclinée en sept piliers et la modélisation trouve sa place dans chacun d'eux. Des exemples sont fournis dans le tableau ci-dessous.

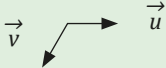
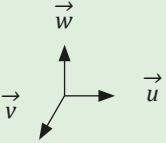
| PILIER DE LA PRÉVENTION DES RISQUES ET MODÉLISATION |                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Connaissance des risques                            | Modélisation des aléas (réels ou théoriques) servant ensuite à leur cartographie                      |
| Surveillance et prévision                           | Modèles de prévision des crues                                                                        |
| Éducation et information                            | Production de cartes et visuels pédagogiques à partir des résultats de modélisation                   |
| Prise en compte des risques dans l'aménagement      | Simulation de l'évènement de référence des PPRI<br>Modélisation des impacts d'un projet d'aménagement |
| Réduction de la vulnérabilité                       | Production de scénarios d'aléa pour évaluer de manière dynamique la vulnérabilité des enjeux          |

1. La cinétique d'une crue combine la vitesse de montée des eaux et le temps de concentration.

## PILERS DE LA PRÉVENTION DES RISQUES ET MODÉLISATION

|                       |                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gestion de crise      | Modélisation de scénarios d'aléa en fonction des hauteurs aux stations de surveillance des cours d'eau et de leur seuils de vigilance - cartographie des Zones d'inondation potentielles (ZIP) |
| Capitalisation et REX | Rejeu d'évènements passés récents                                                                                                                                                              |

### 1.3 Types de modèles numériques hydrauliques

| TYPES DE MODÈLES NUMÉRIQUES HYDRAULIQUES    |                                                                                      |                                                                                                                                                                         |                                                                                     |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                             | Modèle 1D                                                                            | Modèle 2D                                                                                                                                                               | Modèle 3D                                                                           |
| Équations                                   | Barré de Saint Venant 1D<br>Équations empiriques                                     | Barré de Saint Venant 2D                                                                                                                                                | Navier-Stokes                                                                       |
| Représentation des vitesses d'écoulement    |     |                                                                                       |  |
| Exemples d'utilisation                      | Prévision des crues (temps de calcul plus rapides), en rivière ou réseau de conduite | Répartition des débits au niveau des diffluences/ confluences ; connaissance fine des champs de vitesses et des hauteurs d'eau et des zones d'expansion des inondations | Transport sédimentaires, pollution, dimensionnement d'ouvrage, etc.                 |
| Échelles spatiales                          | Grandes échelles spatiales (plus d'une dizaine de mètre)                             | Grandes échelles spatiales (plus d'une dizaine de mètres) et échelle locale également                                                                                   | Échelle locale                                                                      |
| Exemples de logiciel (liste non exhaustive) | Telemac Mascaret, hydra, HEC-RAS, InfoWorks ICM, MIKE, TUFLOW, PCSWMM                | Telemac 2D, hydra, HEC-RAS, InfoWorks ICM, MIKE, TUFLOW, Iber.                                                                                                          | Telemac 3D, MIKE                                                                    |

Tous les modèles numériques reposent sur la résolution d'équations physiques simplifiées qui permettent de modéliser l'écoulement de l'eau dans différents contextes. Il existe différents types de modèles, basés sur le type d'équations qu'ils résolvent.

Pour la modélisation des inondations par débordement de cours d'eau, ce sont généralement les modèles 1D et 2D qui sont employés. Ils sont parfois couplés afin d'optimiser leur performance. Les modélisations 3D sont rarement employées.

Les modèles 3D servent à des études spécifiques centrées sur des ouvrages hydrauliques, des problématiques hydro-sédimentaires ou de pollution. Ils sont, par exemple, employés pour mieux connaître le fonctionnement au voisinage proche des ouvrages, comme des déversoirs d'orage, barrages, bassins, canaux venturi, etc. Ils sont nécessaires lorsque la connaissance fine de la vitesse, et en particulier des composantes sur la verticale de cette dernière, est une variable nécessaire à l'étude.

## TYPES DE MODÈLE À PRIVILÉGIER EN FONCTION DU TYPE D'ÉTUDE À RÉALISER

### Plans de prévention des risques inondation (PPRi) par débordement de cours d'eau (DCE)

#### Objectif de la modélisation

Produire des cartes d'aléas croisant les hauteurs d'eau et la dynamique d'inondation (combinaison des vitesses d'écoulement et des vitesses de montée des eaux). Ces aléas sont ensuite croisés avec les enjeux du territoire **afin de réglementer in fine l'aménagement du territoire via l'annexion du PPR approuvé aux documents d'urbanisme (PLU/PLUi) en tant que servitude d'utilité publique (SUP)**. Il est alors opposable aux demandes d'autorisation d'urbanisme individuelles.

Par ailleurs, un scénario de référence est à déterminer : il s'agit de l'événement le plus fort connu et documenté ou un événement théorique de fréquence centennale si ce dernier est plus important. Des sous-scénarios sont également à produire : ils visent à permettre la prise en compte de la résistance des ouvrages de protection contre les inondations et du comportement des autres ouvrages susceptibles de faire obstacle aux écoulements (remblais en lit majeur, ponts, etc.).

#### Variables hydrauliques recherchées et spécificités

Hauteur d'eau, emprises d'inondation et dynamiques qui allient vitesses d'écoulement et vitesses de montée des eaux.

Il est nécessaire d'avoir des résultats précis en termes d'emprise géographique afin d'avoir un zonage pertinent de l'aléa, mais également en altimétrie pour les hauteurs d'eau : une résolution du modèle de 10 cm est alors généralement attendue.

#### Type de modèle à privilégier

Modèle 1D, Modèle 2D

Modèle 1D/2D

### Études de dangers (EDD) des digues organisées en systèmes d'endiguement et des autres ouvrages conçus ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions

#### Objectif de la modélisation

Produire la ligne d'eau correspondant à la protection apportée par les ouvrages composant le système de protection **afin de qualifier la protection apportée par les ouvrages et apprécier les risques qu'ils sont susceptibles de générer**.

Plusieurs scénarios doivent être modélisés : fonctionnement nominal du système d'endiguement, défaillance fonctionnelle (défaillance d'un dispositif de régulation des écoulements hydrauliques : batardeau, vanne, station de pompage, etc.), défaillance structurelle (brèches), ruine généralisée (effacement de l'ouvrage).

Un scénario supplémentaire représentatif du comportement du système d'endiguement quand se produit l'aléa de référence du plan de prévention des risques naturels inondation peut également être modélisé<sup>2</sup>.

#### Variables hydrauliques recherchées et spécificités

Besoin de disposer de données sur les venues d'eau : hauteurs, vitesses, emprise d'inondation.

Les modèles doivent être d'une résolution suffisante afin de représenter au mieux les écoulements complexes autour de ces ouvrages.

#### Type de modèle à privilégier

Modèle 2D

### Dossiers d'autorisations environnementales (AE) des projets locaux d'aménagement

#### Objectif de la modélisation

Disposer, en lit mineur et/ou lit majeur, de données relatives à l'influence des aménagements sur la répartition de l'eau et les courants, par rapport à une situation initiale **afin d'apprécier les conséquences hydrauliques et morphologiques des projets**.

#### Variables hydrauliques recherchées et spécificités

Hauteurs d'eau, emprise d'inondation et vitesses.

Le modèle est donc à adapter en fonction du contexte hydrologique et hydraulique, des enjeux et des attentes du maître d'ouvrage.

#### Type de modèle à privilégier

Modèle 1D

## TYPES DE MODÈLE À PRIVILÉGIER EN FONCTION DU TYPE D'ÉTUDE À RÉALISER

### Analyses coûts-bénéfices (ACB) réalisées dans le cadre des Programmes d'action et de prévention des inondations (PAPI)

#### Objectif de la modélisation

Disposer de données permettant l'évaluation des conséquences du projet en termes de dommages hydrauliques potentiels aux enjeux, dans le cadre de scénarios alternatifs afin **d'évaluer la rentabilité d'un investissement au regard des avantages économiques qu'il procure durant sa durée de vie (souvent en termes de dommages évités).**

De nombreux scénarios sont à modéliser, tout en assurant le côté opérationnel du projet.

#### Variables hydrauliques recherchées et spécificités

Hauteurs d'eau, emprise d'inondation et vitesses.

#### Type de modèle à privilégier

Modèle 2D

### Prévision des crues

#### Objectif de la modélisation

Utiliser les données météorologiques et hydrologiques pour **simuler les écoulements** avec des temps d'exécution rapides, en contexte opérationnel de gestion de crise (émission de bulletins de prévisions plusieurs fois par jour).

La notion de temporalité est prépondérante pour la prévision des crues afin d'avertir suffisamment à l'avance les services à mobiliser et organiser au mieux la gestion de crise : évacuations, mobilisations des moyens de secours, etc.

#### Variables hydrauliques recherchées et spécificités

Hauteur d'eau au droit des stations hydrométriques pour différents débits, mais également temps de propagation de crue d'une station à l'autre.

Ces modèles doivent être rapides, ils sont moins détaillés et plus optimisés que les modèles précédemment cités.

#### Type de modèle à privilégier

Modèle 1D, voire 1D/2D ou 2D si site hydraulique complexe

### Établissement des cartes diffusées via le site Vigicrues<sup>3</sup>

#### Objectif de la modélisation

Le site Vigicrues propose sur certaines stations la visualisation de carte de zones d'inondation potentielle (ZIP) et de zones inondées par classes de hauteurs d'eau (ZICH) liées aux stations de vigilance.

Les attendus du modèle hydraulique sont très proches de ceux réalisés pour l'élaboration des PPRi par débordement de cours d'eau, seuls les scénarios modélisés (moins forts que ceux inscrits dans un PPRi par débordement de cours d'eau) et l'échelle de production (c'est-à-dire la zone couverte par le modèle) diffèrent. Besoin de disposer des emprises d'inondation en fonction des hauteurs d'eau aux stations hydrométriques pour différents débits -> pour préparer les situations d'urgence et gérer la crise.

#### Variables hydrauliques recherchées et spécificités

Emprises d'inondation et hauteurs d'eau.

#### Type de modèle à privilégier

Modèle 1D, voire 1D/2D ou 2D si site hydraulique complexe

## 1.4 Critères de choix entre les différents types de modèles numériques hydrauliques

Le choix d'un modèle hydraulique se fait en fonction de trois critères principaux :

- les variables hydrauliques à calculer pour répondre aux objectifs fixés dans l'étude ;
- la qualité et la quantité des données d'entrée disponibles ;
- la configuration hydraulique du site d'étude (échelle spatiale, limites du modèle, configuration hydraulique).

Plusieurs types de modèles peuvent être pertinents pour un besoin donné et le choix dépend d'une réflexion fine du modélisateur, notamment en ce qui concerne les caractéristiques des écoulements et des débordements à représenter.

2. Voir l'arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endiguement et des autres ouvrages conçus ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions.

3. Plus d'informations disponibles [ici](https://www.dailymotion.com/video/x9hj1f8). <https://www.dailymotion.com/video/x9hj1f8> (pour info : vidéo réalisée par le réseau vigicrues)

Ces types de modèles diffèrent en terme de :

- données d'entrée à prendre en compte,
- temps d'exécution nécessaire,
- méthode de calcul,
- ressources numériques nécessaires à leur mise en œuvre,
- nature et formats de données en sortie..

## 1.5 Capacité de calcul

La capacité de calcul des outils informatiques a longtemps été un facteur limitant le choix du modèle, certains codes de calcul demandant des ressources informatiques et des données très importantes pour être mis en œuvre correctement. Ce critère est aujourd'hui rarement bloquant, mais les temps de calcul restent cependant une contrainte à prendre en compte, notamment en termes de respect du planning de l'étude et de son prix, ou dans le cadre d'une mise en œuvre contrainte par le temps, par exemple pour la gestion de crise ou la prévision de phénomènes à courte échéance.

## 1.6 Évolution au cours du temps du modèle hydraulique

Il faut garder à l'esprit qu'un modèle hydraulique ne peut cependant pas tout représenter. Il est construit à un moment donné, pour répondre à une problématique précise en fonction des phénomènes et des hypothèses à prendre en compte, en concertation avec le maître d'ouvrage. Il dépend également des données disponibles au moment de sa réalisation et des résultats attendus. Un modèle peut donc devenir obsolète si ses hypothèses de constructions ne sont plus vraies (changement d'occupation des sols, modifications morphologiques, nouveaux ouvrages, etc.).

