

Le risque d'inondation sur l'Agglomération de Nevers

Pourquoi
et comment
modéliser
pour EGRIAN

- 3 Objectifs des modèles hydrauliques
- 4 Le modèle global dit 1D
- 5 Le modèle détaillé dit 2D
- 6 Les deux modélisations sont complémentaires
- 7 Bien comprendre les crues
- 8 La crue touche les premiers casiers
- 9 La crue touche de nouveaux secteurs
- 10 La crue touche la totalité des zones inondables
- 11 Etapes successives des modélisations
- 12 Etape 1 : Bien comprendre le territoire
- 13 Etape 2 : Le recueil des données existantes
- 14 Recueil des dimensions des ouvrages hydrauliques
- 15 Le recueil des données chiffrées existantes
- 16 Les limites du recueil des données existantes
- 17 Etape 3 : De nouveaux relevés de terrain
- 18 Etape 4 : Construire le modèle global 1D
- 19 Bien découper le territoire en casiers
- 20 Les liaisons dans le modèle global
- 21 Modéliser les singularités hydrauliques
- 22 Etape 5 : Construire le modèle détaillé 2D
- 23 Prendre en compte les éléments structurants
- 24 On peut représenter les constructions
- 25 Il faut posséder une topographie parfaite
- 26 Déterminer les conditions limites
- 27 Etape 6 : Construire les modèles dans les logiciels
- 28 Le modèle détaillé est une interprétation du MNT
- 29 Etape 7 : Bien caler les modèles
- 30 Les sites d'observation servent au calage
- 31 Les crues de calage utilisées 2001, 2003, 2005
- 32 Simuler pour caler les modèles
- 33 Un modèle est un outil qui a des limites
- 34 Localiser les brèches potentielles
- 35 Modéliser les brèches

Crédits Photos

Hubert Couprie

Pascal François

Jean-Pierre Ferrand

Photographies et archives Minea

Sources des documents : Hydratec et Sogreah

Objectifs des modèles hydrauliques

Une modélisation hydraulique est une maquette numérique qui représente virtuellement les vallées avec les différents lits des rivières (mineur, endigué et majeur).

Modéliser permet de comprendre et d'évaluer

Modéliser permet de comprendre le déroulé des crues et d'évaluer les impacts comparés d'un ou des aménagements envisagés.

Pour EGRIAN, deux objectifs conduisent à construire des modèles hydrauliques :

- Être capable d'élaborer un diagnostic de l'inondation des différentes crues en fonction de leur probabilité de survenance.
- Tester et comparer des aménagements possibles (scénarios) capables de réduire les niveaux et les vitesses des eaux lors des crues (aléas).

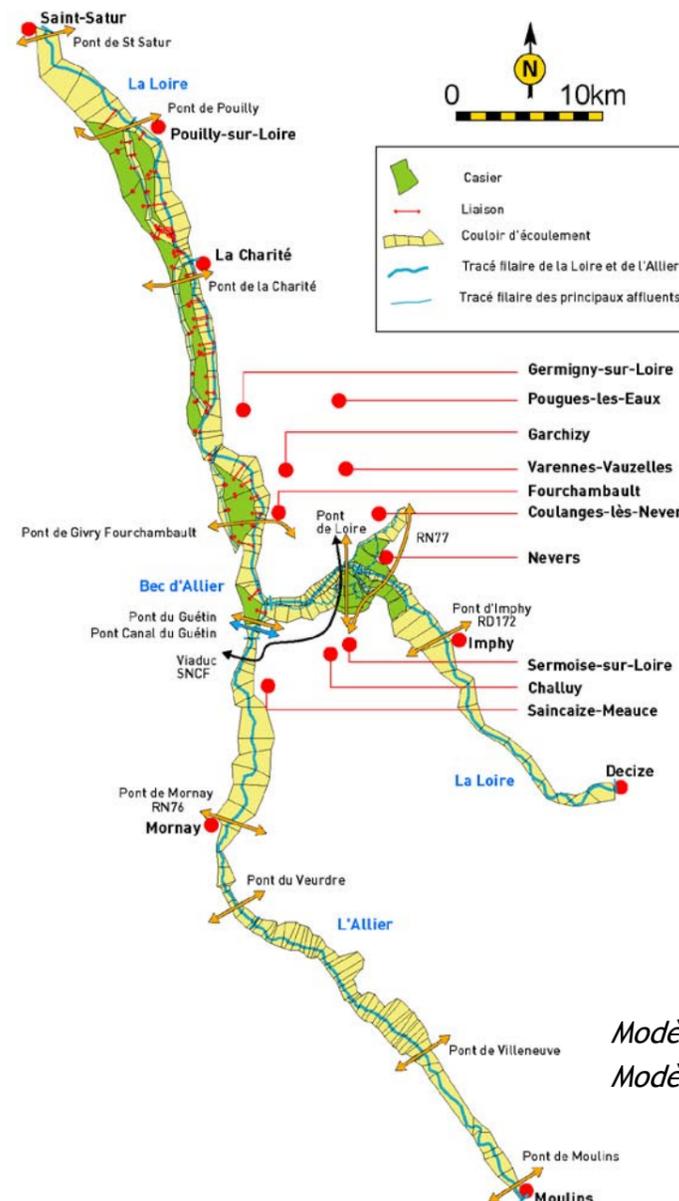
Egrian a retenu deux modèles

Egrian a retenu la réalisation de deux modèles complémentaires de façon à tester, sur un secteur élargi, les impacts des aménagements et, sur le territoire de l'adn, les impacts détaillés.

Le modèle 1D

De part sa construction en « linéaire d'écoulement » et en « bassins de stockage », le modèle dit « 1D » permet une modélisation étendue et donne une compréhension globale du territoire d'étude élargie.

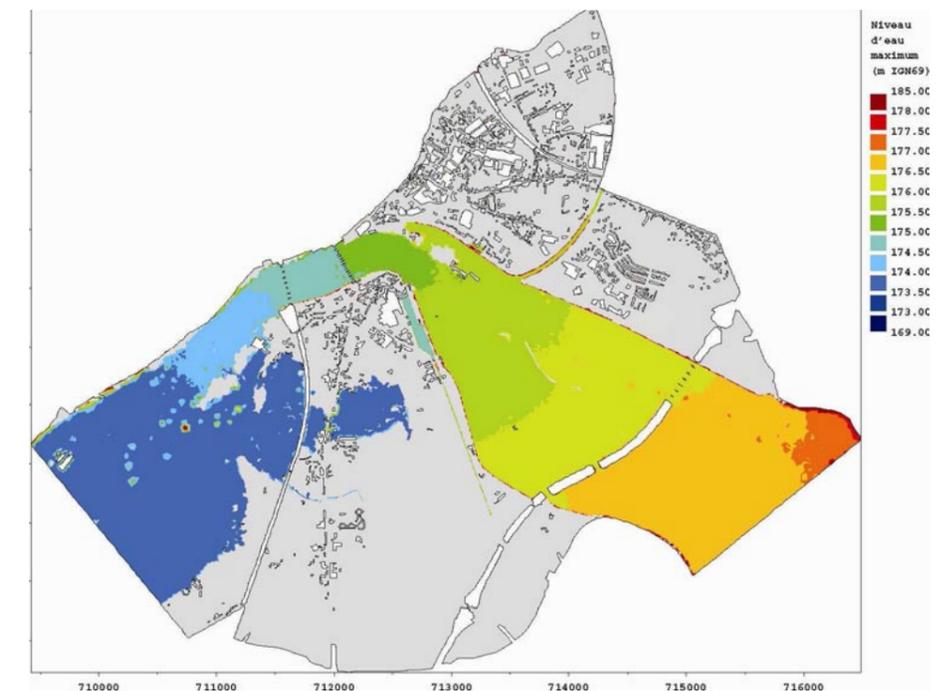
Pour Egrian, c'est le modèle dit global qui est très étendu.



Le modèle 2D

Le modèle dit « 2D » prend en compte tous les détails du relief. Il est basé sur un relevé numérique de la topographie. Relativement lourd en calcul, il est plutôt réservé aux zones denses où le terrain varie d'un point à l'autre.

Pour Egrian, c'est le modèle détaillé qui concerne l'adn.



Le modèle global dit 1D

Le modèle global sur un territoire étendu

Le modèle 1D adn 2008 construit par Hydratec représente la Loire de Decize à Saint-Satur, l'Allier de Moulins à la confluence et la Nièvre depuis Pont-Saint-Ours.

Différentes entités hydrauliques

Dans ce modèle, les lits sont subdivisés en couloirs d'écoulement (les éléments filaires) et en secteurs de stockage (les casiers).

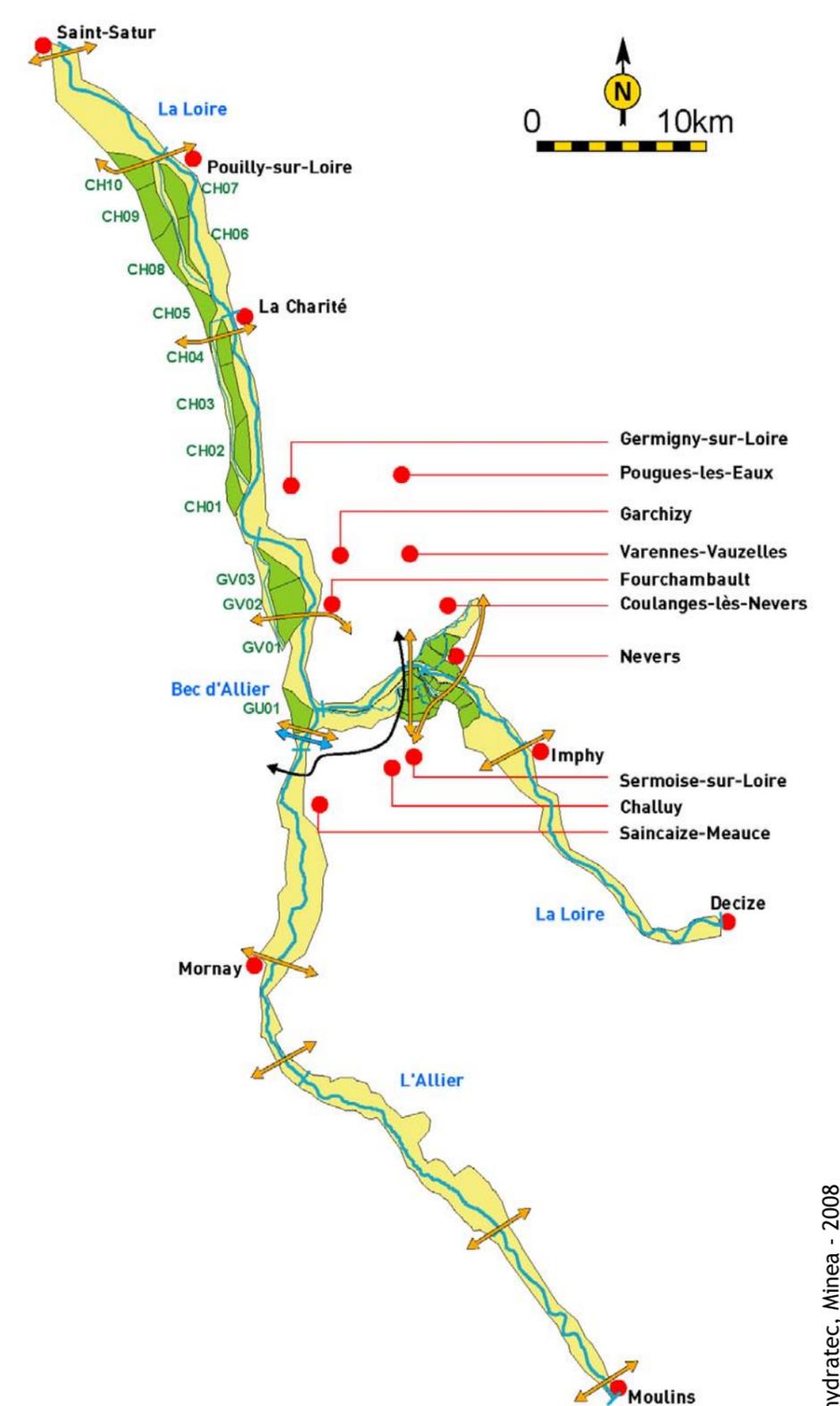
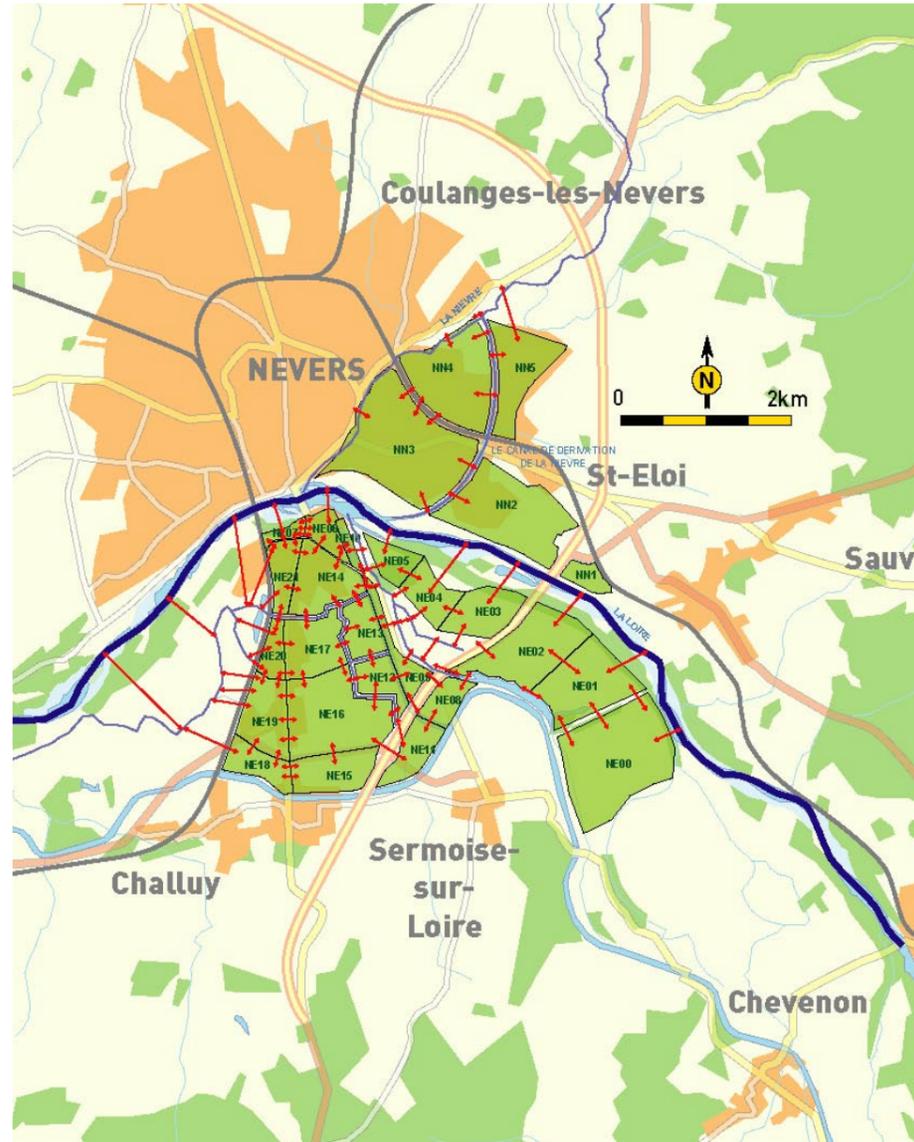
Des éléments hydrauliques spécifiques complètent cette maquette.