Certains modèles peuvent cependant être retravaillés et mutualisés afin de servir différents usages. Ils peuvent être réexploités pour une nouvelle problématique ou pour prendre en compte un élément nouveau, tel que la modification de la forme du lit et/ou de la vallée du cours d'eau à la suite d'une crue (dite alors « crue morphogène »), la réalisation d'aménagements, l'évolution du couvert végétal, etc. Il faut donc s'assurer de la possibilité de leur conservation et de leur mise à jour, les codes de calcul évoluant régulièrement.

# 2 • DONNÉES D'ENTRÉE DES MODÈLES

## 2.1 Collecte des données

Avant de réaliser toute modélisation hydraulique, il est nécessaire de collecter des données sur le secteur d'étude afin d'avoir le maximum d'informations relatives aux contextes :

- géologique et pédologique (friction et capacités d'absorption des sols);
- géographique (aménagements existants ou à venir, occupation superficielle du sol);
- hydrogéomorphologique (forme et emprise du cours d'eau, topographie et bathymétrie);
- historique (crues, inondations et configurations passées si le territoire a évolué);
- climatique (vent, pression, températures) dans les zones estuariennes;
- hydrologique (pluies);
- hydraulique (niveau et hauteur d'eau, vitesse et débits observés/calculés).

Tous les éléments relatifs aux systèmes d'endiguement et ouvrages hydrauliques, tels que les seuils, écluses, vannes, déversoirs fusibles, etc., sont autant de points

de contrôle hydraulique également nécessaires à la bonne représentation des écoulements.

Ces données sont collectées et analysées lors de la synthèse bibliographique et l'étude de terrain.

**La synthèse bibliographique** est réalisée par le maître d'ouvrage ou le bureau d'études avant l'étude, et complétée pendant l'étude à partir de documents écrits (études techniques et scientifiques déjà réalisées sur le secteur), de témoignages oraux et de documents photos et vidéos (voir [Annexe 1](#)).

**L'étude de terrain** vient compléter l'analyse bibliographique. Elle est réalisée par le bureau d'études avec l'appui du maître d'ouvrage et parfois des collectivités. Elle permet notamment :

- une reconnaissance de la configuration et de l'environnement des stations de mesures et des sites de jaugeages;

- une identification terrain des interventions et aménagements réalisés (terrassement, travaux dans le lit mineur);
- une localisation des secteurs sensibles et/ou enjeux;
- une reconnaissance terrain des laisses de crues historiques et un recueil des témoignages de la population (pour avoir une idée de la dynamique de crue, par exemple).

Cette étape de collecte permet également de dresser un état des lieux critique des données disponibles et d'identifier les données manquantes pour lesquelles une acquisition sera à envisager. La pertinence et la qualité des données récoltées influencent directement celles des résultats des modélisations hydrauliques. Il

est donc essentiel que le temps accordé à cette étape par le maître d'ouvrage ou le bureau d'études, si cette tâche lui a été déléguée, soit suffisamment dimensionné au regard de son importance pour l'obtention d'un modèle crédible.

## 2.2 Types et formes des données

La collecte de données aboutit souvent à un catalogue de données très diverses (documents écrits, cartes et données cartographiques, photos, témoignages, etc.). Leur mise en forme est une étape chronophage, mais essentielle qui permet de gagner un temps précieux lors de la phase de construction du modèle hydraulique.

| LES DIFFÉRENTS TYPES DE DONNÉES TECHNIQUES À COLLECTER |                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Types de données techniques                            | Objectifs                                                                                                                      | Informations fournies : sources de données (liste non exhaustive)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Caractéristiques du/des BV                             | Compréhension globale du secteur d'étude, du fonctionnement des cours d'eau et de leurs zones inondables, des axes de drainage | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Contour, superficie des bassins-versants : IGN BD topage®</li> <li>• Chevelu des cours d'eau : IGN BD topage®</li> <li>• Occupation du sol : CORINE Land Cover (CLC) avec attributs de frottement, référentiel régional pédologique (RRP)</li> </ul>                                                                                                                                                                  |
| Topographie                                            | Représentation précise de la géométrie du bassin-versant et du secteur d'étude (MNT de qualité)                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relief de la zone d'étude : IGN RGE® Alti 1 m, ou 5 m mis à jour par le programme LiDAR HD, levés ponctuels complémentaires pour combler les lacunes (géomètres ou BE, études antérieures, marchés topo/bathymétriques)</li> </ul> <b>Attention aux dates des relevés</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lignes orographiques (talus, rupture de pente, route, etc.) : IGN BD TOPO®</li> </ul>              |
| Ouvrages hydrauliques                                  | Représentation précise des ouvrages hydrauliques                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Levés ponctuels complémentaires pour lever les ouvrages particuliers (ponts, digues, remblais, etc.) : géomètres ou BE, études antérieures, marchés topo/bathymétriques</li> <li>• Plans de récolement et réseaux côtés, section, hauteur du radier, modalités de fonctionnement (paramétrage/consignes de manœuvres, clapets), pente du réseau...</li> <li>• Lignes orographiques (dignes) : IGN BD TOPO®</li> </ul> |
| Bathymétrie                                            | Représentation précise du lit mineur                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reliefs sous l'eau : études antérieures, marchés topo/bathymétriques, BE, géomètres</li> </ul> <b>Attention aux dates des relevés</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Pluviométrie                                           | Quantification des pluies                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chroniques de pluies : études existantes, analyse statistique, données Safran, COMEPHORE, SHYREG Pluie ; lames d'eau ANTILOPE, mesures aux pluviomètres (meteo.data.gouv.fr/)</li> </ul> <b>Attention aux durées des chroniques</b>                                                                                                                                                                                   |
| Données de vent                                        | Quantification des vents sur le secteur qui peuvent influencer l'inondation (surtout en estuaire)                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesures et modélisation de vent aux stations : meteo.data.gouv.fr</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

## LES DIFFÉRENTS TYPES DE DONNÉES TECHNIQUES À COLLECTER

| Types de données techniques | Objectifs                                                                                                                                                                                                   | Informations fournies : sources de données (liste non exhaustive)                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Marégraphie                 | Dans les zones estuariennes, définir les conditions aux limites du modèle                                                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Hauteur d'eau aux marégraphes : data.shom, modélisation des niveaux marins (base de données de niveaux marins)</li> </ul>                                                                                                                                                      |
| Hydraulique                 | Évaluation des débits caractéristiques (débits de pointe, crues, étiages, etc.) - Définition des hydrogrammes types, de la dynamique fluviale (vitesse d'écoulement et montée des eaux), de la zone inondée | <ul style="list-style-type: none"> <li>Chroniques de hauteurs d'eau et de débits : études existantes, hydroportail, SPC</li> <li><b>Attention aux durées des chroniques</b></li> <li>Jaugeage aux stations : SPC, UH</li> <li>Niveaux atteints par les crues antérieures : base de données repères de crue</li> </ul> |

Une liste détaillée des données et de leur source est disponible en [Annexe 1](#)

### 2.3 L'importance des données topographiques et bathymétriques

Les données topographiques renseignent le relief du lit majeur du cours d'eau. La bathymétrie est une branche spécifique de la topographie qui se concentre, quant à elle, sur le relief sous la surface en eau et donc le lit mineur.

La qualité de ces données est l'élément essentiel de toute modélisation réussie, pour représenter au mieux la configuration de la zone d'étude. Les données topographiques se présentent souvent sous forme de modèles numériques de terrain (MNT) plus ou moins récents, d'emprise et de qualité variable.

#### LES LIDAR ET L'INFORMATION BATHYMÉTRIQUE

Les informations fournies dans les LiDAR, y compris HD, pour le lit mineur sont issues d'une triangulation de berge à berge et ne sont donc pas représentatives de la bathymétrie réelle du cours d'eau. Des traitements sont aujourd'hui disponibles pour rendre cohérents les écoulements le long des cours d'eau selon des altitudes décroissantes, en supprimant les triangulations et les cuvettes « artefact », générées par la triangulation de berge à berge, comme le propose l'outil LIDRO créé par l'IGN (inspiré de l'outil FILINO du Cerema<sup>4</sup>). Cependant, les données bathymétriques restent indispensables pour établir la structure du modèle hydraulique dans les secteurs situés sous la surface en eau.

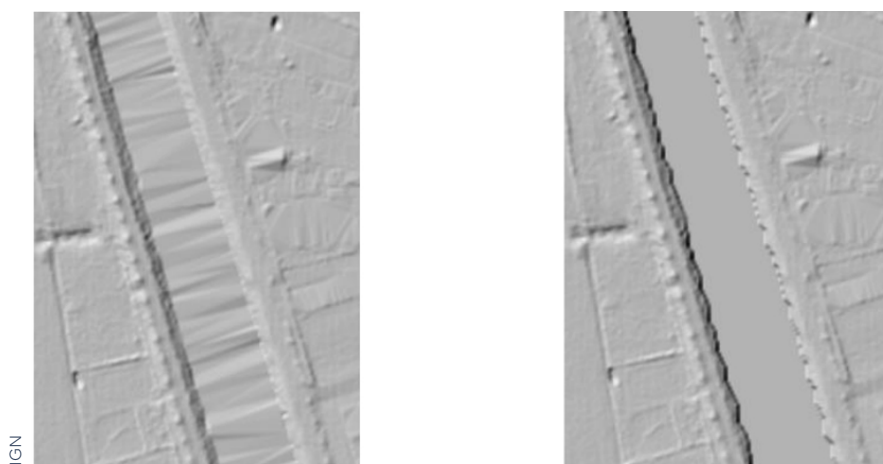


Figure 1 : à gauche : production d'un MNT sans les points virtuels (appelé MNT classé : triangulation de berge à berge) et à droite, avec la création de points virtuels le long des surfaces en eau (MNT optimisé).

4. L'outil est disponible sur le GitHub de l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) : <https://github.com/IGNF/lidro>.

La mise à disposition progressive du LiDAR HD<sup>5</sup> par l'IGN est une avancée précieuse pour la modélisation hydraulique, car ce projet rend disponible sur l'ensemble du territoire une donnée de qualité limitant les temps de recherche, d'échange et de combinaison d'anciens MNT.

Au-delà de leur rôle dans la structure du modèle numérique hydraulique, les données topographiques sont utiles dès la phase d'analyse du fonctionnement hydraulique. Elles permettent notamment de visualiser rapidement les contrôles hydrauliques<sup>6</sup> en lit majeur importants à intégrer dans le modèle. Le plus souvent, la mesure bathymétrique est fournie sous forme de profils en travers issus de campagnes de levés effectuées par des géomètres et positionnés en fonction de la géométrie du lit mineur et du lit majeur, des contrôles hydrauliques et des ouvrages en lit mineur. La bathymétrie est ensuite interpolée entre ces profils et intégrée au modèle hydraulique.

Les cas où le modélisateur dispose d'un MNT bathymétrique complètement issu de mesures, sans méthode d'interpolation, sont rares et se limitent souvent aux cours d'eau navigables : les voies navigables de France (VNF) ou la Compagnie nationale du Rhône (CNR) fournissent ainsi régulièrement des mesures bathymétriques sous forme de semis de points.

Dans certains cas, les données bathymétriques existantes sont insuffisantes pour réaliser la modélisation numérique hydraulique dans de bonnes conditions, d'autant plus sur des cours d'eau où le fond évolue régulièrement. Il faut alors prévoir un marché d'acquisition. Il est alors souhaitable que ce soit le modélisateur qui réalise l'analyse préalable du site qui positionne lui-même les profils à lever.

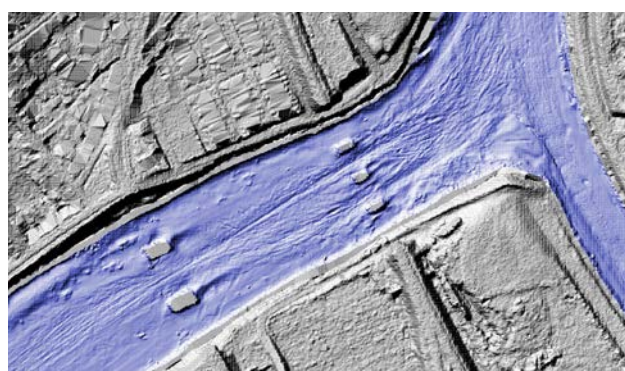
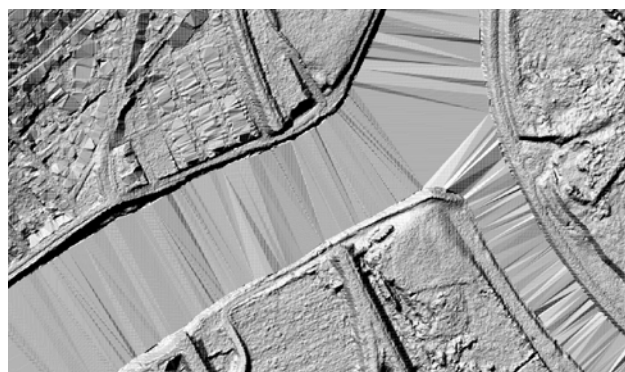


Figure 2 : en haut, LiDAR brut et en bas, intégration de données bathymétriques (en bleu) relevées par sondeur acoustique multi-faisceaux de VNF en complément du LiDAR.