Entre ces espaces, des liaisons quantifient les écoulements dynamiques des flots. La mise en eau se fait à l'entrée du modèle ou aux extrémités amonts.

La vision globale, amont aval est indispensable

La modélisation globale est nécessaire pour la compréhension du fonctionnement du fleuve en crue et pour l'évaluation des impacts possibles des aménagements hydrauliques. Il est impératif de prendre en compte l'hydrologie en amont et de ne pas amplifier la crue en aval.

À l'échéance de juin 2008, Hydratec a réalisé ce modèle et l'a calé, en particulier pour la crue de 2003.



Le modèle détaillé dit 2D

Le modèle détaillé concerne les zones inondables de l'adn au niveau de Nevers; Sermoise et Challuy

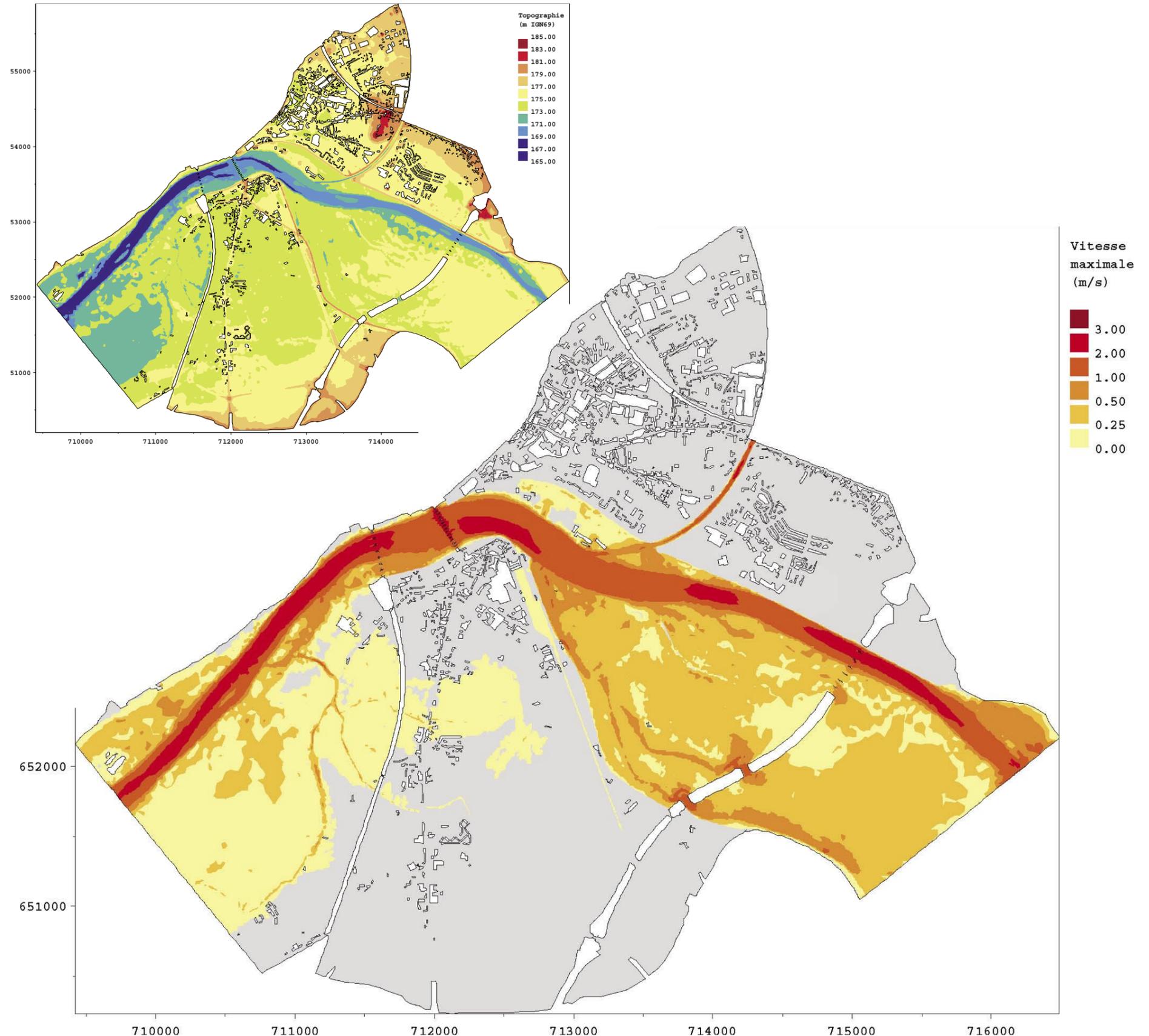
La modélisation détaillée que Sogreah a construite est plus fine. Elle se centre sur les communes de l'adn entre la levée des américains et le champ de tir. Elle permet d'évaluer l'aléa inondation de manière très précise.

Le modèle 2D est issu d'un modèle topographique

Les modèles dits « 2D » s'appuient sur un modèle numérique de terrain (MNT) qui prend parfaitement en compte tous les reliefs et obstacles aux écoulements. Le MNT est interprété pour construire la modélisation point par point. Il est ensuite mis en eau à partir des données du modèle 1 D. Cela permet de calculer très finement les paramètres de vitesse et de hauteur d'eau en tout point du modèle.

Une vision fine pour comprendre l'inondation

La modélisation détaillée est la seule à pouvoir donner des vitesses et des hauteurs en tout point du secteur modélisé. Ce modèle met 2 jours pour calculer une modification, alors que le modèle global met moins de 5 minutes.



Les deux modélisations sont complémentaires

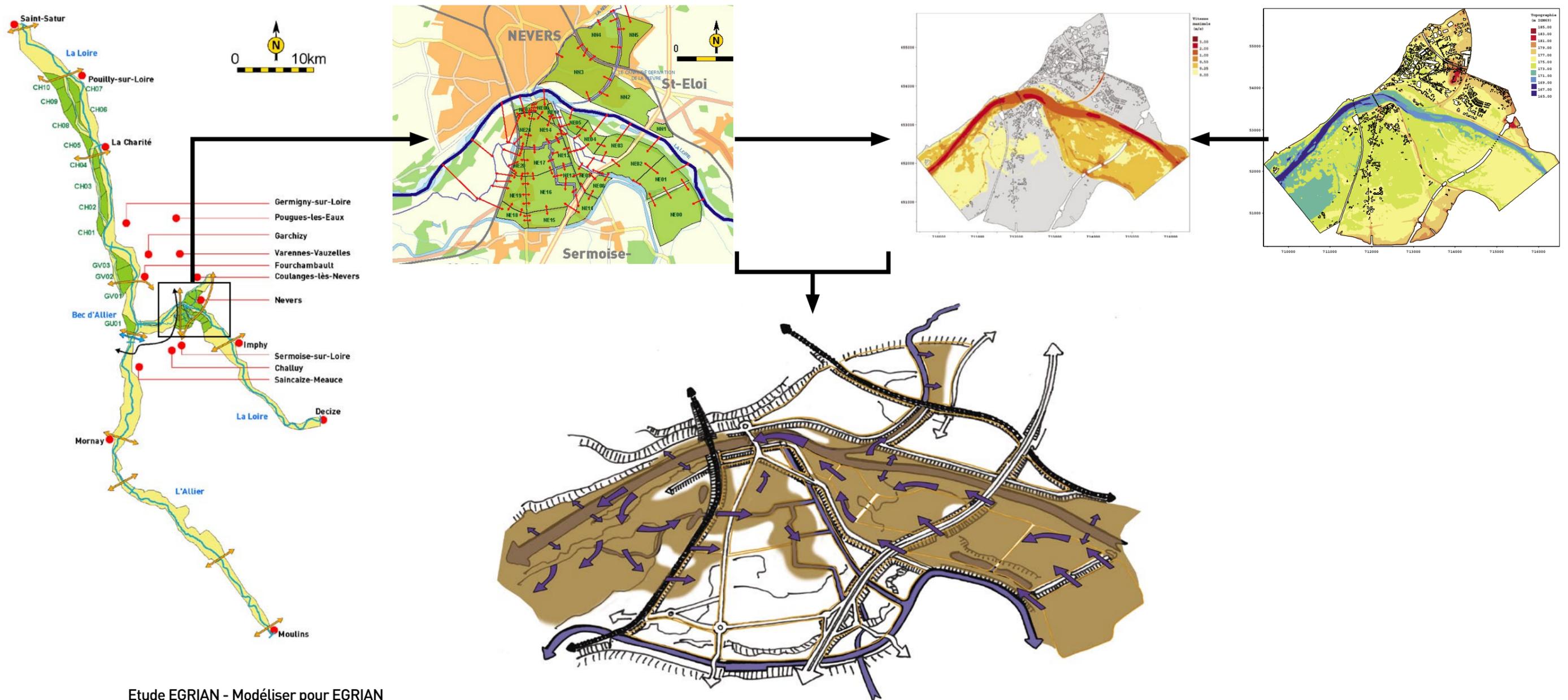
Un premier modèle 1D, souple et étendu

Le modèle 1D émet des hypothèses de construction qui donnent lieu à une maquette numérique représentant la réalité très fidèlement. Il a l'avantage d'être léger en calcul et permet donc une grande étendue et de multiples simulations de scénarios d'aménagement.

C'est également lui qui fournit les résultats hydrauliques aux limites. C'est indispensables pour la construction du modèle 2D.

Un modèle fin pour des secteurs spécifiques

Le modèle 2D permet d'affiner les résultats sur des zones plus précises. Il permet de savoir ce qu'il se passe en un tout point donné tel que la hauteur d'eau pour déterminer quelles habitations seront touchées, au sous-sol, au rez-de-chaussé, aux étages. Il peut également calculer la vitesse de l'eau et donc permettre d'évaluer la résistance des bâtiments à un type de crue donnée.