### FOCUS SUR LES OUVRAGES

Selon l'usage du modèle, il est possible d'intégrer la géométrie des ponts et des seuils et de paramétrer leur influence sur la ligne d'eau. Leurs plans sont alors nécessaires et ils sont à récupérer auprès des gestionnaires des ouvrages.

Dans le cas de modèles utilisés en prévision des crues, les ouvrages n'ayant pas de conséquences sur la propagation de l'onde de crue ne sont généralement pas intégrés au modèle hydraulique afin d'optimiser les temps de calcul.

Dans tous les cas de figure, le bureau d'études devra justifier la prise en compte ou non des ouvrages dans son modèle.

5. Plus d'informations sur le programme national LiDAR (Light imaging Detection and Ranging) HD (haute densité) coordonné par l'IGN à l'adresse suivante : <https://geoservices.ign.fr/lidarhd>.

6. Un contrôle hydraulique est un élément contraignant et définissant les conditions hydrauliques dans sa zone d'influence (barrage, seuil, remblai, éventuellement pont) et qui conditionne donc la ligne d'eau.

## 3 • LES MODÈLES UNIDIMENSIONNELS 1D

### 3.1 Description générale

Les modèles 1D sont structurés par des éléments « filaires » représentant les axes d'écoulement. Ils forment « la colonne vertébrale » du modèle, le long desquels viennent s'accrocher et se repérer des « objets » (profils en travers, seuils, ponts, etc.) via un système de points kilométriques (PK).

Dans le cas le plus simple, un modèle peut être monofilaire : rivière unique (un bras, un bief), ou dans des cas plus complexes, multifilaires : diffluences, confluences, etc.

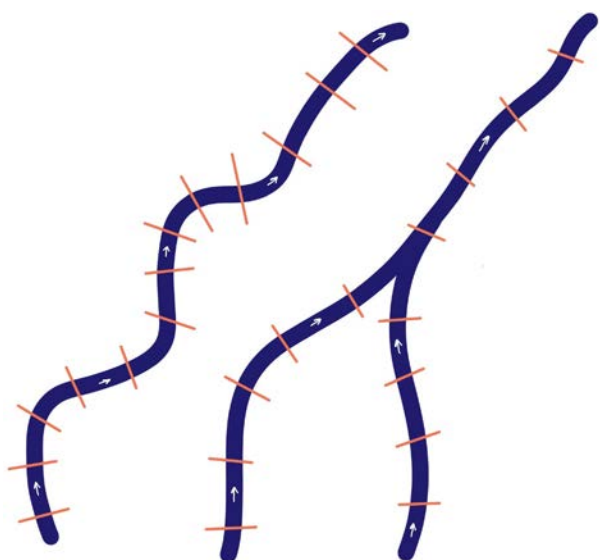


Figure 3 : Schémas d'une structure monofilaire (à gauche) et multifilaire (à droite). Les traits bleus représentent les axes d'écoulement et les traits perpendiculaires orangés, les profils en travers.

Il existe également des modèles 1D spécifiques dits « à casiers ». Les casiers sont liés aux axes filaires par des liaisons qui peuvent être de différents types : seuils, orifice, buse, ou chenal. Ils permettent de modéliser les zones de stockage et de restitution d'eau, voire éventuellement être contributifs aux écoulements, si les liaisons sont des chenaux. Cependant, au sein de chaque casier, il n'y a pas de résolution d'équation dynamique (pas de calcul de vitesse, une seule valeur de hauteur d'eau).

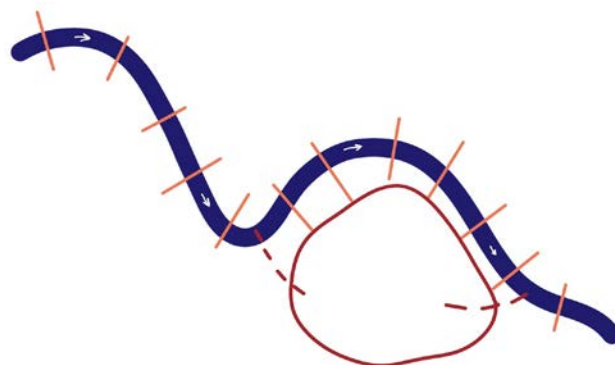


Figure 4 : Schéma d'un modèle 1D monofilaire à casier. Le casier en rouge est lié au bief par des liaisons (tirets rouges).

Le modèle 1D résout les équations de Barré de Saint-Venant 1D, excepté au niveau de singularités (ponts, seuils, etc.). En effet, ces singularités entraînent une discontinuité de la ligne d'eau et donc nécessitent des formulations hydrauliques spécifiques.

### 3.2 Hypothèses prises en compte

La modélisation 1D repose sur les hypothèses suivantes :

- l'écoulement n'a qu'une seule direction principale;
- les accélérations verticales sont négligeables;
- la pente moyenne des écoulements est faible;
- les sections d'écoulement sont considérées comme étant constituées de deux ou trois sous-ensembles : le lit mineur et le lit majeur; et les zones de stockage dans le cas de modèles à casiers.

Un des préalables indispensables à la réalisation d'un modèle hydraulique 1D est de réaliser un diagnostic hydraulique identifiant notamment les contrôles hydrauliques. Cette analyse est plus ou moins complexe à réaliser selon les contextes, mais elle est nécessaire à la bonne conception du modèle. Elle permet d'identifier des zones où des levés bathymétriques supplémentaires doivent être commandés.

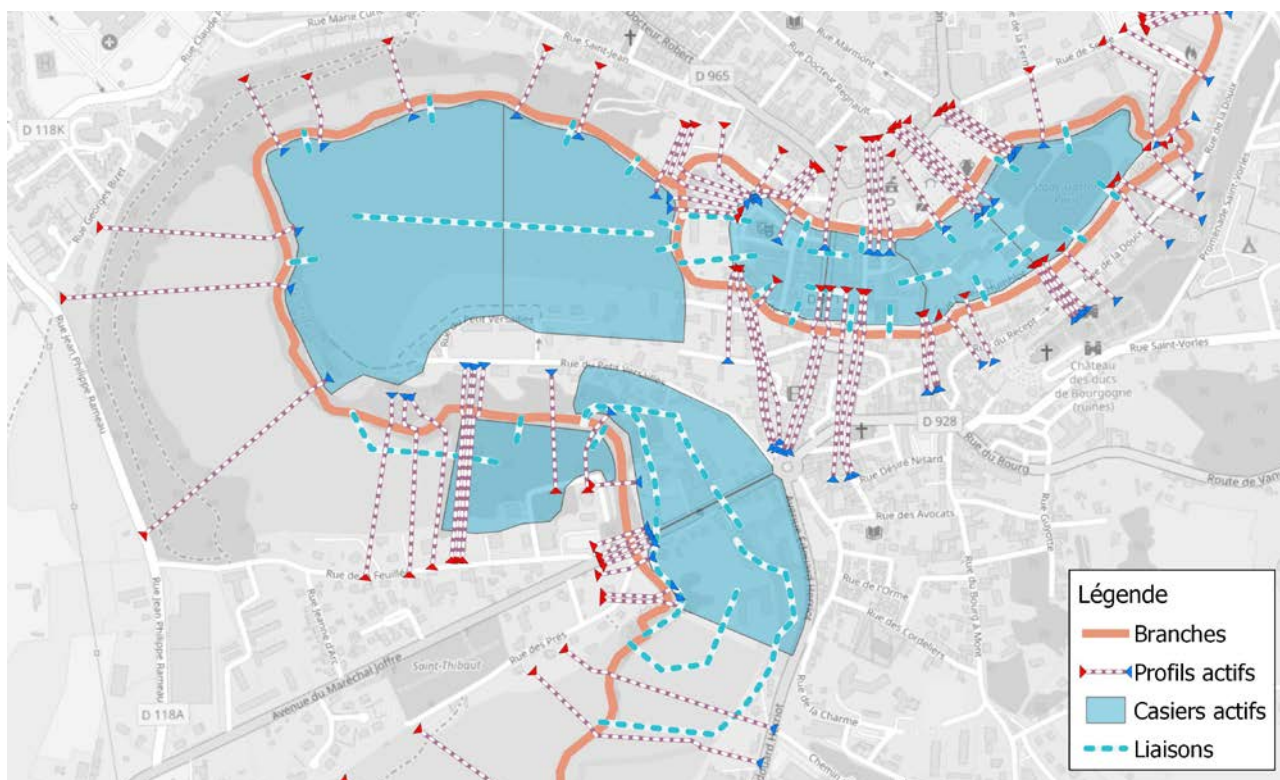


Figure 5 : Exemple d'un modèle Mascaret 1D à casiers (boucle de Châtillon-sur-Seine) réalisé avec le code de calcul Mascaret 1D sur une zone de diffluence et confluence.

### DES MODÈLES PAS SI « SIMPLES »

Les modèles 1D sont le fruit d'une forte conceptualisation ou abstraction de la réalité. Bâtir un modèle 1D de bonne qualité qui représente bien les contrôles hydrauliques régissant les écoulements reste un travail d'« expert », même s'il est souvent perçu comme plus simpliste qu'un modèle 2D.

La plus grande difficulté pour un modélisateur ou utilisateur d'un modèle 1D est de penser systématiquement cette conceptualisation entre la vision « géographique » (modèle construit ou interfacé sous SIG) et la vision schématique hydraulique.

L'approche recommandée est de prendre le point de vue de l'eau (ou de la crue) parcourant le modèle en s'assurant que les contraintes régissant les écoulements dans le modèle sont bien fidèles aux contrôles hydrauliques.

## 3.3 Avantages et inconvénients des modèles 1D

| Avantages                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Inconvénients                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapide à mettre en place dans le cas de géométrie simple</li> <li>• Rapidité des temps de calcul</li> <li>• Représentation correcte des débits et niveaux des cours d'eau</li> <li>• Meilleure prise en compte des ouvrages hydrauliques (buses, seuils et réservoirs)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessité d'identifier les directions majeures d'écoulement pour construire le modèle</li> <li>• Appropriation plus difficile : la structure des modèles 1D est moins intuitive que les maillages 2D par exemple. Les systèmes complexes peuvent être longs à construire</li> <li>• Vitesses moyennes uniquement</li> <li>• Pas pertinent dès que les écoulements n'ont pas une seule direction principale (lit en tresse, méandres, etc.).</li> </ul> |

### 3.4 Sorties et applications

Les modèles 1D fournissent des résultats de hauteurs d'eau, cotes altimétriques et débit à chaque profil en travers et singularités. Ils fournissent également une vitesse moyenne en lit mineur et en lit majeur.

Des résultats en cotes altimétriques sont également disponibles pour les casiers, mais pas de vitesse, puisqu'elle y est réputée nulle.

## 4 • LES MODÈLES BIDIMENSIONNELS 2D

### 4.1 Description générale

Les modèles numériques bidimensionnels (2D) permettent de simuler les écoulements dans les deux dimensions horizontales. Ils sont particulièrement adaptés dans des zones complexes marquées par une topographie irrégulière, telles que :

- les lits majeurs très larges marqués par des écoulements secondaires (chenaux en tresse, méandres, etc.);
- les zones présentant de nombreux aménagements et bâtiments (milieu urbain);
- les systèmes hydrauliques complexes (intégrant des zones de surverse, d'écoulements sur les routes, des espaces de confluence/diffuence, voire des situations de rupture de digues).

Les modèles 2D permettent ainsi une approche affinée de l'écoulement incluant une connaissance avancée des conditions locales, avec, notamment, la variabilité temporelle et spatiale de la hauteur d'eau et de la vitesse moyenne sur la verticale, en chaque point du maillage.

Ils fournissent, à ce titre, des résultats fondamentaux pour une meilleure analyse et compréhension des processus hydrauliques.

### 4.2 Hypothèses prises en compte

Les équations de Barré de Saint-Venant bidimensionnelles intègrent un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, telles que :

- une pression hydrostatique, c'est-à-dire basée sur la hauteur de l'eau dans le système;
- des vitesses moyennées sur la verticale (pas de vitesse ni d'accélération verticale);
- une hauteur d'eau considérée comme grande devant les aspérités du fond;
- le caractère imperméable de la surface et du fond.