Bien comprendre les crues

Le fleuve s'écoule dans ses lits.

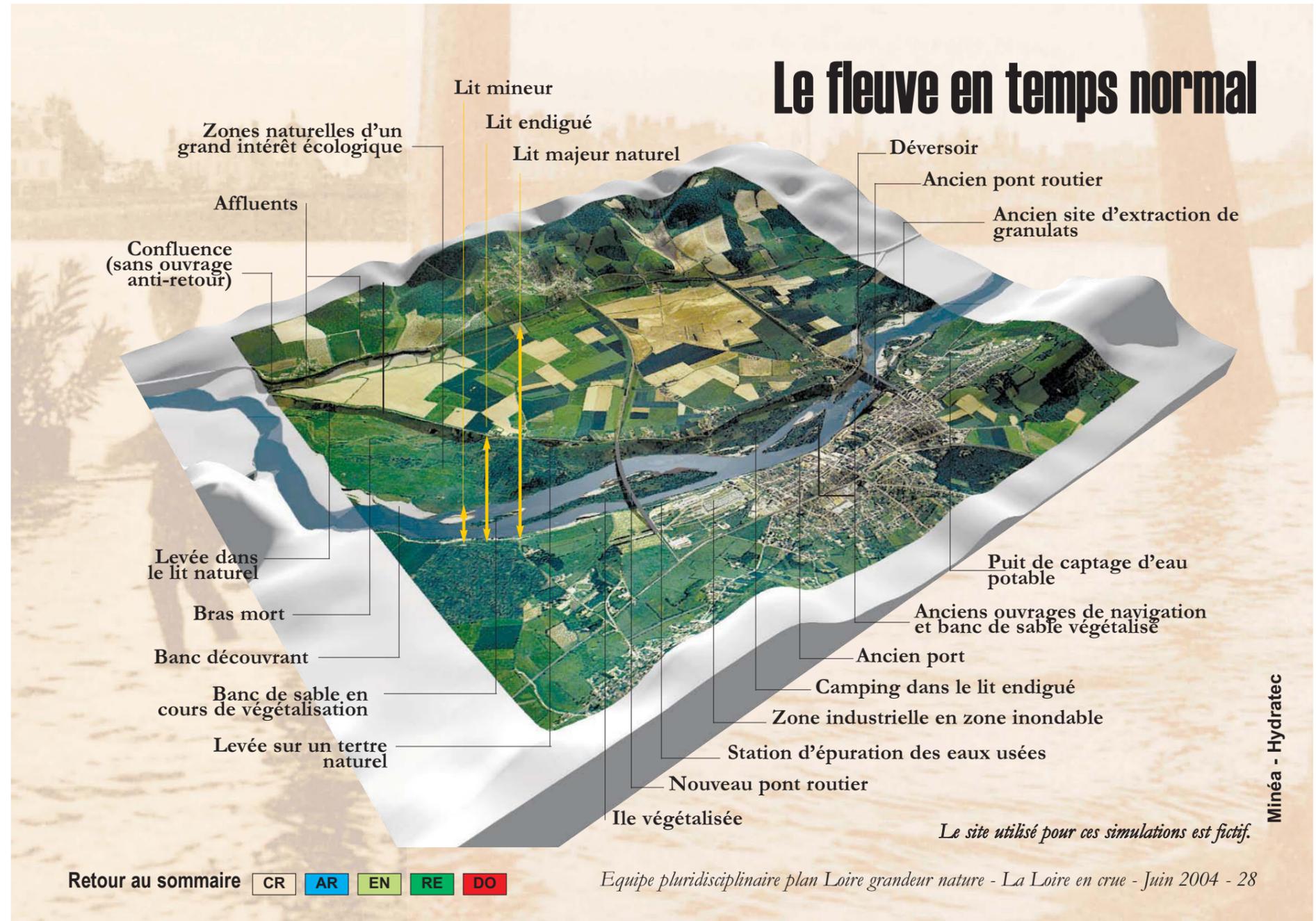
La construction du modèle commence par déterminer les différents lits du fleuve. Les lits sont les espaces dans lesquels le fleuve s'écoule, qu'il soit en crue ou non.

Trois lits pour la Loire.

Le lit mineur est le lit dans lequel la rivière coule généralement, de l'étiage à la situation courante.

Le lit endigué est le lit mineur étendu aux digues (levées, canal, voie ferrée, route) ou entre une levée et un coteau.

Le lit majeur est le lit dans lequel la rivière a coulé un jour ou pourra couler lors de très grandes crues encore inconnues à ce jour.

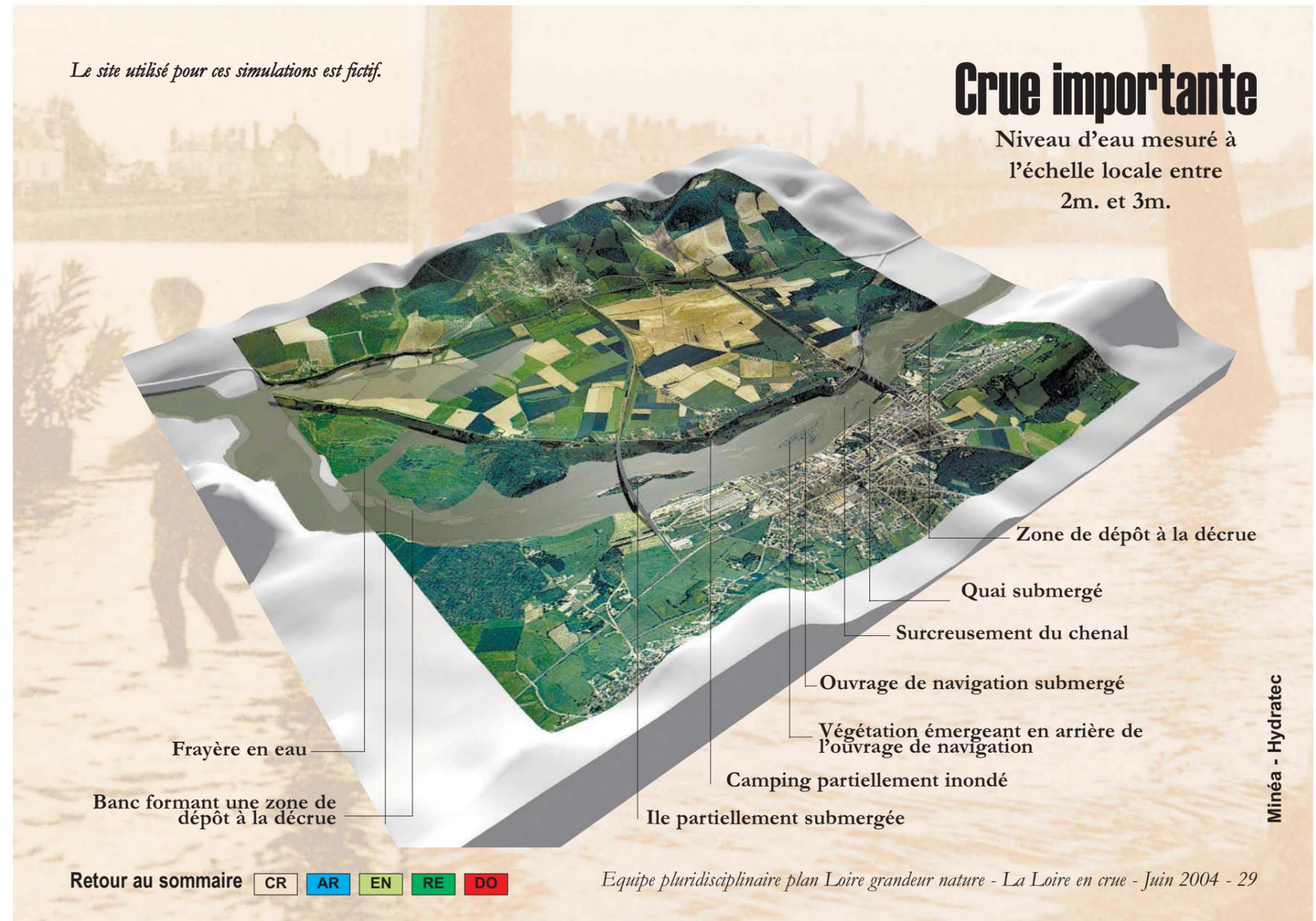


La crue touche les premiers espaces inondables

La crue déborde et envahit son lit endigué. Elle commence à remonter par remous dans le val

Lors d'une crue, le fleuve « gonfle ». Il continue de s'écouler. Il peut déborder ou remonter par remous dans des zones basses. L'eau est ainsi stockée pendant la crue.

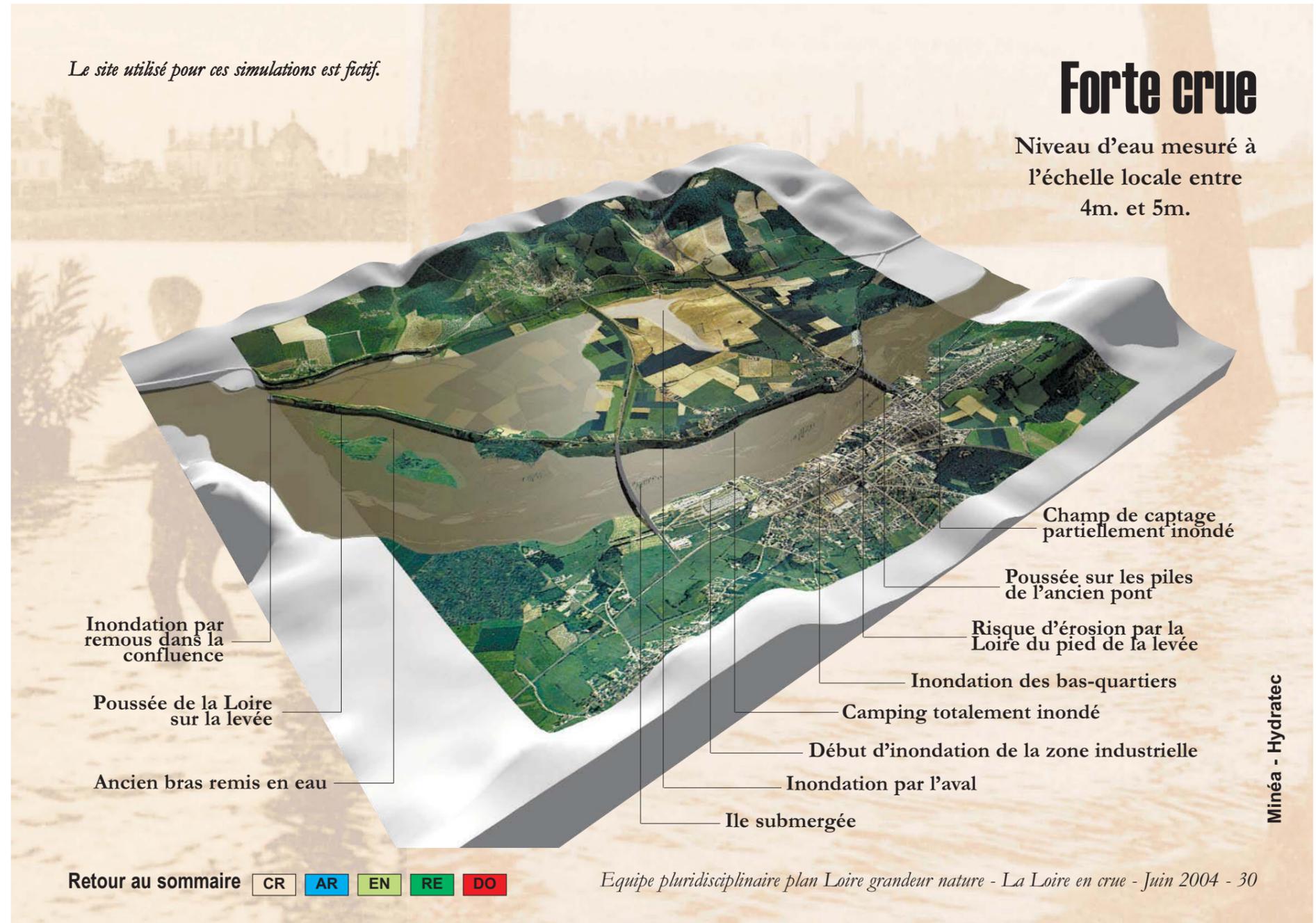
Dans le modèle 1D, les secteurs inondés qui ne sont plus le siège d'écoulements avec du courant sont alors appelés « casiers ». Ils sont reliés aux éléments filaires et entre eux par des « liaisons ». Dans le modèle 2D, on peut distinguer ces zones sur la cartographie : la vitesse d'écoulement y est faible.