### 4.3 Résolution numérique et maillage

Les équations 2D sont résolues par des méthodes numériques appliquées en nombre fini de points sur le domaine d'étude. Cette couverture de points constitue le maillage de calcul qui peut prendre différentes formes, en fonction des techniques de résolution numérique mises en œuvre (par exemple : différences, volumes ou éléments finis).

Les maillages non structurés, c'est-à-dire avec une taille de maille irrégulière, sont particulièrement adaptés aux problématiques associées aux débordements des cours d'eau. Constitué d'une série d'éléments triangulaires (sous Telemac 2D par exemple) ou carrés (sous HEC-RAS par exemple), ce type de maillage peut se calquer sur des géométries complexes sans accroître significativement le nombre total de points de calcul ni pénaliser les performances des simulations numériques. La taille des mailles de calcul peut également être réduite dans le lit mineur des cours d'eau et/ou au droit des aménagements et ouvrages (seuils, ponts ou barrages, par exemple).

En zone urbaine, par exemple, la résolution horizontale du maillage peut intégrer les contours des bâtiments ou des îlots urbains et ainsi mieux définir les chemins et rues qui constituent des zones préférentielles d'écoulement des eaux. Les bâtiments étant considérés dans ce cas comme des îlots insubmersibles, les volumes d'eau possiblement stockés dans ceux-ci ne sont pas pris en compte.

Les maillages non structurés restent cependant plus longs à générer que des maillages basés sur une grille régulière.

Selon les codes de calcul, les données sur l'élévation topo-bathymétrique et sur l'occupation du sol (prise en compte par le coefficient de frottement) peuvent être contenues dans le nœud, les mailles et les faces des mailles. Il est alors possible d'obtenir sur chacun de ces éléments les résultats de la simulation, tels que la hauteur d'eau, la vitesse, etc.

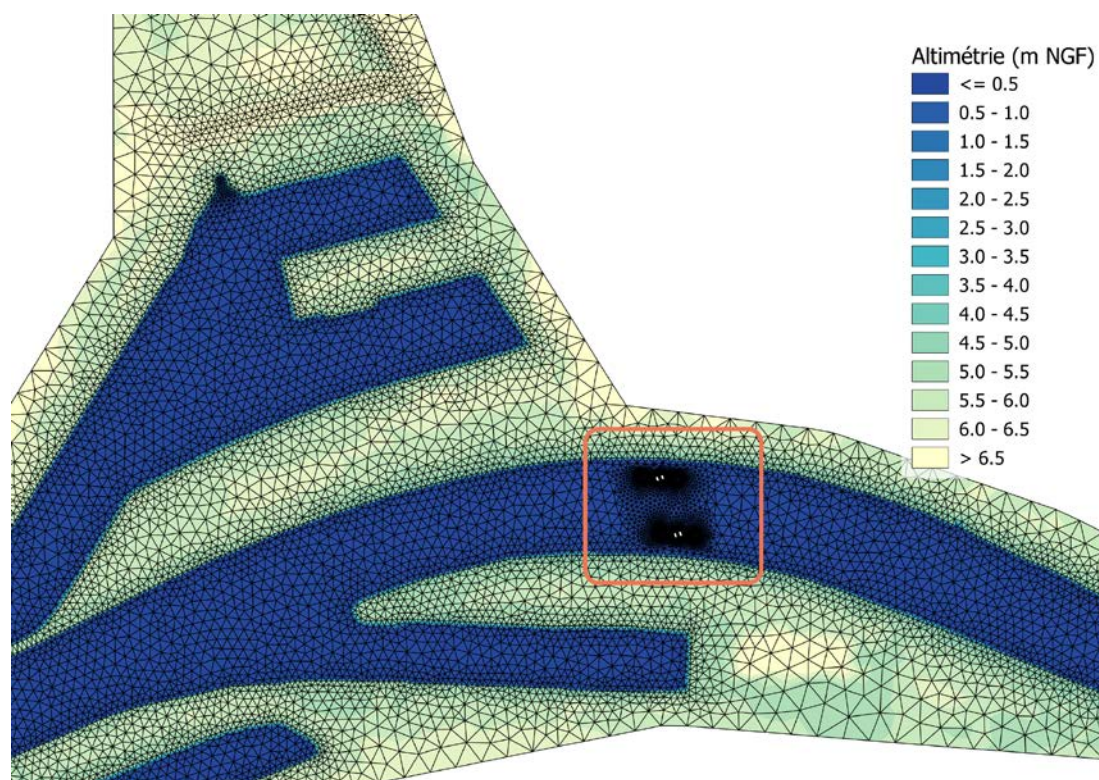


Figure 6 : Exemple de maillage non structuré (taille de maille irrégulière) sur lequel sont interpolées la topographie et la bathymétrie. La partie encadrée correspond au raffinement du maillage au droit des piles d'un pont.

## 4.4 Avantages/inconvénients des modèles 2D

| Avantages                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Inconvénients                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adapté aux zones complexes marquées par une topographie irrégulière : meilleure résolution du lit majeur, en particulier dans le cas de lits très larges présentant des écoulements secondaires,</li> <li>• Pas d'hypothèse préalable sur les chemins préférentiels des écoulements,</li> <li>• Meilleure visualisation des variations de vitesses d'écoulement (zones de stagnation et de courants rapides),</li> <li>• Résolution des variations spatiales des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement dans le plan horizontal,</li> <li>• Intégration de la variabilité spatiale de l'environnement étudié avec notamment une meilleure définition du frottement de fond</li> <li>• Intégration des obstacles à l'écoulement, dont notamment les bâtiments en milieu urbain</li> <li>• Meilleure communication des résultats via la production de vidéos des écoulements</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Travail conséquent pour la collecte et le traitement d'une quantité importante de données d'entrée (MNT, occupation des sols, etc.) nécessitant des capacités de stockage et de traitement adaptés,</li> <li>• Construction du maillage de calcul chronophage</li> <li>• Temps de calcul accrus par rapport aux modélisations 1D et nécessité, dans certains cas, d'avoir accès à des ressources de calcul spécifiques (calculateurs),</li> <li>• Difficultés pour représenter certains aménagements et ouvrages hydrauliques (de type ponts, buses, etc.). En effet, le modèle 1D s'avère souvent préférable pour la prise en compte de ces structures complexes ponctuelles situées le long du lit mineur, car la section transversale y est mieux représentée que dans le modèle 2D</li> </ul> |

## 4.5 Sorties et applications

Dans le cadre des inondations par débordement de cours d'eau, les principales variables hydrauliques de sortie généralement exploitées sont les hauteurs d'eau, les débits et les composantes horizontales de la vitesse moyenne sur la verticale sur l'ensemble de la zone d'étude (lit mineur et lit majeur). Par exemple, il est possible d'estimer des flux transitant à travers des sections préalablement définies le long du lit majeur ou au niveau de zones d'intérêt incluant des bâtiments et habitations à surveiller en situation de crise, ou bien de définir les champs d'expansion des crues et les débordements principalement pour les zones urbaines.

La plus-value majeure des modélisations 2D est la production de cartographie spatiale étendue de la cinétique d'un événement avec notamment la connaissance affinée de la variabilité d'un certain nombre de paramètres fondamentaux, tels que la vitesse maximale de montée des eaux, la vitesse d'écoulement maximale, la durée de l'inondation, le débit linéique ou encore la charge hydraulique locale.

# 5 • LES MODÈLES COUPLÉS 1D/2D

## 5.1 Description générale

L'objectif des modèles couplés 1D/2D est de pouvoir modéliser des écoulements en surface qui peuvent devenir complexes en fonction du territoire, tout en gardant les avantages des deux types de modélisation en fonction des secteurs d'intérêts. Les modèles 1D/2D gardent la logique schématique du modèle 1D et plus particulièrement celle du modèle 1D à casiers, où les casiers sont « remplacés » par un maillage 2D. Dans les modèles 1D/2D les plus répandus, le lit mineur est le plus souvent modélisé en 1D (minimisation du coût calculatoire) et la zone de débordement en 2D (préservation de la capacité à modéliser des écoulements diffus).

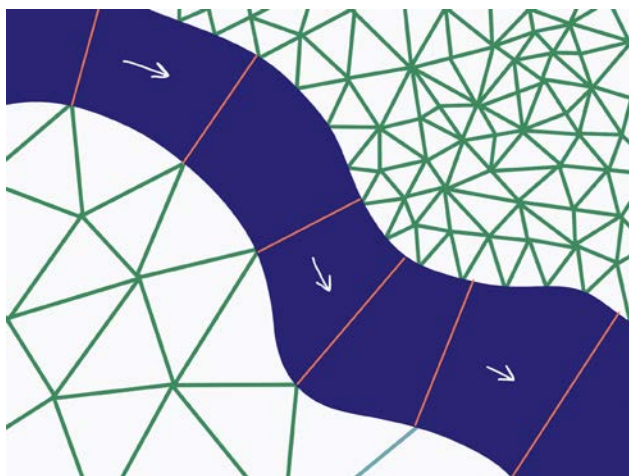


Figure 7 : Schéma d'un modèle 1D/2D avec lit mineur modélisé en 1D avec les profils en orange et le lit majeur entièrement en 2D (mailles vertes). Comme dans tout modèle 2D, le maillage peut être densifié en fonction de la complexité du secteur à modéliser.

Plusieurs types de modèles réunissant des domaines 1D et 2D sont à distinguer.

Il existe d'une part les modèles pour lesquels la zone de débordement est systématiquement une zone 2D. Ce type de modèles 1D/2D peut être compris dans la famille des modèles 2D (par exemple, Mike produit par DHI ou InfoWorks ICM distribué par Autodesk).

Il existe d'autre part les modèles pour lesquels les zones modélisées en 2D correspondent à des zones particulières telles que :

- des confluences ;

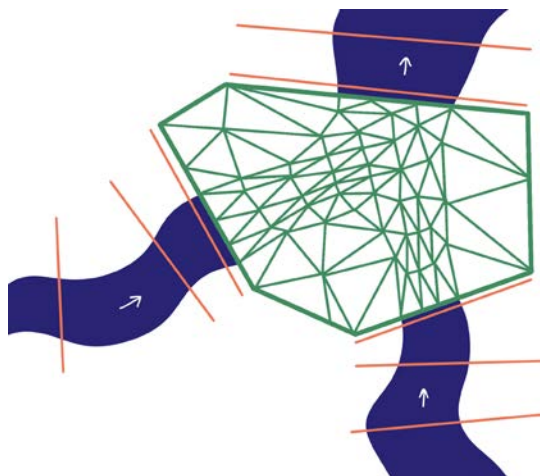


Figure 8 : Exemple d'un modèle 1D/2D au niveau d'une confluence. Les trois bras sont modélisés en 1D (profils en orange) et la zone de confluence est modélisée en 2D. Ce type de configuration est parfois réalisé implicitement par le code de calcul.

- les plaines des cours d'eau : ravines en 1D et arrivant en 2D dans la plaine d'un cours d'eau ;
- des zones en arrière de digues : une liaison située sur un ouvrage peut être utilisée dans ce cas. L'ouvrage crée une séparation entre plusieurs zones, avec la venue d'eau provenant d'une surverse ou d'une défaillance d'un ouvrage de protection, par exemple. Les zones pour lesquelles le sens d'écoulement est bien identifié sont représentées en 1D (lit mineur/inter digue), et les zones endiguées et là où l'écoulement n'a pas de direction préférentielle sont représentées en 2D. Cela permet ainsi de disposer d'informations ponctuelles (champs de hauteurs et de vitesses) dans la zone modélisée en 2D. Ces liaisons peuvent cependant être sources d'instabilités.

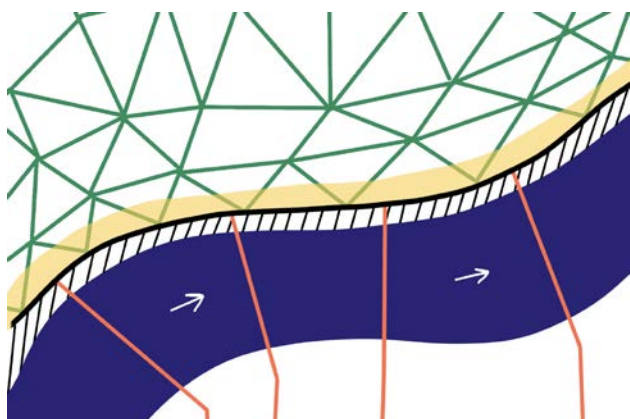


Figure 9 : Schéma d'un modèle 1D/2D dans un contexte d'endiguement. La digue (en noir hachuré) est comprise dans les profils en travers en orange et la zone en arrière de digues est modélisée en 2D. La bande jaune représente l'interface entre les domaines 1D et 2D - source d'instabilités.

## 5.2 Hypothèses prises en compte

Les hypothèses prises en compte dans les modèles 1D/2D sont celles utilisées dans les modèles 1D et dans les modèles 2D. Le choix du type de représentation dépend alors des besoins et de l'applicabilité des hypothèses.

Les zones pour lesquelles les directions d'écoulement sont connues et ne changent pas au cours du temps peuvent être modélisées en 1D. Les zones pour lesquelles les écoulements sont diffus ou varient rapidement sont modélisées en 2D.

La spécificité intrinsèque des modèles 1D/2D est située à l'interface entre ces deux modes de calcul des écoulements.

## 5.3 Avantages et inconvénients des modèles couplés 1D/2D

### AVANTAGES

- Ils cumulent les avantages des modèles 1D et 2D en fonction des secteurs d'intérêts et permettent de contourner leurs inconvénients
- La configuration du modèle est adaptée au plus près du cas d'étude et des données disponibles

### INCONVÉNIENTS

- Des instabilités numériques peuvent survenir au niveau des liaisons entre les domaines 1D et 2D. Il est nécessaire que la liaison soit un point de contrôle hydraulique (seuils ou remblais, par exemple)

## 5.4 Sorties et applications

Les modèles 1D/2D peuvent être fréquemment rencontrés dans les cas où des zones à forts enjeux et aux écoulements complexes sont partiellement déconnectées des écoulements du cours d'eau. Ces situations concernent typiquement les secteurs endigués (par des protections contre les inondations ou par d'autres éléments anthropiques).

Ils sont également exploités pour gagner des temps de calcul pour les configurations où une modélisation 2D est nécessaire, mais uniquement sur des zones réduites par rapport à l'ensemble du secteur à modéliser.

Les sorties des modèles 1D/2D sont analogues aux sorties qui peuvent être attendues des modèles 1D et 2D. Sur les zones modélisées en 1D, seront disponibles une cote d'eau et une vitesse moyenne par profil. Sur les zones modélisées en 2D, les cotes, vitesses d'eau et direction d'écoulements (composantes de la vitesse suivant les deux axes du plan) seront disponibles en tout point du maillage.

Le traitement et la cartographie des résultats de ce type de modèle peuvent s'avérer particulièrement fastidieux par la présence des deux types de modélisation avec des sorties par profils d'une part et par nœud de maillage d'autre part. Une attention particulière sera donc à porter sur la zone de frontière entre les domaines 1D et 2D.

## 6 • CALAGE ET VALIDATION D'UN MODÈLE NUMÉRIQUE HYDRAULIQUE

### 6.1 Définitions

Dans le cas des inondations par débordement de cours d'eau, le calage d'un modèle hydraulique consiste à faire coïncider les résultats du calcul hydraulique aux données observées ou mesurées lors d'une crue passée, en faisant varier certains paramètres du modèle (frottements, perte de charge au niveau des seuils ou des ponts, etc.). L'objectif du calage est de disposer d'un modèle le plus représentatif possible du fonctionnement hydrologique et hydraulique du cours d'eau et de la configuration du secteur à modéliser en fonction des données disponibles.

Une fois le calage abouti, le modèle est testé avec une nouvelle et dernière crue, dite de validation, qui permet d'apprécier les capacités du modèle à représenter les phénomènes et aussi ses éventuelles incertitudes résiduelles.

#### UNE ÉTAPE INCONTOURNABLE !

Il est important de souligner qu'un modèle hydraulique peut fonctionner de manière satisfaisante et donner une fausse impression de précision alors qu'il ne représente pas du tout la réalité hydraulique du secteur d'étude. Il est donc indispensable de confronter les résultats de modélisation à des données observées ou mesurées lors des crues et ainsi fiabiliser ses résultats.

### 6.2 Données à mobiliser pour le calage

- Laisses et repères de crues
- Prises de vues horodatées aériennes ou au sol
- Mesures de stations hydrométriques
- Témoignages (riverains, élus, presse)

#### ET S'IL N'Y A PAS DE DONNÉES ?

En l'absence de données de calage ou de validation, il est possible d'effectuer des tests de sensibilité, c'est-à-dire de faire varier sensiblement certains paramètres du modèle, comme les coefficients de frottement, les coefficients de perte de charge des ouvrages hydrauliques, ou la condition aval du modèle. L'objectif est de quantifier l'influence de certains paramètres et hypothèses sur les résultats du modèle hydraulique.

### 6.3 Choix des crues de calage et des crues de validation

En théorie, il est recommandé de disposer de plusieurs crues de calage :

- une ou plusieurs crues de calage pour le lit mineur (faiblement débordante);
- une ou plusieurs crues pour le lit majeur (crues plus importantes, voire exceptionnelles).

Dans la pratique, le choix des crues de calage dépend surtout des données disponibles. Il est important de se renseigner sur le contexte de ces crues, car il peut exercer une influence sur le déroulé du phénomène :

- **conditions d'écoulement particulières** : sol saturé ou non, végétation plus ou moins développée (crue d'été ou d'hiver);
- **dysfonctionnement d'un ouvrage hydraulique** : brèche ou rupture d'un système d'endiguement, dysfonctionnement d'un élément d'ouvrage hydraulique (casse d'une porte d'écluse, par exemple);
- **présence d'embâcles** (en particulier à proximité d'un instrument de mesure ou d'une laisse de crue).

Dans le cas d'un modèle réalisé pour une étude portant sur un événement historique, ce dernier ne doit pas être pris comme crue de calage ou comme crue de validation. Dans la mesure du possible, le modèle doit être testé et validé avec d'autres crues. Il pourra ensuite être utilisé pour modéliser la crue historique objet de l'étude.

### ET SI UNE CRUE SURVIENT PENDANT L'ÉTUDE ?

Selon la quantité de données de calage disponibles, prévoir une campagne de relevés de terrain si une crue survient pendant l'étude peut être pertinent, même si c'est une petite crue. Dans le cas d'une crue majeure, ne pas faire de campagne de laisse de crue est difficilement justifiable.

Dans l'idéal, une capitalisation des données de crue est organisée selon un protocole de collecte préparé avant la crue. Si le modèle est déjà calé, il est alors possible d'utiliser cette crue en crue de validation en utilisant les données capitalisées. Pour pouvoir prendre en compte ces nouvelles données, il est important de prévoir un avenant au marché de l'étude pour modéliser ce scénario supplémentaire.

## 6.4 Fiabilité du modèle hydraulique

Du fait des différentes incertitudes inhérentes aux données ayant servi à construire ou caler le modèle hydraulique, le calage est rarement parfait (sans écart entre simulation et réalité). Un modèle hydraulique réalisé pour représenter les débordements de cours d'eau est usuellement jugé acceptable si pour le pic de crue, est obtenu :

- un écart de plus ou moins 10 à 20 centimètres entre les hauteurs d'eaux issues de la modélisation et celles mesurées ;
- un écart de plus ou moins 10% entre les débits issus de la modélisation et ceux mesurés.

Les conditions ne sont pas nécessairement toutes les deux à respecter, tout dépend de la précision attendue pour l'étude. Dans le cas d'un PPRI par débordement de cours d'eau, par exemple, la finesse du calage en hauteur est priorisée par rapport au calage de la propagation de l'onde de crue. Dans le cas de modèles dédiés à la prévision des crues, c'est l'inverse.

## 6.5 Ajustements des paramètres dans le cadre du calage

Quand cela est nécessaire, plusieurs paramètres peuvent être ajustés afin de caler un modèle hydraulique selon la configuration du secteur à modéliser et les données disponibles.

### 6.5.1 Les coefficients de frottement

Les coefficients de frottement, aussi appelés coefficients de Strickler ou Manning-Strickler, caractérisent la rugosité apparente des fonds et des parois. En effet, l'eau s'écoule respectivement plus vite dans un canal en béton lisse et dans une rue que dans un lit naturel de rivière ou dans une forêt. Ce paramètre peut être ajusté en lit mineur et en lit majeur, en veillant à la cohérence avec l'occupation des sols.

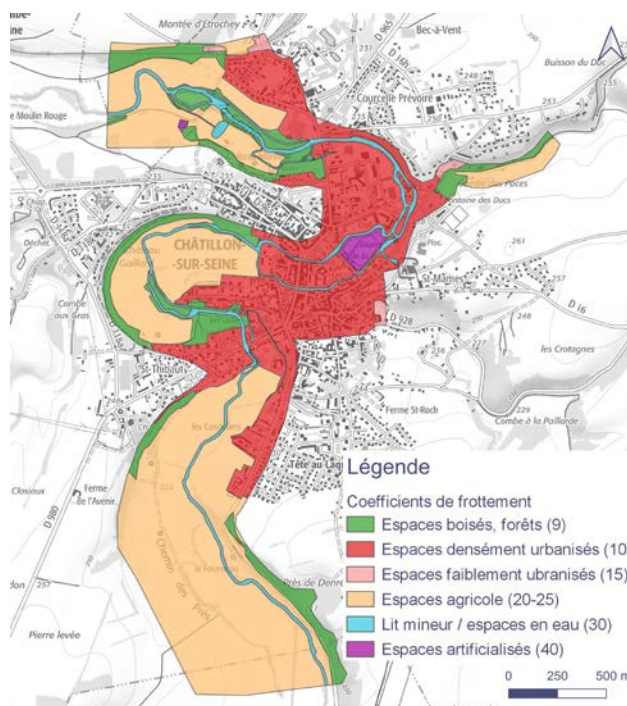


Figure 10 : Spatialisation des coefficients de frottement sur le périmètre d'un modèle 2D.

### 6.5.2 Ouvrages

Les ouvrages en lit mineur, tels que les seuils et les ponts, peuvent créer une variation significative de la hauteur d'eau et de la ligne d'eau due à une modification des écoulements et provoquant une perte de la charge hydraulique au droit de ces éléments. Les pertes de charge sont matérialisées dans les modèles via un coefficient de perte de charge qu'il est possible d'ajuster en fonction des observations.

### 6.5.3 Modification des données d'entrée

La correction des données d'entrée du modèle peut être envisagée si et seulement si le modélisateur dispose de preuves d'une mauvaise estimation de ses conditions aux limites :

- pour la condition limite amont : les débits, la forme de l'hydrogramme ;
- pour la condition limite aval : courbe de tarage, consigne en hauteur ou débit.

## 6.6 Quand arrête-t-on le calage ?

Après avoir ajusté tous les paramètres vus précédemment, le calage peut rester imparfait pour différentes raisons. Certaines crues de calage sont parfois trop « spécifiques » pour être retranscrites par le modèle.

C'est le cas par exemple d'une crue sur un sol glacé qui occasionne une propagation accélérée de l'onde de crue, ou de la présence avérée d'embâcles sous un pont générant une surélévation du niveau d'eau à l'amont. Il peut arriver également que le modèle soit plus imprécis dans certaines zones. Le modélisateur devra être transparent quant aux capacités du modèle et à ses limites (gammes de crue modélisables, zones d'incertitudes, etc.) et préciser les phénomènes pris en compte.

Il est également illusoire d'avoir une précision sensiblement inférieure à celle des données de calage utilisées.

## 7 • EXPLOITATIONS DES RÉSULTATS DU MODÈLE HYDRAULIQUE

### 7.1 Les sorties cartographiques

Les résultats d'une modélisation numérique hydraulique sont très souvent exploités sous forme de cartographie représentant généralement une ou plusieurs variables descriptives des écoulements (hauteur, vitesse, etc.) :

- soit à un instant donné (au pic de débit, par exemple) ;
- soit de manière agrégée, sur une période modélisée (maximum en chaque point, pris de manière indépendante) ;
- soit comparativement à un autre événement ou scénario.

Les cartographies se présentent de différentes façons :

- sous forme d'image (format raster), où le résultat est représenté pixel par pixel ;
- sous format vecteur, où les résultats sont représentés selon des surfaces (surfaces inondées par exemple), ou des lignes (vecteurs vitesses sous forme de flèches, par exemple).

En particulier, et en application de la directive européenne Inspire<sup>7</sup>, la Commission de validation des données pour l'information spatialisée (COVADIS) a établi un standard spécifique au risque inondation applicable aux résultats produits pour les études réglementaires sur ce thème.

Les versions numériques des cartes produites sont généralement rattachées à un système de coordonnées de référence.

Au-delà de la représentation cartographique des variables de sortie, telles que la hauteur d'eau, les cotes d'eau maximales ou les vitesses, il est possible d'illustrer l'influence de certains paramètres du modèle (coefficient de frottement, par exemple) sous forme de carte pour notamment localiser les secteurs et les enjeux sensibles à la modification de ces valeurs.

7. <https://www.ecologie-solidaire.gouv.fr/directive-europeenne-inspire>.