La crue touche de nouveaux secteurs

La crue augmente et prend possession de tout son lit endigué et d'une partie du val.

Dans le modèle global 1D, ces nouveaux espaces inondés sont alors, eux aussi, découpés en casiers et tous les éléments filaires et casiers sont reliés entre eux par des liaisons quantifiées numériquement.



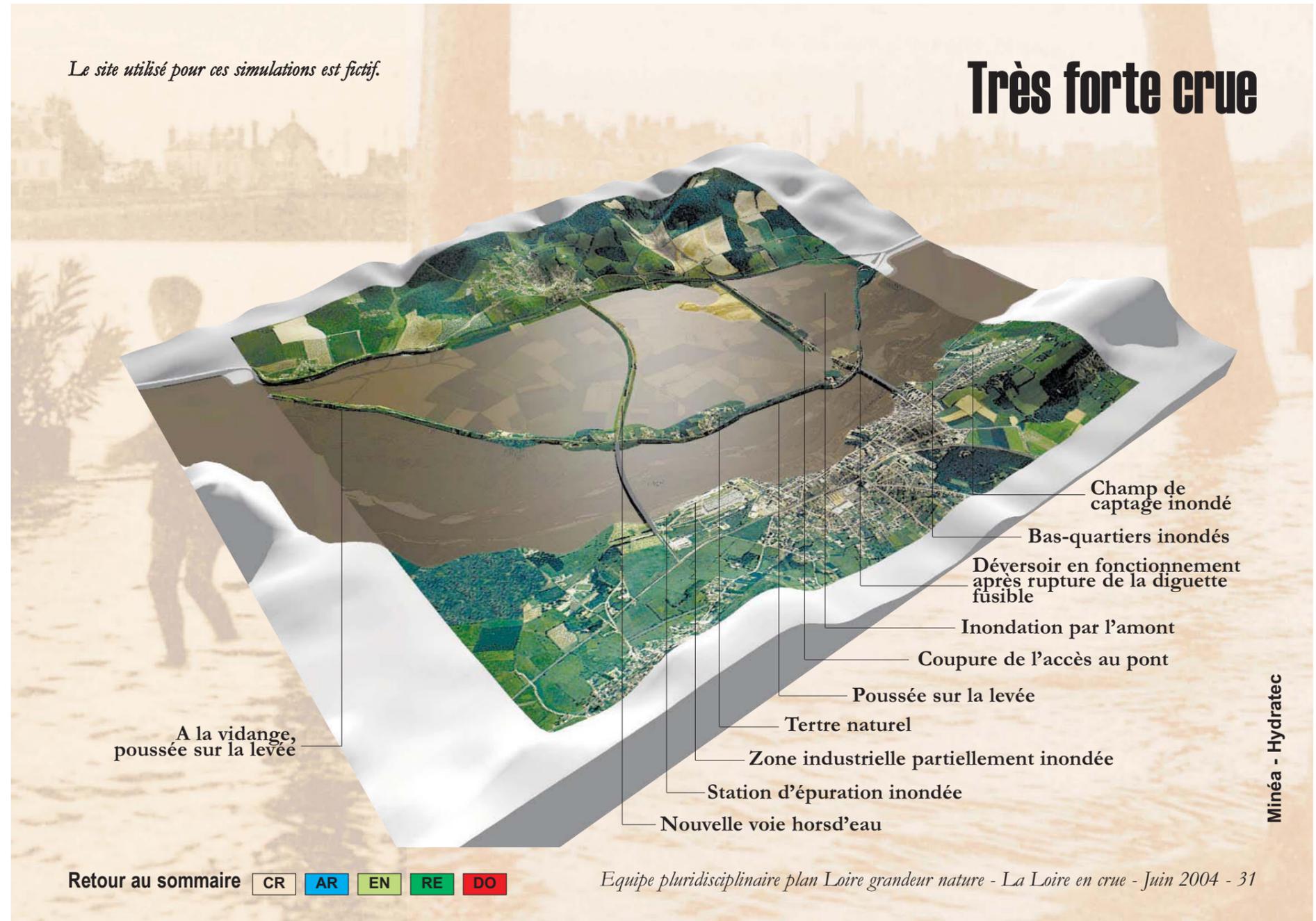
La crue touche la totalité des zones inondables

La crue s'étend à tout le territoire inondable

La crue envahit tout son lit majeur, soit par remous, soit par surverse sur un déversoir, soit en ouvrant une brèche dans la levée...

Les débordements écrêtent naturellement la crue

L'expansion dans les lits autres que mineur concourt à stocker les flots de la crue. Limiter cette expansion génère un surcroît d'eau en aval, c'est ce que font les levées. Il peut y avoir des surverses par dessus les levées. Ces ouvrages sont parfois dotés de déversoirs ou fragilisés jusqu'à la rupture. L'eau reprend alors ses droits. Le lit majeur peut à nouveau écrêter la crue. Ce retard de la pénétration des eaux dans le val peut permettre un écrêtement de la pointe de crue. Il ne faut pas oublier que les levées protègent les vals des crues les plus courantes.



Etapes successives des modélisations



Compréhension du fonctionnement hydraulique du secteur

Analyse qualitative pour déterminer les limites amont et aval de la modélisation par rapport aux objectifs recherchés.

Recueil des données

Recueil des données topographiques existantes.
Recueil des dimensions des ouvrages hydrauliques.
Recueil des données historiques existantes.
Recueil des données chiffrées existantes.
Cahier des charges des nouveaux relevés topographiques complémentaires.



Relevé de terrain

Réalisation de relevés de terrains, topographie, bathymétrie.

Modèle numérique de terrain MNT



Architecture du modèle 1D

Tracé du modèle filaire et découpage en casiers.
Détermination des liaisons entre casiers et rivières et entre casiers eux mêmes.

Positionnement et modélisation des singularités hydrauliques.

Estimation des paramètres tels que les coefficients de rugosité, de déversement ou de liaisons.

Détermination de la condition aval.

Architecture du modèle 2D

Déterminer le maillage d'après le MNT

Prendre en compte les éléments structurants

Représenter les constructions

Saisie des éléments dans les logiciels de calculs

Calage des modèles.

Simulation dans le modèle des crues historiques et des crues connues.

Comparaison des résultats modélisés avec les données historiques.

Adaptation des différents paramètres et validation des simulations.

Bien comprendre le territoire

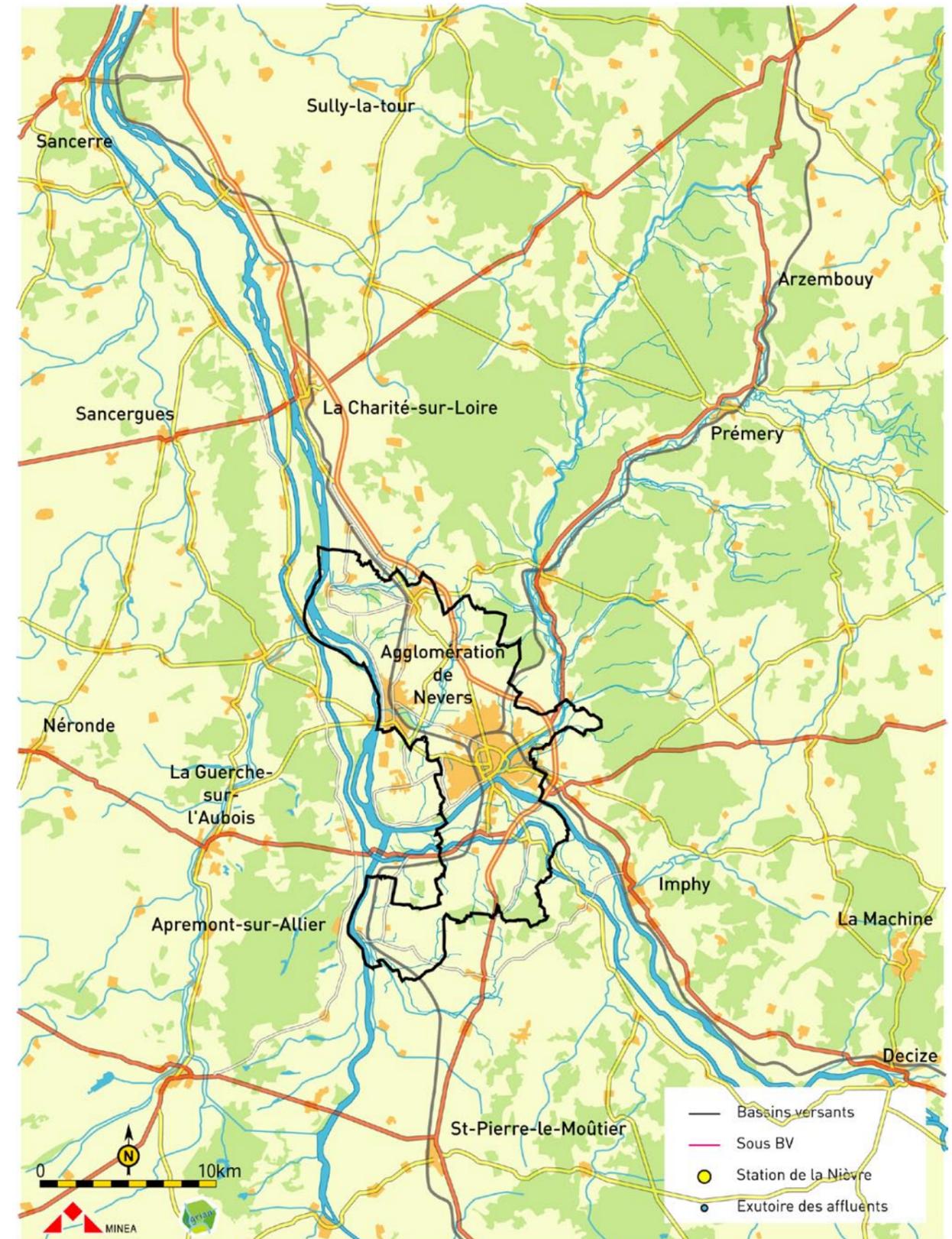
Analyser qualitativement le secteur.

Le travail préliminaire à la modélisation est d'avoir une vue globale du secteur. Il s'agit d'étudier les cartes et le site pour s'imprégner de la géographie, comprendre la « philosophie » du relief, intégrer le réseau des cours d'eau et les différentes zones possibles d'accélération ou de ralentissement des crues, repérer les secteurs sensibles, les points singuliers et les ouvrages hydrauliques existants.

Déterminer les limites des modélisations.

Pour simuler une crue sur un site, il faut savoir ce qui se passe en amont et en aval du site : comment l'eau arrive, et va « s'échapper ». L'analyse des crues permet de poser des limites aux modélisations. Il faut modéliser « large » pour prendre en compte tous les phénomènes, mais pas trop pour éviter des données perturbantes et inutiles.

Les objectifs du modèle global 1D correspondent à un champ large alors qu'un modèle détaillé 2D est un zoom beaucoup plus renseigné, mais beaucoup plus lourd numériquement.