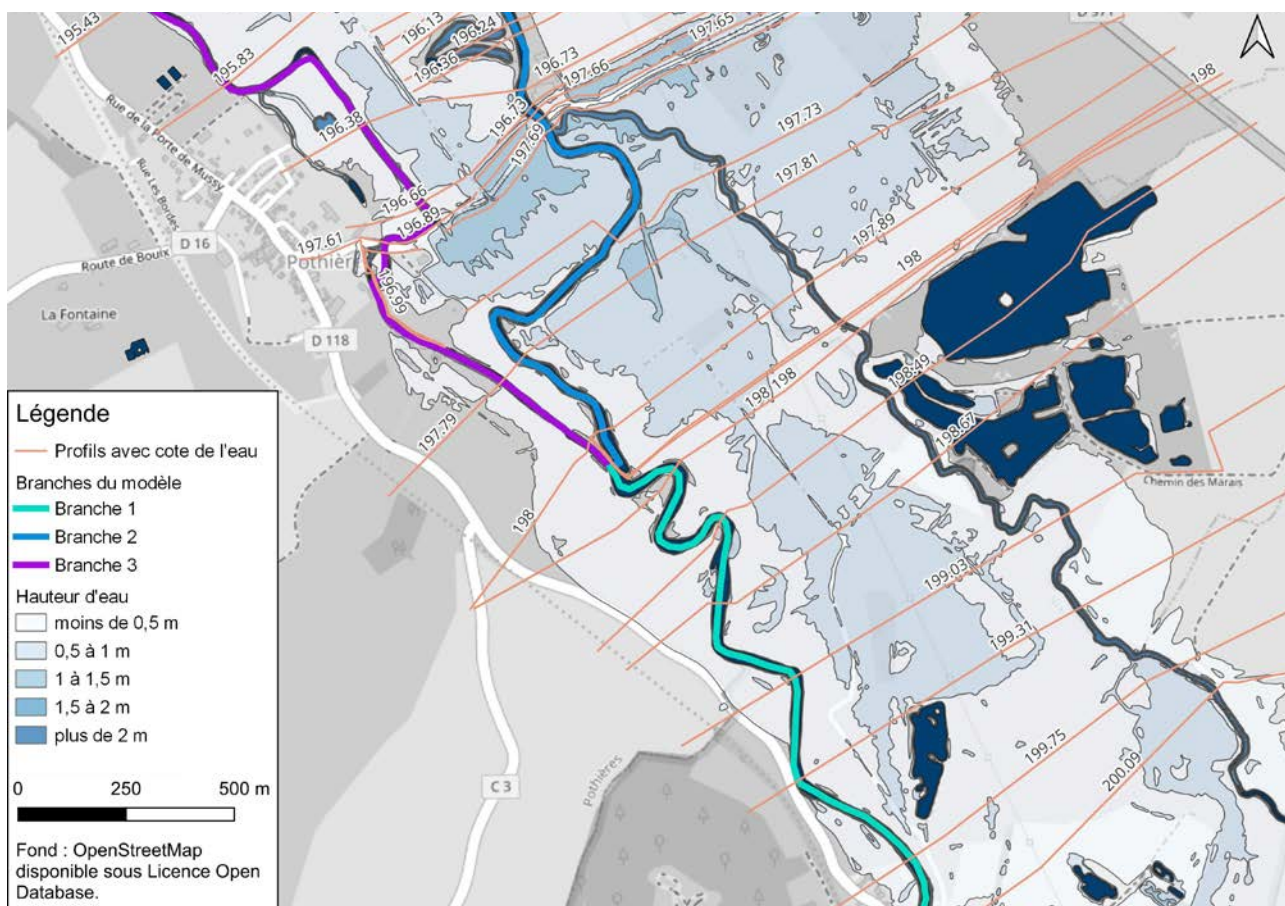


Figure 11 : Exemple de représentation des hauteurs et niveaux d'eau.

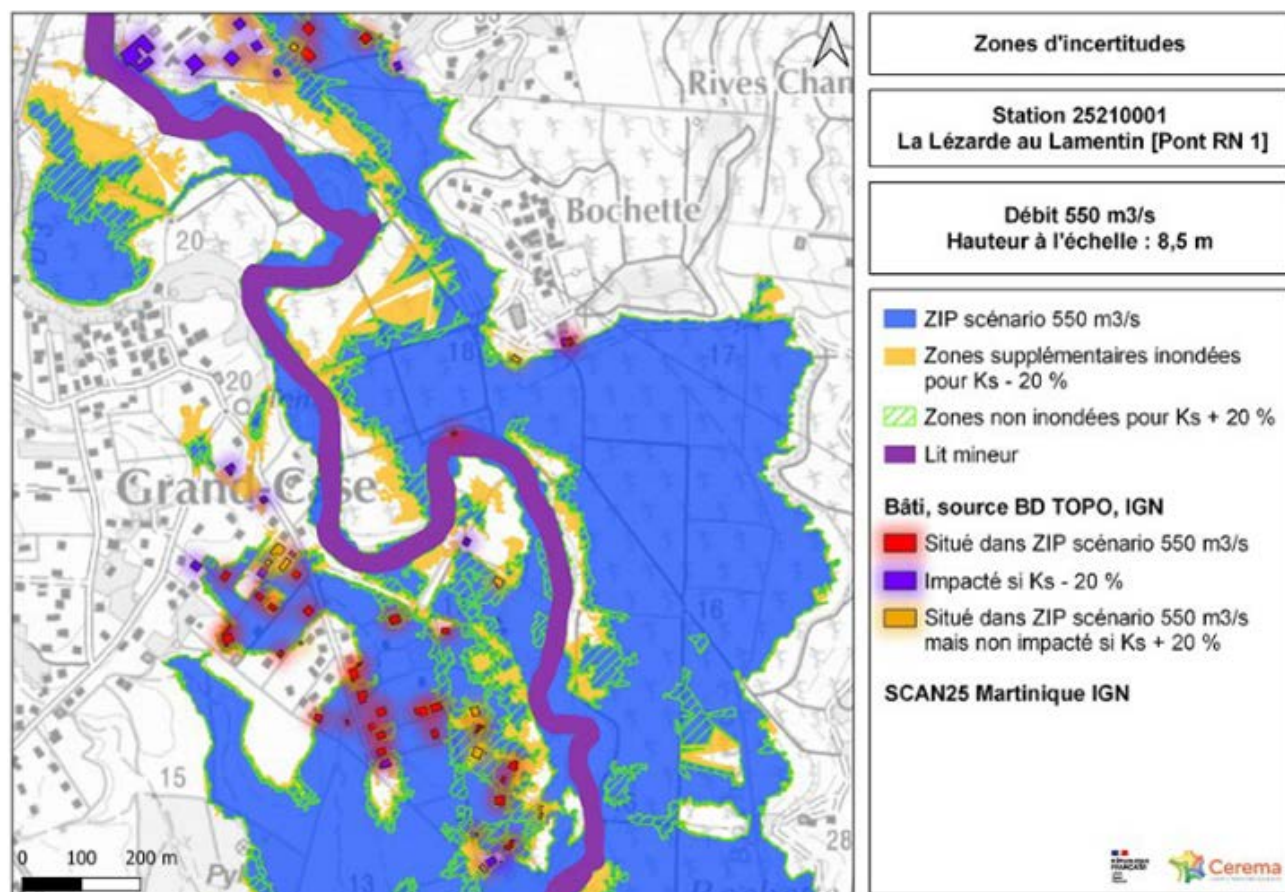


Figure 12 : Comparaison de zones inondées selon plusieurs hypothèses sur les coefficients de frottement (Ks).

## 7.2 Les graphiques et les profils

Les résultats d'une modélisation numérique hydraulique sont également fréquemment représentés **sous forme de graphiques**.

Ils peuvent donner à voir l'évolution temporelle, en un point précis du modèle, d'une variable hydraulique (hauteur d'eau, débit, etc.).

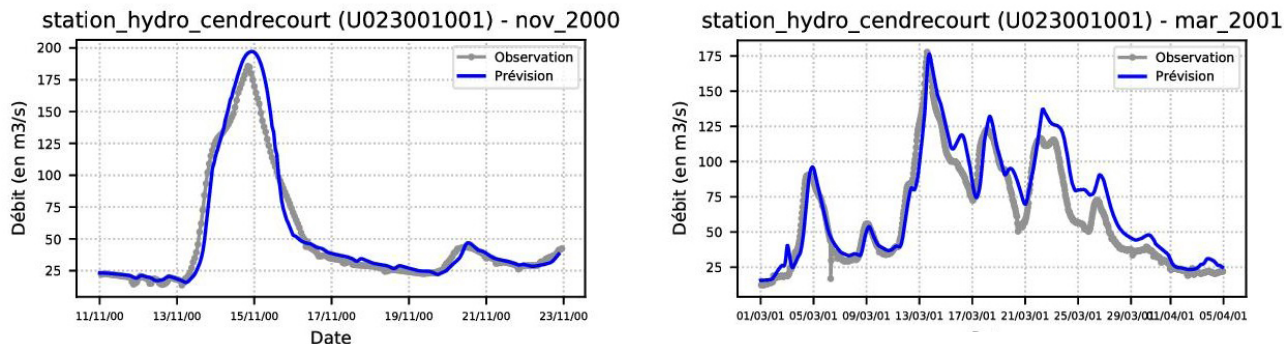


Figure 13 : Comparaison des côtes et débits observés (observation, en gris) et modélisés, (prévision, en bleu) sous forme de graphes pour la prévision des crues dans un modèle Mascaret 1D pour la station de Cendrecourt.

Les graphiques peuvent aussi représenter les résultats de variables hydrauliques (débit, hauteur d'eau, etc.) sur des **sections particulières de rivières** (profils en travers,

profils en long), représentant des maxima, minima, ou à instant donné de la modélisation.

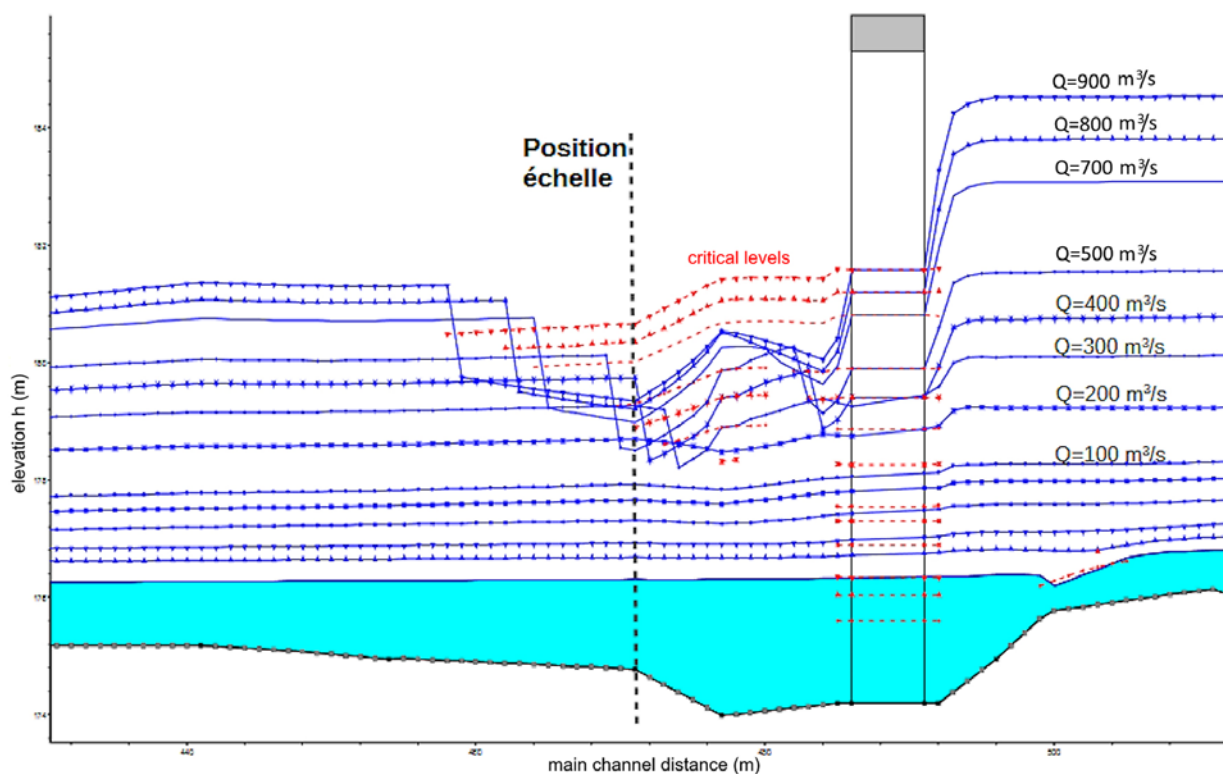
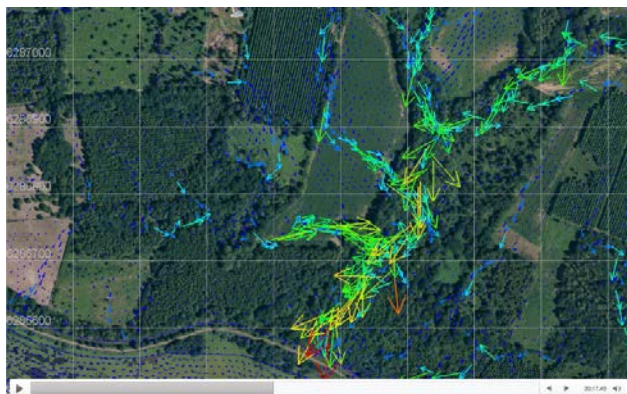


Figure 14 : Comparaison de lignes d'eau calculées sous un pont, pour différents débits de crue (nommés « Q » dans le graphique) dans un modèle. code de calcul : HEC-RAS.