Le recueil des données existantes

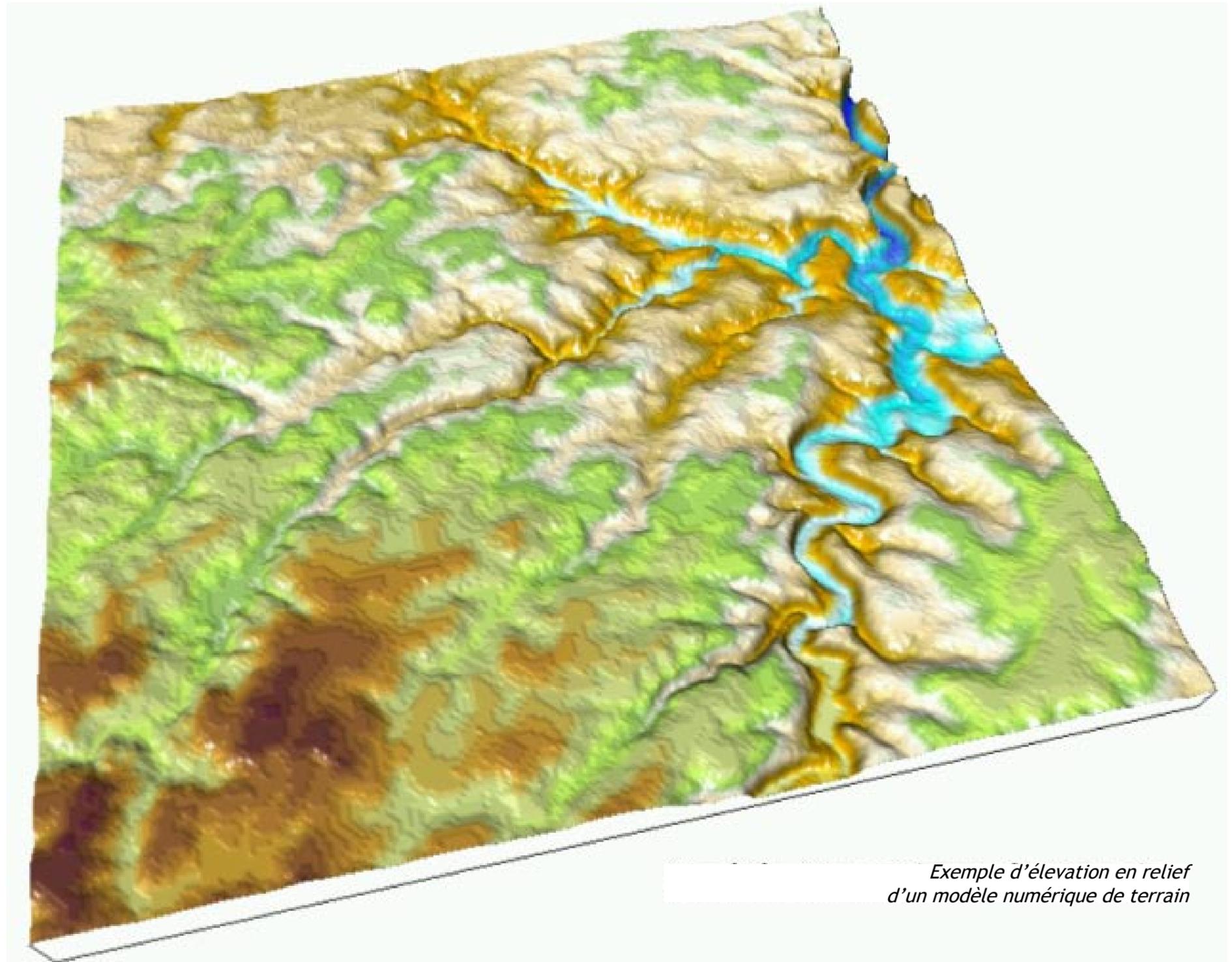
Gagner du temps en utilisant les données existantes.

Après avoir posé les limites du modèle, une phase de collecte commence.

Pour cela, il faut récolter toutes les données topographiques sur le secteur.

Le bureau d'études contacte différents organismes publics ou privés (DIREN, Agences de l'eau, DDE, communes, syndicats...) pour obtenir d'éventuels modèles numériques de terrain, des relevés topographiques existants, des profils en travers de cours d'eau...

C'est autant de données qu'il ne sera pas nécessaire de relever sur le terrain : gain de temps et économie sur les budgets.



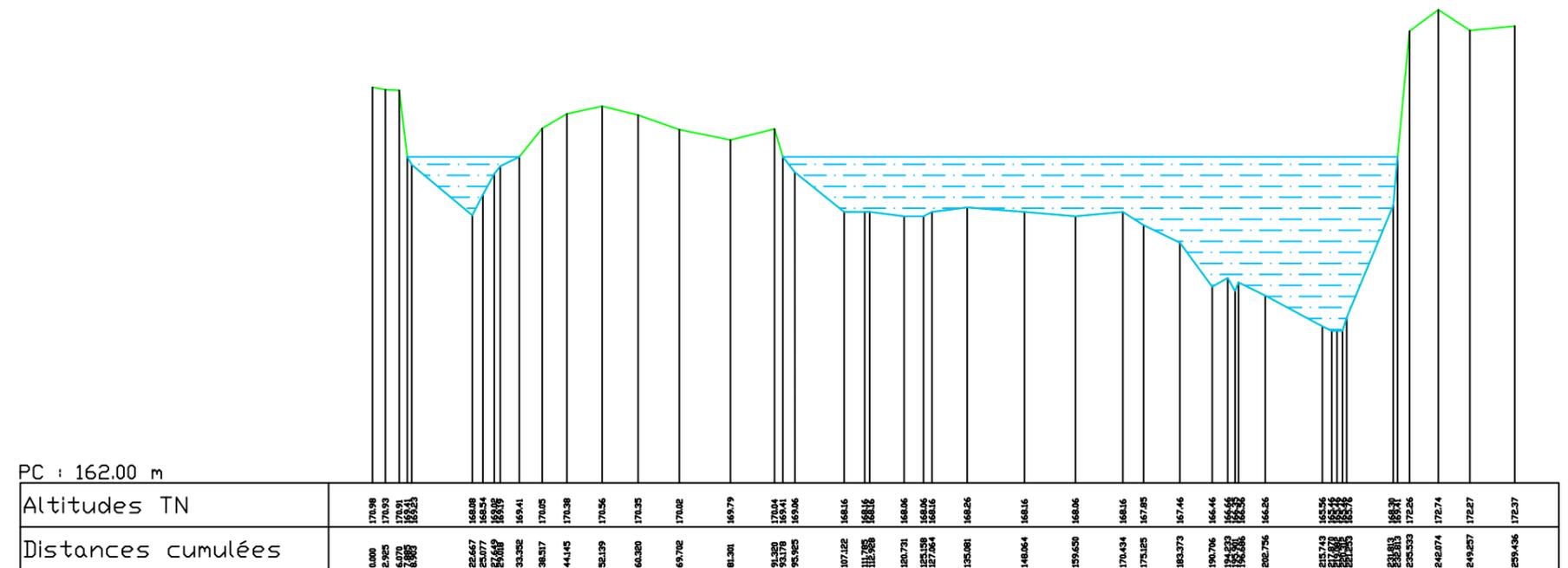
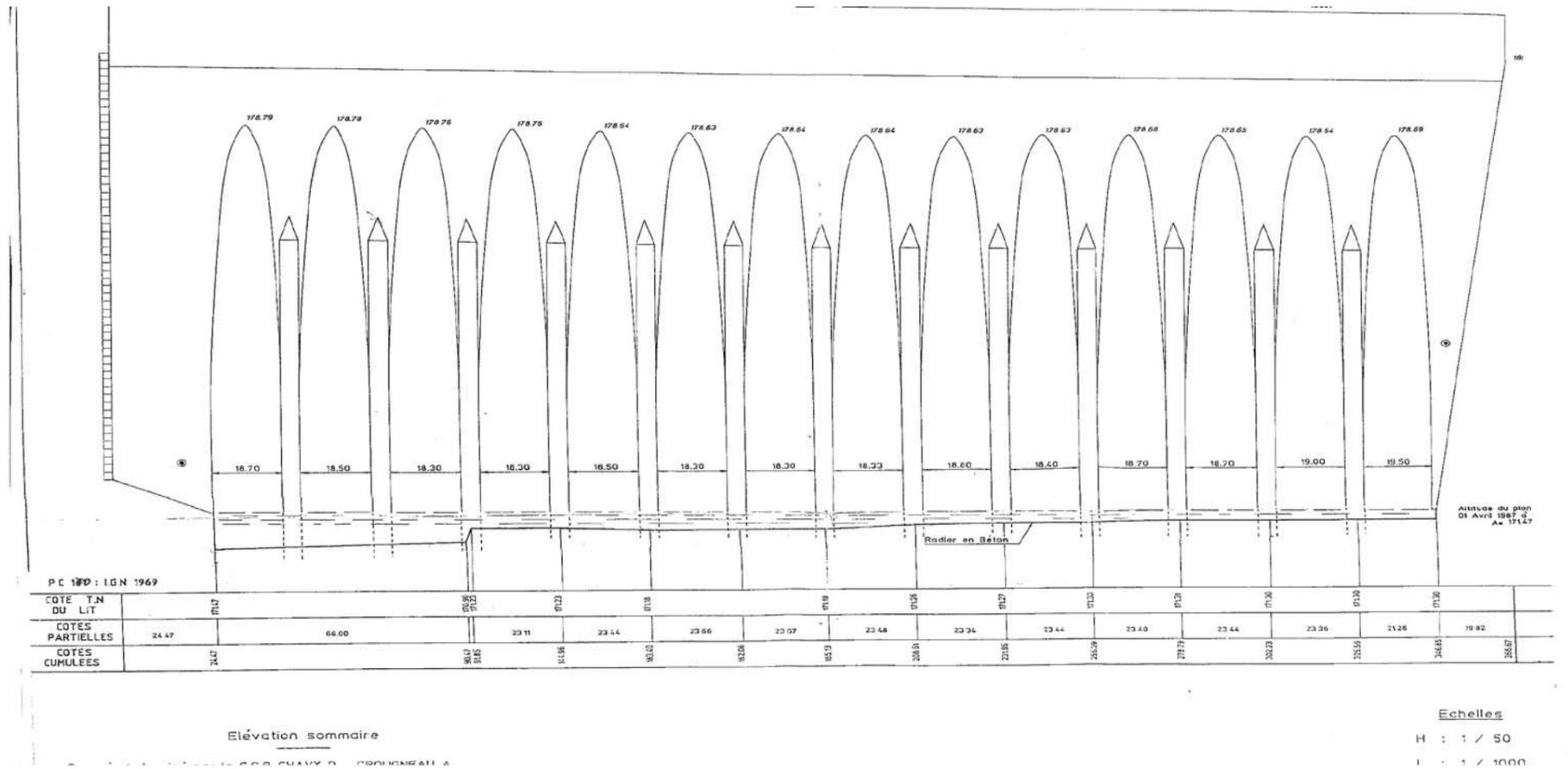
*Exemple d'élévation en relief
d'un modèle numérique de terrain*

Recueil des dimensions des ouvrages hydrauliques

Il faut faire entrer dans les modèles tout ce qui concerne les écoulements.

Le relief est une donnée importante, mais d'autres éléments « artificiels » jouent un grand rôle dans les écoulements. Ce sont tous les ouvrages hydrauliques qui jalonnent la rivière : ponts, barrages, seuils, levées, déversoirs, ouvrages de navigation...

Pour chacun de ces éléments, il faut connaître ses mensurations avec précision pour évaluer de quelle manière il agit sur les écoulements.



Le recueil des données chiffrées existantes

Toutes les mesures sur le terrain, lors des crues, sont précieuses.

Pour pouvoir vérifier la précision du modèle, il faut comparer les simulations numériques avec des crues bien connues, qui ont été mesurées sur place.

Toutes les mesures historiques sont très précieuses. Elles concernent les débits de la crue en différents points, les hauteurs d'eau mesurées sur les repères ou sur les échelles de crues, les durées d'immersion des terrains inondés...

Rechercher toute la documentation.

Le bureau d'études obtient les données auprès d'organismes spécialisés, mais il doit également chercher dans les archives départementales, relire les anciens rapports et analyser les études antérieures.

Pour les crues plus récentes, le bureau d'études peut interviewer les services en charge de la surveillance des crues.

SITE	PK DU SITE	DATE	HEURE	altitude IGN69
DECIZE "La Jonction"	577.8	04/12/2003	16:25	191.57
DECIZE "Vieille Loire"	577.5	05/12/2003	11:45	190.97
SAINT-LEGER-DES-VIGNES "Pont sur l'Aron"	577	05/12/2003	12:05	190.97
SAINT-LEGER-DES-VIGNES "Barrage Amont"	575.71	04/12/2003	16:45	189.90
SAINT-LEGER-DES-VIGNES "Barrage Aval"	575.69	04/12/2003	16:55	189.57
SAINT-LEGER-DES-VIGNES "Chemin de halage"	574.725	04/12/2003	17:00	189.02
SOUGY "Teinte"	571.7	04/12/2003	17:10	187.15
DRUY-PARIGNY "Ailly"	568.125	04/12/2003	17:30	185.36
BEARD "SNCF"	564.515	05/12/2003	14:00	183.72
SAINT-OUEN "Chevret"	562	05/12/2003	9:00	182.38
IMPHY "Les Plauts"	557.1	05/12/2003	9:10	180.68
IMPHY "La Tour"	556.2	05/12/2003	9:20	180.04
IMPHY "Station"	554.4	05/12/2003	9:30	179.20
IMPHY "Pont"	554	05/12/2003	9:35	179.04
SAUVIGNY-LES-BOIS "Thiot"	552.025	05/12/2003	10:00	177.96
SAINT-ELOI "Maison Rouge - Poste Gaz"	548.725	05/12/2003	10:35	176.65
NEVERS "Pont de la Déviation"	548.1	05/12/2003	10:40	176.34
NEVERS "Levée de St Eloi - La Baratte"	547.4	05/12/2003	10:30	176.08
NEVERS "La Jonction"	545	05/12/2003	11:30	175.24
NEVERS "Ecluse Nièvre"	544.5	05/12/2003	16:22	175.02
NEVERS "Pont RN7 Aval"	544.4	05/12/2003	11:15	174.91
NEVERS "Pont SNCF Aval"	543.95	05/12/2003	11:55	174.59
NEVERS "La Pisserotte"	541.775	05/12/2003	12:15	173.65
MARZY "La Fossaie"	539.65	05/12/2003	12:30	172.62
MARZY "Villa Bruno"	537.8	05/12/2003	12:45	171.89

Les limites du recueil des données existantes

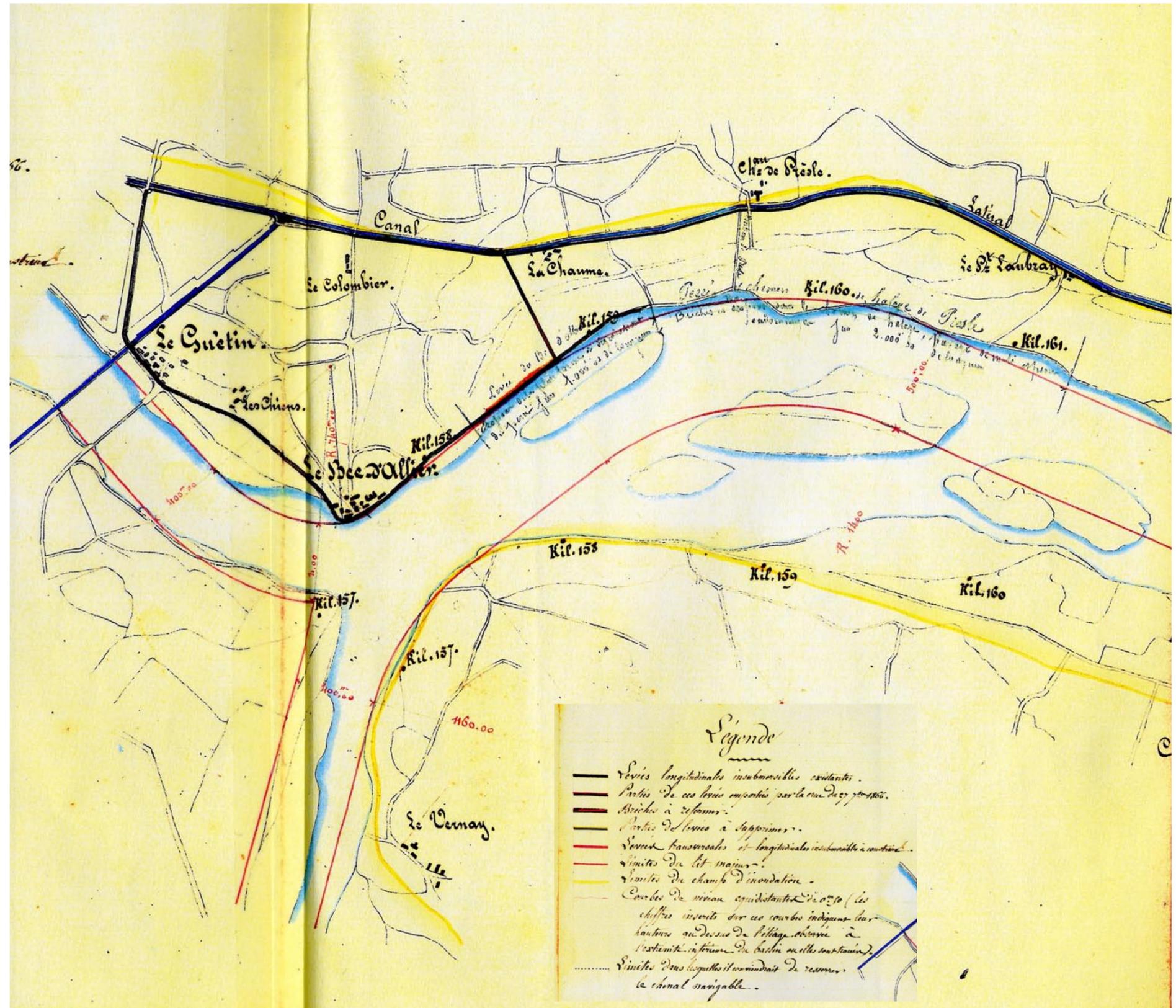
Comprendre l'évolution du lit.

L'exploitation des données historiques n'est valable que si l'on connaît l'état des cours d'eau à l'époque de leur relevé. Disposer de la topographie du lit des rivières ne suffit pas, il faut également reconstituer son évolution dans le temps. L'hydraulicien doit se demander :
La rivière a-t-elle changé son cours ?
L'homme a-t-il modifié les rives en construisant des digues, des levées ou d'autres ouvrages hydrauliques ?
Les riverains des cours d'eau ont-ils changé les modes d'occupation des sols ?
Ces informations peuvent être recueillies dans les articles de journaux d'époque et dans des rapports techniques.

Les modèles ont des limites.

L'objectif est de comprendre ce qui se passe aujourd'hui. Les modèles ne peuvent reproduire les crues historiques car on ignore la topographie et l'occupation des sols à la date de la crue.

Les crues de 1846, 1856 et 1866 par exemple, ne peuvent être reproduites par les modèles. Ces derniers travaillent dans la situation d'aujourd'hui (topographie actuelle, occupation des sols d'aujourd'hui) et propagent donc une crue du « type » de la crue historique.



Il faut parfois de nouveaux relevés de terrain

Les données recueillies sont-elles complètes ?

Après avoir analysé toutes les données existantes, le bureau d'études donne un avis sur la validité et l'exploitabilité de ces informations.

Y a-t-il des trous, ou des zones d'ombres sur le territoire concerné par l'étude ?

Un travail très fin sur le terrain.

De nouveaux relevés peuvent s'avérer indispensable pour combler les manques. Il faut alors faire appel à des équipes spécialisés qui se rendent sur le terrain pour mesurer les secteurs mal connus. Ce sont des relevés topographiques et bathymétriques.

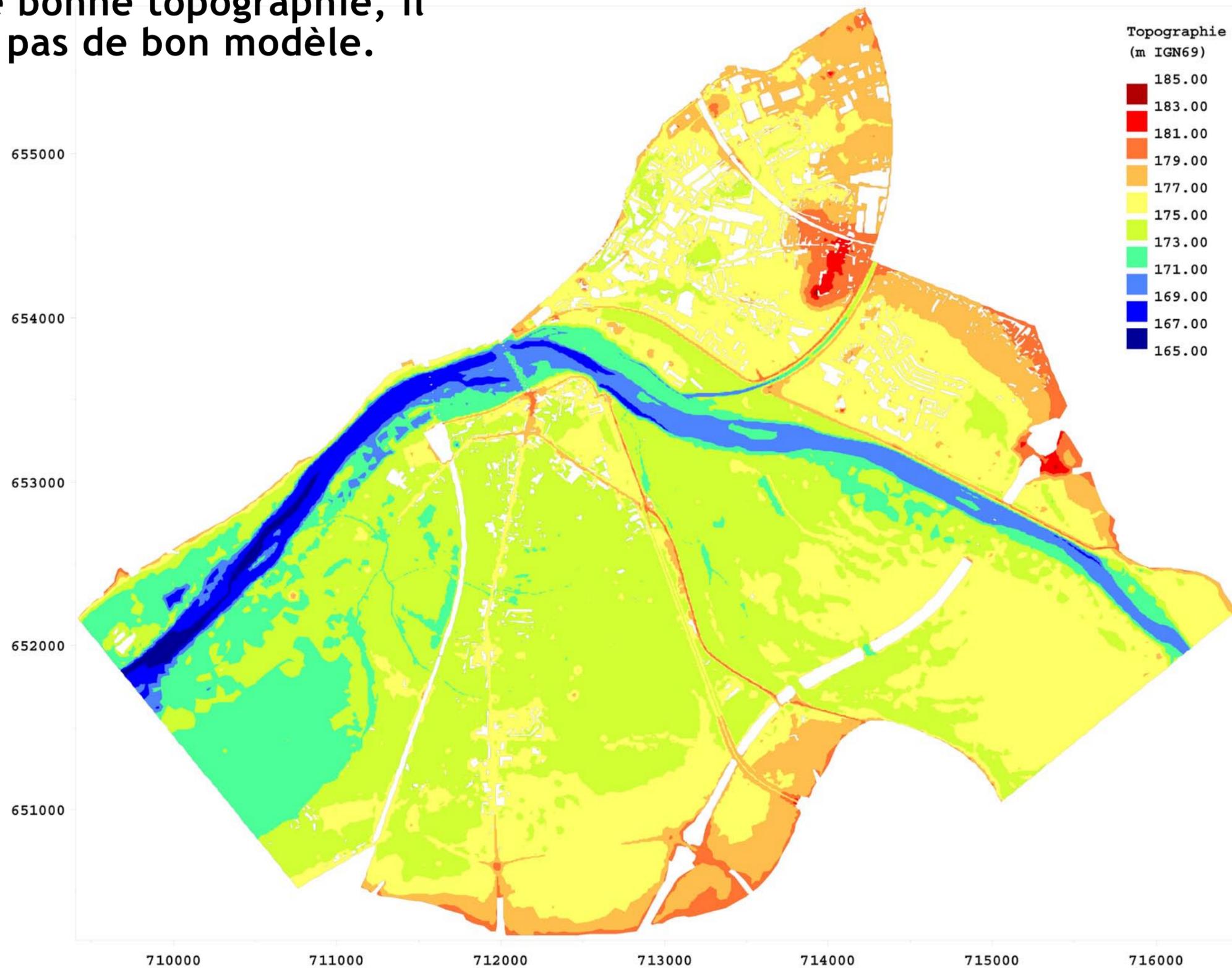
Il peut s'agir de relevés au sol, d'interprétations photogrammétriques ou de relevés dits «laser». Les relevés laser sont extrêmement précis. Ils donnent une nappe de points localisés dans les trois dimensions. C'est ce que l'on appelle un Modèle Numérique de Terrain (MNT).

Pour EGRIAN, de nouveaux profils en travers du lit mineur et du lit majeur de la Loire, de l'Allier et de la Nièvre ont été réalisés et utilisés pour le modèle global. Un MNT a été réalisé sur une partie du territoire de l'adn pour les besoins des modèles.



Il faut donc posséder une topographie parfaite

Sans une bonne topographie, il n'y aura pas de bon modèle.



Construire le modèle global 1D

Le modèle « 1D adn 2008 » est une extension du modèle « Loire moyenne »

Le modèle 1D est l'extension à l'amont du Bec d'Allier du modèle Loire moyenne développé en 1998 pour l'Etablissement Public Loire, l'Agence de l'Eau Loire Bretagne et l'Etat par Hydratec.