### 7.3 Les visuels communicants

Il est possible d'enregistrer des vidéos ou des animations qui illustrent notamment le passage d'une crue, d'un débordement de cours d'eau, les fluctuations d'un niveau d'eau, ou des vitesses, ou la propagation de vagues dans un estuaire au cours du temps.



Ces visuels sont particulièrement utiles pour comprendre et expliquer les dynamiques en œuvre pendant les événements modélisés. Ils permettent également d'améliorer l'appropriation de résultats de modélisation numérique par les acteurs et riverains des territoires étudiés.

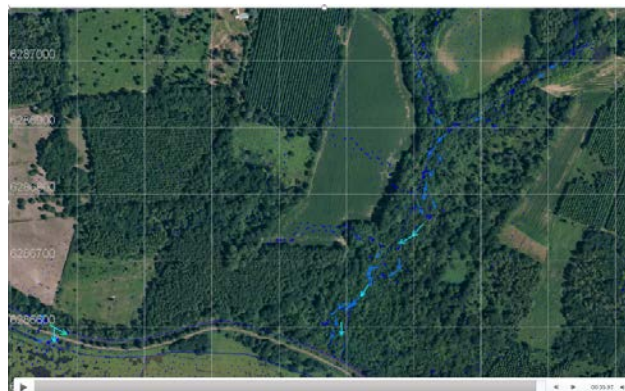


Figure 15 : Captures d'écran d'une animation, illustrant les chemins préférentiels et les vitesses de ruissellement au cours d'un événement de pluie intense dans un modèle 2D.

## 8 • CONCLUSION

Les modèles numériques hydrauliques sont un outil majeur dans la politique de prévention et de prévision des risques d'inondation en France. Permettant de rejouer aussi bien des crues historiques que de simuler des crues théoriques, ils fournissent des données précieuses mobilisables dans le cadre de bon nombre d'études du fait de l'aide qu'ils apportent pour appréhender des situations relativement différentes (forme de l'hydrogramme singulière, évolution significative du lit, conséquences du changement climatique<sup>8</sup>, etc.).

Avant de commander un modèle numérique hydraulique, il convient tout d'abord de s'interroger sur les objectifs visés par la modélisation, d'analyser le secteur à modéliser, de critiquer la qualité des données disponibles (y compris les données nécessaires pour le calage) et d'argumenter les hypothèses prises en compte. Les phases de collecte, de mise en forme des données nécessaires et de construction du modèle hydraulique sont essentielles à la qualité des résultats du modèle. Le temps qui leur est consacré doit être suffisant et ne pas être négligé, d'autant plus sur les secteurs complexes : nombreux ouvrages hydrauliques, confluences, etc.

La phase de calage et de validation du modèle est également une étape indispensable pour garantir la qualité des résultats de la modélisation numérique hydraulique. À défaut de disposer de données de calage ou de validation, le modélisateur devra réaliser des tests de sensibilité et être transparent sur les secteurs où les gammes de crues et les capacités du modèle n'ont pu être évaluées.

8. Une fois que l'influence du changement climatique sur les hydrogrammes de crue sera quantifiée, les modèles hydrauliques permettront de simuler ces scénarios et mesurer les conséquences sur l'inondabilité des territoires.

# ANNEXE

## Annexe 1

Données mobilisables pour la modélisation hydraulique des inondations par débordement de cours d'eau.

| DONNÉES NATIONALES (LISTE NON EXHAUSTIVE)                 |                             |                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caractéristiques du secteur d'étude                       |                             |                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Données                                                   | Éditeur                     | Adresse Internet                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Topo-bathymétrie</b>                                   |                             |                                                                                                                                                                                                                                                  |
| RGE-Alti                                                  | IGN                         | <a href="https://geoservices.ign.fr/rgealti">https://geoservices.ign.fr/rgealti</a>                                                                                                                                                              |
| Litto3D®<br>anciennement<br>histolitt®                    | Shom-IGN                    | <a href="https://diffusion.shom.fr/donnees/altimetrie-littorale.html">https://diffusion.shom.fr/donnees/altimetrie-littorale.html</a><br><a href="https://data.shom.fr">data.shom.fr</a> (rubrique Données de référence > Altimétrie littorale). |
| LiDAR HD                                                  | IGN                         | <a href="https://geoservices.ign.fr/lidarhd">https://geoservices.ign.fr/lidarhd</a>                                                                                                                                                              |
| MNT<br>topo-bathymétries                                  | Shom                        | <a href="https://diffusion.shom.fr/donnees/bathymetrie.html">https://diffusion.shom.fr/donnees/bathymetrie.html</a>                                                                                                                              |
| MNT bathymétries                                          | Commission européenne       | <a href="http://www.emodnet-hydrography.eu">www.emodnet-hydrography.eu</a>                                                                                                                                                                       |
| <b>Formations géologiques et sous-sol</b>                 |                             |                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Cartes de natures de fond                                 | Shom                        | <a href="https://diffusion.shom.fr/donnees/sedimentologie.html">https://diffusion.shom.fr/donnees/sedimentologie.html</a>                                                                                                                        |
| Cartes géologiques                                        | BRGM                        | <a href="https://infoterre.brgm.fr/page/cartes-geologiques">https://infoterre.brgm.fr/page/cartes-geologiques</a>                                                                                                                                |
| Banque de données du sous-sol                             | BRGM                        | <a href="https://infoterre.brgm.fr/page/banque-sol-bss">https://infoterre.brgm.fr/page/banque-sol-bss</a>                                                                                                                                        |
| <b>Ouvrages et usage du sol</b>                           |                             |                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Corine Land Cover                                         | Copernicus                  | <a href="https://land.copernicus.eu/local/coastal-zones">https://land.copernicus.eu/local/coastal-zones</a>                                                                                                                                      |
| Cours d'eau (BD Topage®)                                  | SANDRE                      | <a href="https://www.sandre.eaufrance.fr/atlas/srv/fre/catalog.search#/metadata/7fa4c224-fe38-4e2c-846d-dcc2fa7ef73e">https://www.sandre.eaufrance.fr/atlas/srv/fre/catalog.search#/metadata/7fa4c224-fe38-4e2c-846d-dcc2fa7ef73e</a>            |
| Plans locaux d'urbanisme                                  | MCTRCT IGN                  | <a href="https://www.geoportail-urbanisme.gouv.fr/">https://www.geoportail-urbanisme.gouv.fr/</a>                                                                                                                                                |
| Cadastre                                                  | DINUM                       | <a href="https://cadastre.data.gouv.fr/">https://cadastre.data.gouv.fr/</a>                                                                                                                                                                      |
| Bornages et interventions de géomètres                    | Ordre des géomètres-experts | <a href="https://www.geofoncier.fr/">https://www.geofoncier.fr/</a>                                                                                                                                                                              |
| Données statistiques démographie, logement et équipements | Insee                       | <a href="https://www.insee.fr/">https://www.insee.fr/</a>                                                                                                                                                                                        |
| Profils en long des cours d'eau                           | IGN                         | <a href="https://fiches-geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&amp;action=e_profils">https://fiches-geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&amp;action=e_profils</a>                                                                        |
| <b>Images aériennes et satellitaires</b>                  |                             |                                                                                                                                                                                                                                                  |

|                                                                            |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Orthophotographie du littoral (couleur RVB et infrarouge IRC)              | MTES-IGN-Cerema                      | <a href="https://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/ortho-littorale-a1101.html">https://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/ortho-littorale-a1101.html</a>                                                                                                                                                                 |
| BD ORTHO®                                                                  | IGN                                  | <a href="https://geoservices.ign.fr/bdortho">https://geoservices.ign.fr/bdortho</a>                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Images aériennes historiques                                               | IGN                                  | <a href="https://remonterletemps.ign.fr/">https://remonterletemps.ign.fr/</a>                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                                            | Shom, Ifremer, Photothèque nationale | <a href="https://sextant.ifremer.fr/photos-anciennes-littoral/">https://sextant.ifremer.fr/photos-anciennes-littoral/</a>                                                                                                                                                                                                                       |
| Images satellites Sentinelle                                               | Copernicus                           | <a href="https://dataspace.copernicus.eu/browser/">https://dataspace.copernicus.eu/browser/</a>                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Images satellites SPOT et Pleiades                                         | DINAMIS                              | <a href="https://dynamis.data-terra.org/catalogue/">https://dynamis.data-terra.org/catalogue/</a>                                                                                                                                                                                                                                               |
| Photographies aériennes obliques ou terrestres                             | MTES                                 | <a href="https://terra.developpement-durable.gouv.fr/">https://terra.developpement-durable.gouv.fr/</a>                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Sources historiques</b>                                                 |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Archives nationales                                                        |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Archives du Service historique de la Défense                               |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Iconographie : photographies, peintures, cartes postales, etc.             |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Cartes actuelles et anciennes</b>                                       |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Scan 25®                                                                   | IGN                                  | <a href="https://geoservices.ign.fr/scan25">https://geoservices.ign.fr/scan25</a>                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Cartes de Cassini et d'état-major                                          | IGN                                  | <a href="https://remonterletemps.ign.fr/">https://remonterletemps.ign.fr/</a>                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Archives de la BnF                                                         | BnF                                  | <a href="https://gallica.bnf.fr/">https://gallica.bnf.fr/</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Paramètres hydro-météorologiques</b>                                    |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Courants</b>                                                            |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Débits fluviaux                                                            | MTE                                  | <a href="https://www.hydro.eaufrance.fr/">https://www.hydro.eaufrance.fr/</a>                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Données météorologiques</b>                                             |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Vent, pression atmosphérique, températures, précipitations, ensoleillement | Météo France                         | <a href="https://donneespubliques.meteofrance.fr/">https://donneespubliques.meteofrance.fr/</a><br><a href="https://meteo.data.gouv.fr">https://meteo.data.gouv.fr</a><br><a href="https://services.meteofrance.com/climatologie/ROSE-DES-VENTS/rose-des-vents">https://services.meteofrance.com/climatologie/ROSE-DES-VENTS/rose-des-vents</a> |
|                                                                            | Association infoclimat               | <a href="https://www.infoclimat.fr/">https://www.infoclimat.fr/</a>                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Réanalyses des situations météorologiques                                  | Modèles CEP et ECMWF notamment       | <a href="https://www.ecmwf.int/">https://www.ecmwf.int/</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Shyreg                                                                     | Inrae                                | <a href="https://shyreg.recover.inrae.fr/">https://shyreg.recover.inrae.fr/</a>                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Niveaux d'eau (milieux estuariens)</b>                                  |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Hydroportail                                                               | MTES                                 | <a href="https://www.hydro.eaufrance.fr/">https://www.hydro.eaufrance.fr/</a>                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Repères de crues<br>Plateforme nationale collaborative                     | MTES                                 | <a href="https://www.reperesdecruces.developpement-durable.gouv.fr/">https://www.reperesdecruces.developpement-durable.gouv.fr/</a>                                                                                                                                                                                                             |

|                                                                                                                             |              |                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DRIAS-Eau, les futurs de l'eau                                                                                              | Météo-France | <a href="https://www.drias-climat.fr/">https://www.drias-climat.fr/</a>                                                       |
| Vigicrues                                                                                                                   | MTES         | <a href="https://www.vigicrues.gouv.fr/">https://www.vigicrues.gouv.fr/</a>                                                   |
| <b>Climat</b>                                                                                                               |              |                                                                                                                               |
| DRIAS Climat                                                                                                                | Météo-France | <a href="https://www.drias-climat.fr/">https://www.drias-climat.fr/</a>                                                       |
| <b>Portails généraux</b>                                                                                                    |              |                                                                                                                               |
| Géoservices IGN                                                                                                             |              | <a href="https://geoservices.ign.fr/">https://geoservices.ign.fr/</a>                                                         |
| Géoportail                                                                                                                  |              | <a href="https://www.geoportail.gouv.fr/">https://www.geoportail.gouv.fr/</a>                                                 |
| Données et études statistiques<br>Pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports |              | <a href="https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/">https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/</a> |