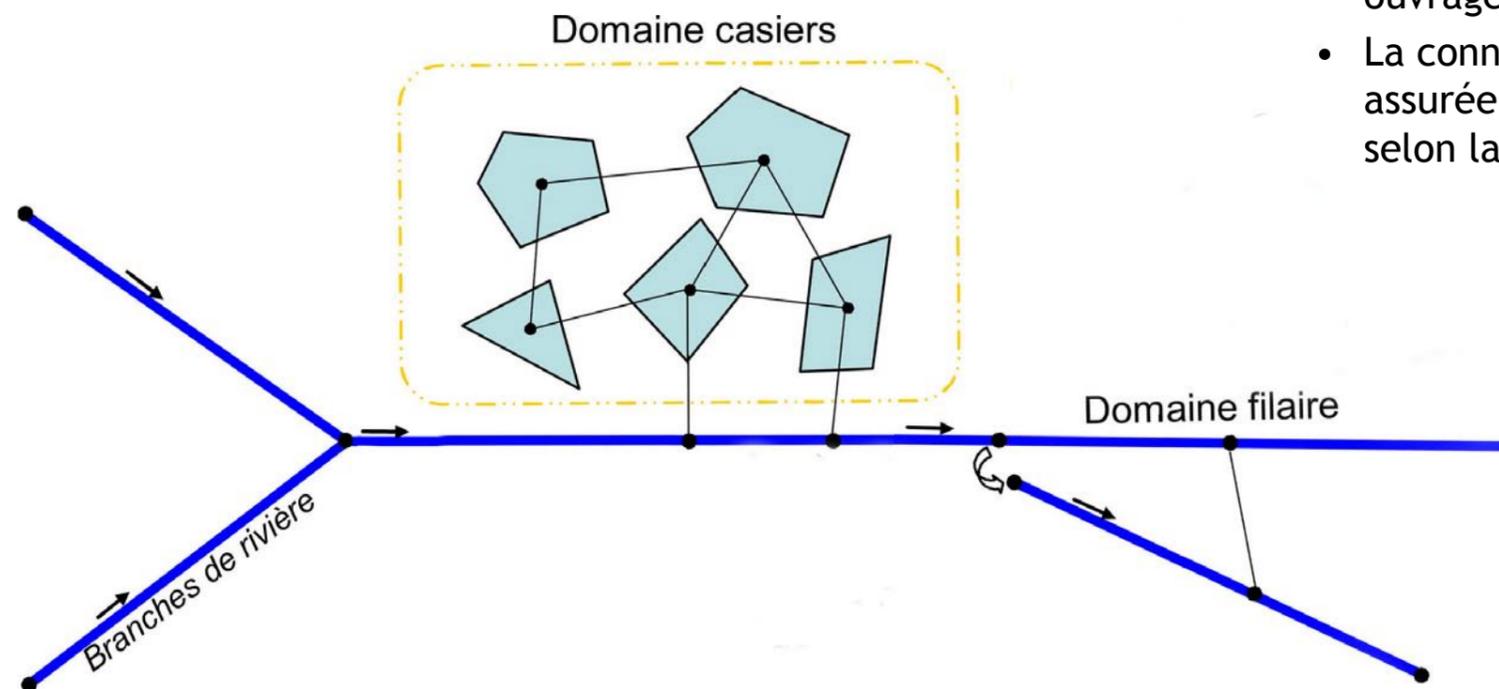
Les compréhensions acquises alors concernant le Loire et ses affluents sont utilisées pour structurer, construire et caler le mieux possible le modèle global de l'adn avec un nouveau logiciel d'Hydratec : Hydrariv.

Le fonctionnement du fleuve en temps normal et en petite crue détermine les lits d'écoulement représentés par les éléments dit filaires. Le complément dans la vallée, touché lors des crues fortes délimite la zone à modéliser par un découpage en casier.

Les entités de modélisation

Compte tenu des objectifs de la modélisation, à savoir l'élaboration d'un diagnostic global du secteur d'étude et l'étude de différents scénarios d'aménagement réduisant les inondations, un schéma mixte de modélisation 1D a été choisi, comprenant :

- La schématisation « filaire » des lits mineurs ainsi que des lits majeurs de la Loire, de l'Allier et de la Nièvre à l'exception de leur zone de confluence au niveau de l'agglomération de Nevers. Ces éléments filaires sont découpés en « biefs ».
- Une schématisation « casiers » de l'agglomération de Nevers et des vals de Loire situés en aval du Bec d'Allier.
- Des singularités multiples représentant des ouvrages hydrauliques particuliers.
- La connexion des différents domaines, qui est assurée par des liaisons de natures différentes selon la topographie ou le type d'ouvrage.



Bien découper le territoire en casiers

Déterminer les casiers en fonction de la topographie.

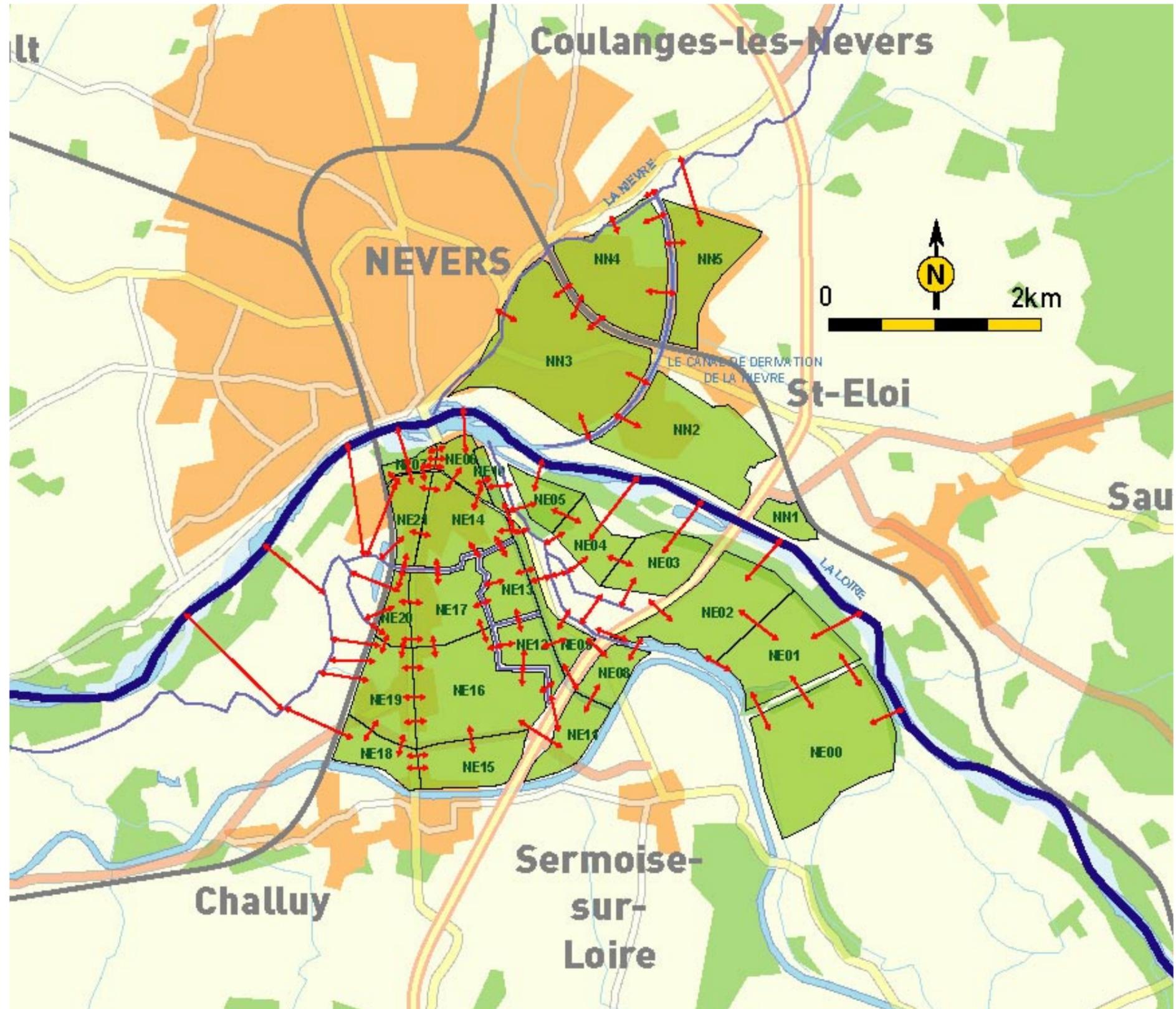
La phase «casiers» de la modélisation 1D consiste donc à délimiter des espaces en fonction du relief et des obstacles (murets, remblais routiers ou voies ferrées, canal, constructions diverses).

Le volume de stockage de ces casiers est alors calculé par rapport à la surface, à l'altimétrie et aux hauteurs d'eau des différentes crues. Ces stockages jouent un grand rôle dans l'écrêtement de la crue.

Bien interpréter le secteur

Le modèle 1D s'appuie aussi sur les données du MNT laser pour affiner la représentation de secteurs importants :

- Confluence cours d'eau - Loire.
- Zones de levées du canal



Les liaisons dans le modèle global 1D

Déterminer les types de liaisons.

Les casiers se remplissent directement par débordement du cours d'eau, mais ils peuvent également se vider les uns dans les autres.

Un nouveau travail consiste à déterminer par où et comment les casiers se remplissent et se vident. Les liaisons hydrauliques peuvent être de trois types.

Liaisons du type rugueux.

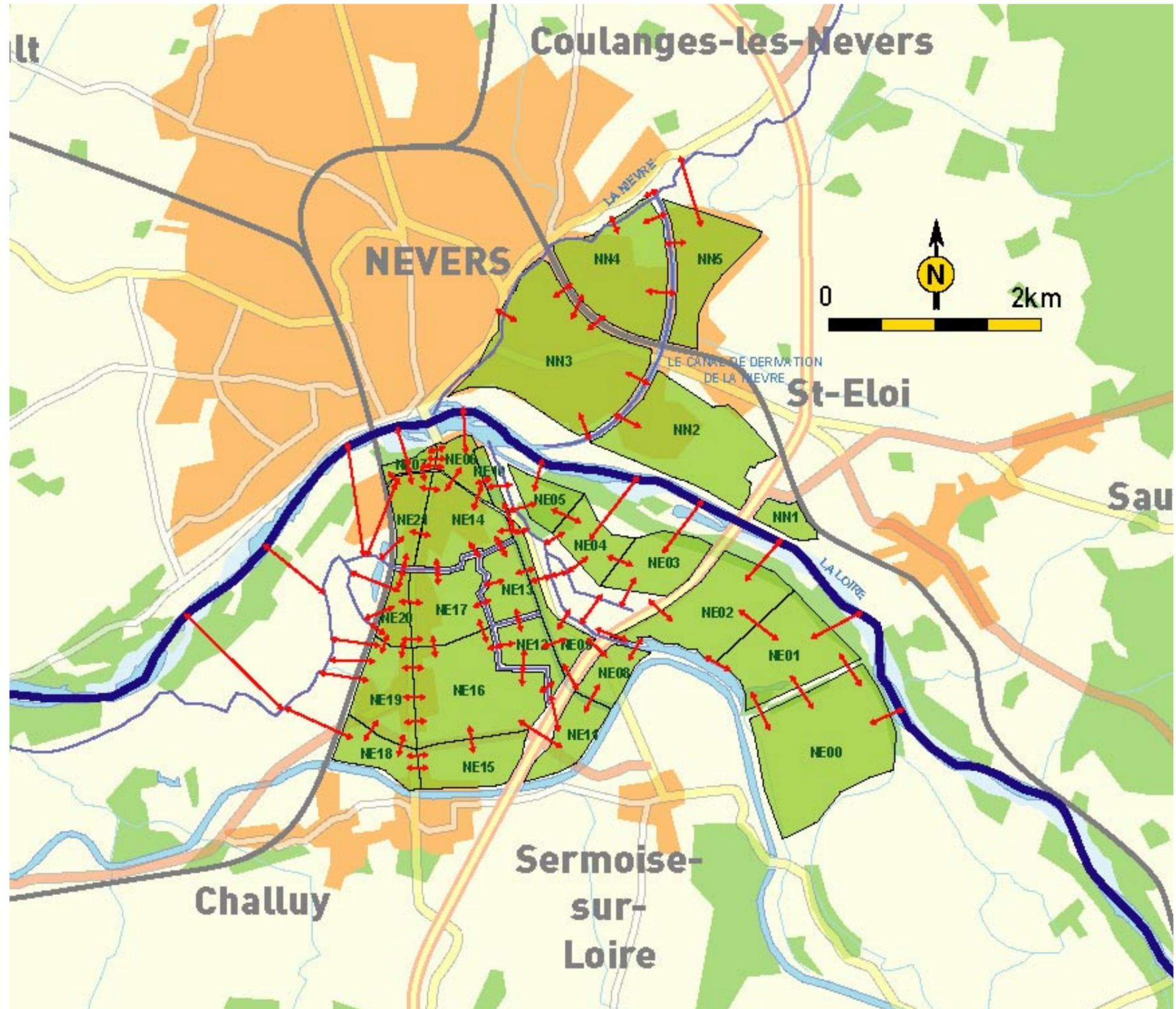
Lorsque les terrains de deux casiers sont d'altitudes voisines, l'eau s'écoule régulièrement d'un casier à l'autre avec plus ou moins de frottement en fonction de l'état de la surface.

Liaisons du type surverse

Lorsque les terrains ont des altitudes éloignées ou bien lorsqu'il existe un obstacle, l'eau se déverse lorsqu'elle a atteint une certaine hauteur. Sur certains points bas de ces obstacles, les flots débordent en priorité.

Liaisons du type orifice

Pour les passages sous les voies ferrées, les routes ou tout ouvrage, l'eau est soumise alors à un goulet d'étranglement.