## DONNÉES LOCALES (LISTES NON EXHAUSTIVES)

|                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Études techniques et scientifiques déjà réalisées sur le secteur d'étude                                                                                                                                                                                              |
| Études techniques et scientifiques déjà réalisées sur le secteur dans le cadre du Plan de prévention des risques relatif aux aléas littoraux (PPR), Territoires à risques importants d'inondation (TRI), de Programmes d'actions de prévention des inondations (PAPI) |
| Cartes élaborées dans le cadre de la directive inondation (DI), zones d'inondation potentielle (ZIP), de l'atlas des zones inondables (AZI), d'études de danger (EDD)                                                                                                 |
| Documents dont disposent le/les SDIS ; la mission de référent départemental inondation (RDI) et l'autorité compétente en matière de GEMAPI (gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations) pour la gestion des inondations                             |
| Schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE)                                                                                                                                                                                                                   |
| Dossier départemental sur les risques majeurs (DDRM)                                                                                                                                                                                                                  |
| Document d'information communal sur les risques majeurs (DICRIM)                                                                                                                                                                                                      |
| Documents techniques, délibérations, documents divers des communes et inter-communes                                                                                                                                                                                  |
| Études régionales et REX des SPC, SDIS, agences de l'eau, opérateurs de l'État, conseils municipaux                                                                                                                                                                   |
| Plans communaux et intercommunaux de sauvegarde (PCS et PICS)                                                                                                                                                                                                         |
| Mémoires universités, thèse, articles scientifiques                                                                                                                                                                                                                   |
| Documents détenus par les sociétés savantes                                                                                                                                                                                                                           |
| Images drones                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Sources historiques locales                                                                                                                                                                                                                                           |
| Archives départementales                                                                                                                                                                                                                                              |
| Archives communales (notamment les registres de délibération des conseils municipaux)                                                                                                                                                                                 |
| Archives d'exploitants locaux                                                                                                                                                                                                                                         |
| Archives de la presse locale et régionale, des associations et des passionnés d'histoire locale et éventuellement de témoins d'événements                                                                                                                             |
| Iconographie : photographies, peintures, cartes postales, etc.                                                                                                                                                                                                        |

## GLOSSAIRE

Les définitions suivantes sont extraites du Guide méthodologique pour l'élaboration des Plans de prévention des risques d'Inondation par débordement de cours d'eau (hors cours d'eau torrentiel); à l'exception de celles des termes « code de calcul » et « topographie ».

**Aléas** : phénomène, naturel ou technologique, de nature aléatoire, caractérisé par sa probabilité d'occurrence et son intensité. Pour les inondations hors cours d'eau torrentiels, plusieurs niveaux d'aléa sont distingués en fonction des intensités associées aux principaux paramètres physiques de l'inondation de référence : hauteurs d'eau et dynamiques (vitesses d'écoulement et vitesse de montées des eaux).

**Bassin-versant** : zone géographique dans laquelle les eaux collectées circulent naturellement vers un point de convergence commun, appelé exutoire (cours d'eau, lac, mer, océan, etc.). À l'amont, le bassin-versant est délimité par des lignes de partage des eaux, qui correspondent généralement à des lignes de crête. (Dans quelques cas particuliers, comme les terrains karstiques dans lesquels la circulation interne de l'eau est complexe, la topographie seule peut ne pas suffire à déterminer la ligne de partage des eaux.)

**Bathymétrie** : description du relief sous les surfaces en eau, équivalent immergé de la topographie.

**Bief** : portion d'un cours d'eau ou d'un canal entre deux points singuliers de l'écoulement (chutes, écluses, etc.).

**Charge (mise en)** : un ouvrage est dit « mis en charge » lorsqu'il est soumis à des pressions différentes de l'eau sur chacun de ses côtés. Cette configuration se retrouve classiquement durant une crue lorsque la cote d'eau dans le lit mineur est supérieure à l'altitude du terrain naturel à l'arrière de l'ouvrage. La différence entre ces deux altitudes est la hauteur de mise en charge.

**Code de calcul** : outil numérique permettant de simuler les écoulements d'eau en résolvant les équations physiques qui les régissent, notamment les équations de Barré de Saint-Venant pour les écoulements à surface libre.

**Concomitance** : coïncidence temporelle entre plusieurs événements. Deux événements sont concomitants lorsqu'ils se produisent simultanément (ou dans une période très proche).

**Courbe de tarage** : ce terme est utilisé de manière spécifique en hydrométrie des cours d'eau pour désigner la courbe qui relie le débit (Q) à la hauteur d'eau (h) dans une section donnée :  $Q = f(h)$ . Les courbes de tarage sont établies à partir de mesures de débit faites sur une section de contrôle (opération dite de jaugeage).

**Crue** : augmentation significative et temporaire du débit d'un cours d'eau. Le débit est généralement conditionné par les précipitations, mais également par l'état du bassin-versant et les caractéristiques du cours d'eau. En fonction de l'importance des débits, la crue peut être contenue dans le lit mineur du cours d'eau, ou déborder dans son lit majeur. Lorsque les eaux sortent du lit mineur, on parle d'inondation.

**Débordement de cours d'eau** : sortie des eaux du lit mineur consécutive à la propagation d'un débit supérieur à sa capacité.

**Embâcle** : accumulation de matériaux transportés par les flots (végétation, rochers, véhicules automobiles, etc.) bloqués en amont d'un ouvrage (pont) ou dans des parties resserrées d'une vallée (gorges étroites).

**Fonctionnement hydraulique** : modalités d'écoulements des eaux sur le bassin-versant, notamment au regard du relief, du réseau hydrographique, et du comportement en crue (zones de débordement, nature des écoulements dans les zones inondables, etc.).

**Géomorphologie** : science qui étudie les formes de relief, les formations associées, leur évolution, les mécanismes – d'origine interne ou externe – qui les façonnent et les facteurs qui les contrôlent.

**Hydraulique** : science de la mécanique des écoulements. En matière d'inondation, l'hydraulique vise à déterminer les conditions d'écoulements des eaux en cas de crue (débit, hauteur, vitesse, etc.).

**Hydrogéomorphologie** : approche qui analyse les conditions naturelles et anthropiques d'écoulement des eaux dans un bassin-versant en étudiant la structure des vallées. Cette approche consiste à analyser les différentes unités dites « hydrogéomorphologiques » des vallées, constituées des différents lits que la rivière a façonnés dans le fond de vallée au fil des siècles, au fur et à mesure des crues successives.

**Hydrogramme** : courbe d'évolution du débit en fonction du temps en un point donné d'un cours d'eau. Pour l'élaboration d'un PPRI, on s'intéresse aux hydrogrammes de crue.

**Hydrogramme de crue** : courbe d'évolution du débit d'un cours d'eau en fonction du temps, pendant une crue, en un point donné.

**Hydrologie** : science naturelle qui se rapporte à toute action, étude ou recherche sur le cycle de l'eau et ses propriétés. Son étude concerne les océans, les eaux de surface, mais aussi les nappes phréatiques.

**Inondation** : submersion temporaire, rapide ou lente, de zones habituellement hors d'eau.

**Inondation par débordement de cours d'eau (fluviale)** : recouvrement d'eau faisant suite à une crue qui déborde du lit mineur ou qui afflue dans les talwegs ou les dépressions du lit moyen ou majeur. Elle dure de quelques heures à quelques jours en fonction de la durée de la crue et du ressuyage.

**Lit majeur** : lit occupé par les crues provoquant des débordements du lit mineur (périodes de retour variant de 10 à plus de 1 000 ans). Dans des vallées escarpées, il peut correspondre à tout le fond de vallée jusqu'aux pieds de versants. En plaine ou dans les vallées larges, sa frontière est plus difficile à délimiter. Il est souvent couvert d'alluvions fines (limons et argiles) et colonisé par une formation végétale moins hygrophile (ripisylve).

**Lit mineur** : chenal principal d'un cours d'eau.

**Modélisation hydraulique numérique** : quantification et spatialisation d'une crue pour une occurrence donnée par le biais d'outils numériques et basée sur la résolution, plus ou moins simplifiée, des équations fondamentales de l'hydraulique.

**Morphogène** : une crue est dite morphogène lorsqu'elle provoque des changements importants de la topographie du lit de la rivière et des secteurs de débordement.

**Profil en long** : évolution de l'altitude du fond d'un chenal en fonction de l'abscisse longitudinale de ce dernier.

**Profil en travers** : évolution de l'altitude de la section du chenal dans un plan perpendiculaire à l'axe principal d'écoulement.

**Sur-aléa** : aléa résultant de la défaillance d'un élément naturel ou anthropique lors d'un événement (par exemple, une rupture de digue) et dont le niveau est supérieur à celui que le même événement aurait engendré en l'absence de cet élément naturel ou anthropique.

**Temps de concentration d'un bassin-versant** : appelé aussi durée caractéristique ou temps de réponse, il correspond à la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau ayant le plus long chemin hydraulique à parcourir parvienne jusqu'à l'exutoire. Elle dépend notamment de la taille et de la forme du bassin-versant, de la topographie et de l'occupation des sols.

**Test de sensibilité** : test dont l'objectif est d'évaluer dans quelle mesure des incertitudes relatives à des hypothèses se répercutent sur les résultats associés. Exemples : sensibilité des intensités au regard de l'estimation des débits, des choix de coefficients de rugosité ou des hypothèses prises sur la formation d'embâcle. En pratique, plusieurs modélisations, correspondant aux différentes hypothèses, sont réalisées et une comparaison des résultats est effectuée.

**Topographie** : description du relief au-dessus des surfaces en eau, équivalent émergé de la bathymétrie.

## LISTES DES SIGLES ET ACRONYMES

**ACB** : analyse coût/bénéfices

**AZI** : atlas des zones inondables

**BE** : bureau d'études

**EDD** : études de danger

**GEMAPI** : compétence de gestion des milieux aquatiques et de préventions des inondations

**IGN** : Institut national de l'information géographique et forestière

**MNT** : modèle numérique de terrain

**PAC** : porter à connaissance

**PAPI** : Programme d'actions et de prévention des inondations

**PK** : point kilométrique

**PPRI** : Plan de prévention des risques inondation

**SIG** : système d'information géographique

**SPC** : services de prévision des crues

**UH** : unités hydrométriques

**ZICH** : zone inondée par classes de hauteurs d'eau

**ZIP** : zones inondées potentielles

## Pour en savoir plus

- *Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques*, 2007, (en cours de mise à jour)
- *Guide méthodologique pour l'élaboration des plans de prévention des risques d'inondations par débordement de cours d'eau (hors cours d'eau torrentiel)*, MTECT, 2024
- *Rex technique inondation : Guide de préparation et de mise en œuvre*, Cerema, Les références, 2024

## AGIR POUR DES TERRITOIRES ADAPTÉS AU DÉFI CLIMATIQUE

Le Cerema, établissement public à la fois national et local, accompagne l'État, les collectivités et les entreprises pour adapter les territoires au défi climatique, dans 6 domaines d'activité : aménagement et stratégies territoriales, bâtiment, mobilités, infrastructures de transport, environnement et risques, mer et littoral. Il relève des ministères chargés de l'Aménagement du territoire et de la Transition écologique.

Téléchargez nos publications sur [doc.cerema.fr](https://doc.cerema.fr)

# INONDATIONS PAR DÉBORDEMENT DE COURS D'EAU

COMMENT LES MODÉLISER



*Photographie des crues de 2025 en Ile-et-Vilaine, réalisée par drone.*

## RÉDACTEURS

Alexis Bernard, Sabine Cavellec, Yohann Evain, Rémy Gasset, Nicolas Guillou, Tiffany Legendre, Anne-Laure Tiberi-Wadier, Rémi Trenkmann (Cerema)

## CONTRIBUTEURS ET RELECTEURS

Laura Barreau, Yann Deniaud, Denis Gateau, Élodie Paya, Vincent Remy (Cerema)

## CONTACTS

[dtecrem.cerema@cerema.fr](mailto:dtecrem.cerema@cerema.fr)



AMÉNAGEMENT & STRATÉGIES TERRITORIALES | BÂTIMENT  
| MOBILITÉS | INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT |  
ENVIRONNEMENT & RISQUES | MER & LITTORAL