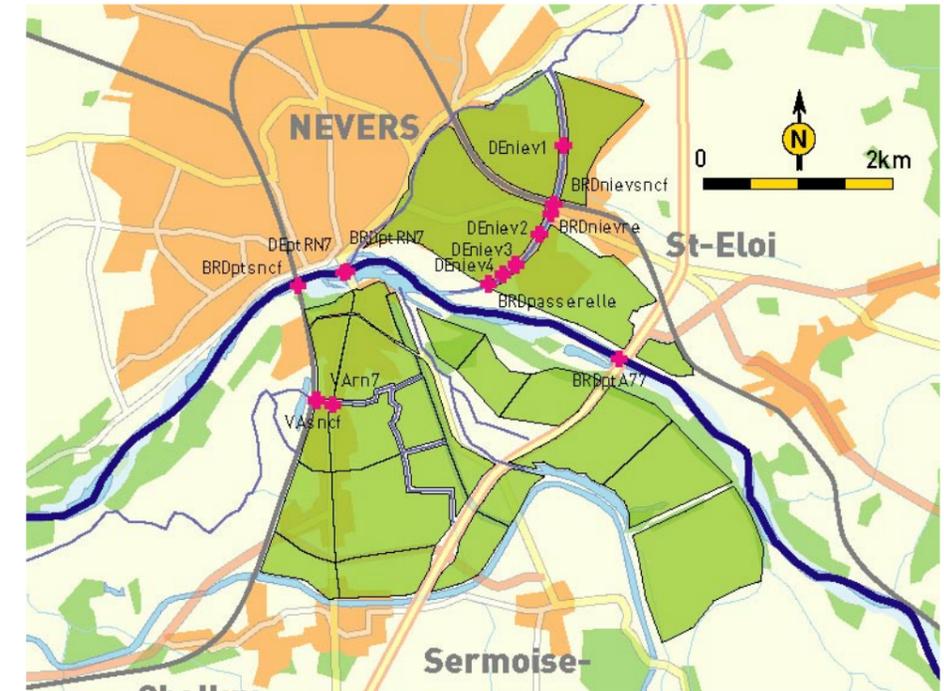
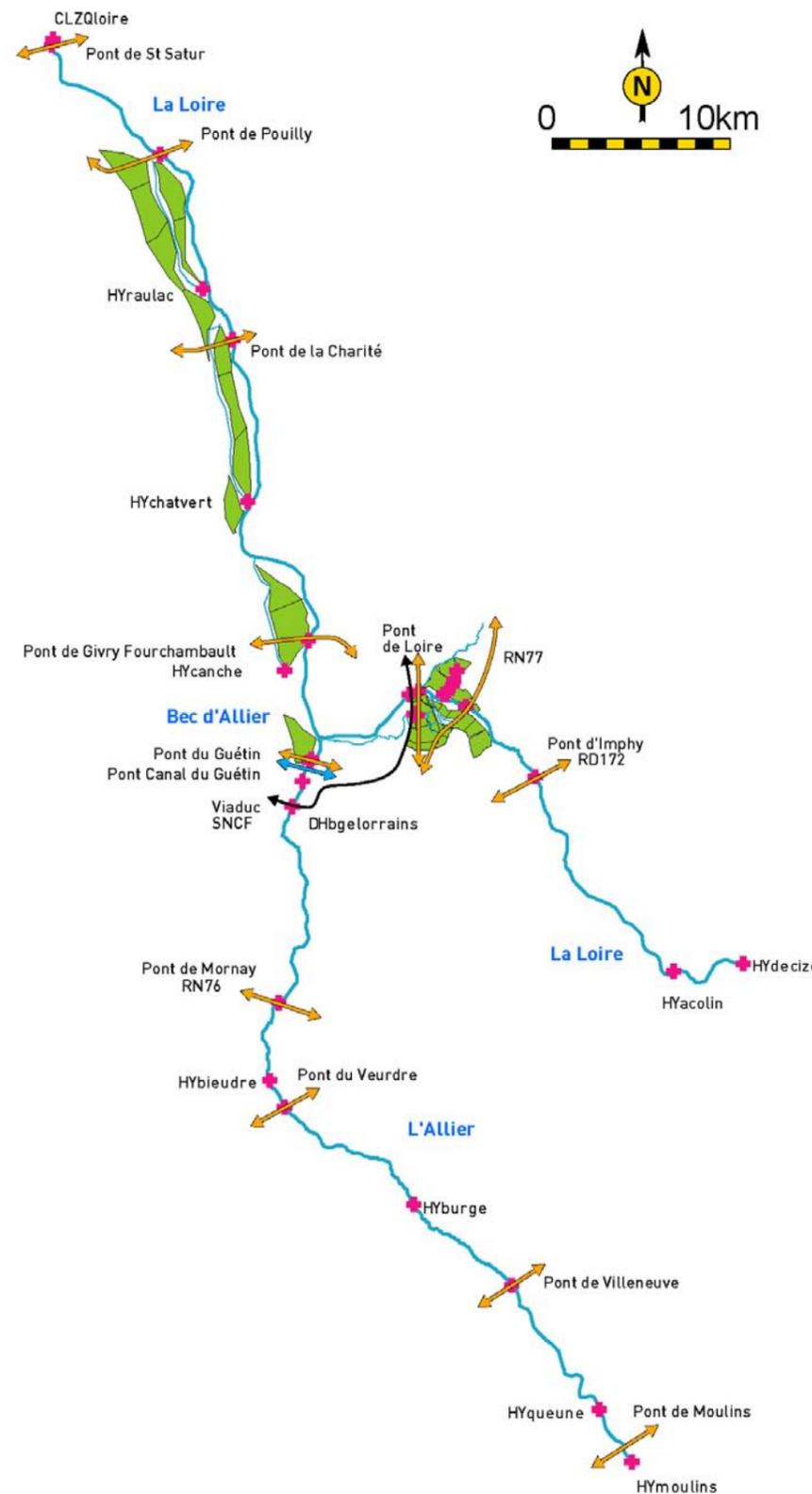


Modéliser les singularités hydrauliques

Les éléments : filaires, casiers et liaisons, doivent être complétés par des éléments spécifiques, les singularités.

Les obstacles aux écoulements tels que les ponts, les seuils, les déversoirs, sont modélisés spécifiquement par des singularités hydrauliques. Pour le modèle global d'EGRIAN, 3 types de singularités ont été utilisés :

- Le module « seuil transversal » pour modéliser les seuils.
- Le module de « perte de charge paramétrique » qui induit des pertes de charges pour ouvrage selon une loi définie par le modélisateur.
- Le module de « Bradley » qui induit des pertes de charge pour un pont calculées en fonction des ses caractéristiques géométriques.

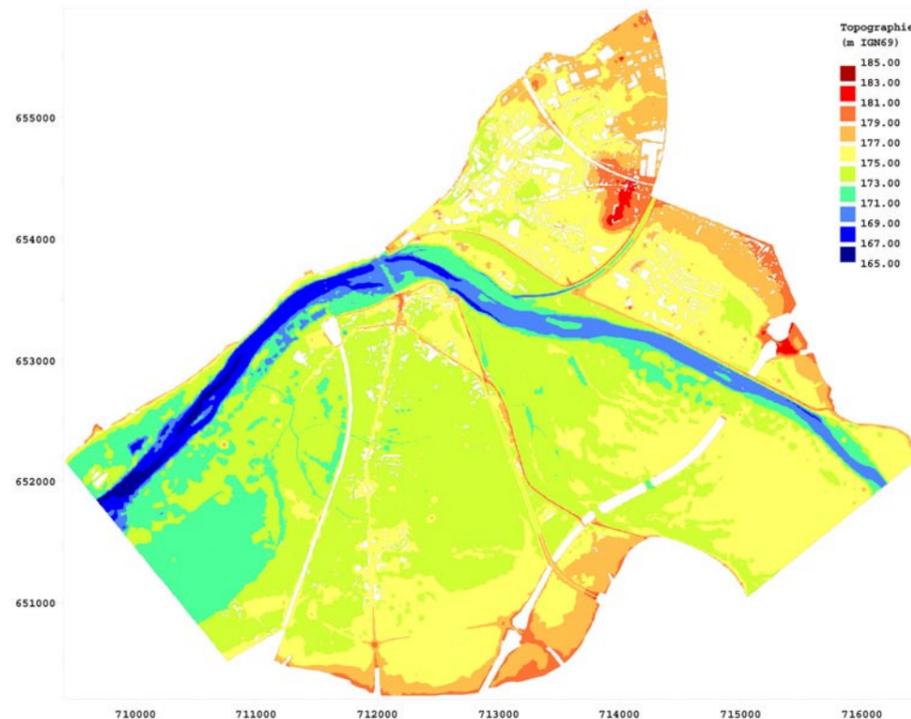


Construire le modèle détaillé 2D

Un maillage topographique composé de facettes.

Pour représenter au mieux tous les détails topographiques, la modélisation 2D utilise un maillage aux éléments finis, c'est-à-dire composé de facettes triangulaires de taille et de forme variables.

Un tel maillage permet d'une part d'obtenir une meilleure adaptation à la géométrie complexe d'un site donné, et d'autre part d'affiner la résolution du modèle dans les zones d'intérêt.



Etude EGRIAN - Modéliser pour EGRIAN

Minea - Septembre 2008

Des valeurs maximales ont été imposées pour les tailles des mailles.

La taille réelle à l'issue du processus de génération du maillage est inférieure aux tailles maximales imposées :

- 5 à 10 m sous les ponts,
- 15 à 20 m sur les levées et les infrastructures en remblai,
- 20 m sur les ruisseaux drainant la plaine (Nièvre naturelle, Eperon, Crot de Savigny, Gougnière, Peully, Saint-Antoine, Vieille Loire),
- 25 m dans les zones urbaines denses,
- 30 à 35 m sur le canal de dérivation et les bras secondaires de Loire,
- 40 m sur la Loire,
- 50 m au maximum en dehors des zones d'intérêt.

Faire des arbitrages pour être plus opérationnel.

Le choix de ces critères résulte d'un arbitrage entre, d'une part, le besoin d'une grande définition du modèle dans les zones d'intérêt ou dans les zones à géométrie complexe et, d'autre part, la nécessité de garder son caractère opérationnel au modèle par la limitation du nombre total de points de calcul.

Le maillage construit pour EGRIAN compte 84 975 éléments triangulaires, et 46 042 noeuds.

En chacun de ces points de calcul, aussi bien dans le lit ordinaire que dans la plaine inondable, TELEMAC-2D qu'utilise le bureau d'étude en charge de la modélisation 2D, SOGREAH, calcule les évolutions au cours du temps de la hauteur d'eau et de la vitesse des écoulements. Pour cette variable, le calcul restitue à la fois l'intensité de la vitesse et la direction du courant.

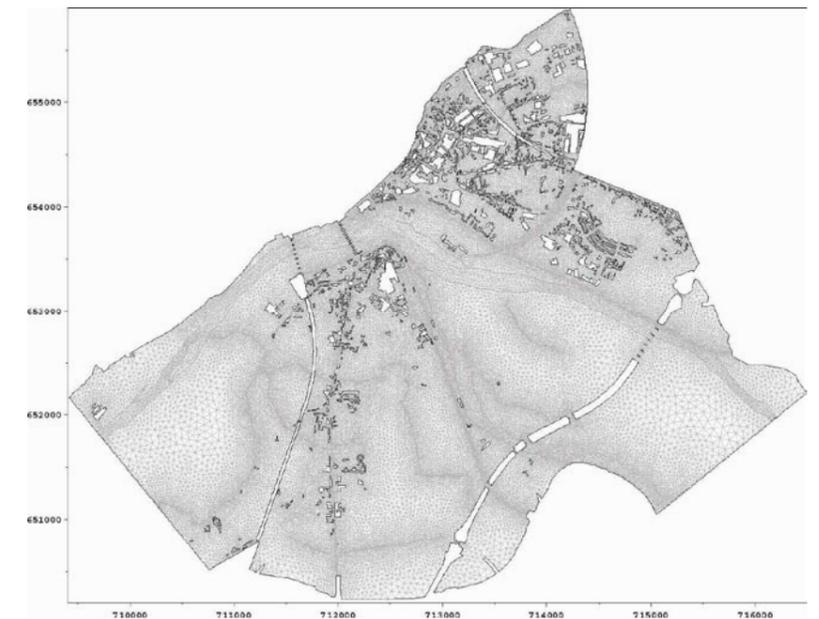


Figure 3 - Maillage du modèle

Etude EGRIAN - Modélisation bidimensionnelle
360_RAP_002_v1 - 02/07/2008
A.MASSON - SOGREAH

Page 13/40

Prendre en compte les éléments structurants

La modélisation 2D se fait à partir d'éléments structurants.

Pour représenter les éléments structurants que sont les obstacles ou les lits des cours d'eau, le maillage s'appuie sur des « lignes de contraintes ».

Les levées de la Loire et les infrastructures en remblai sont décrites par au moins 4 points de calcul.

Chaque section du lit mineur de la Loire est représentée par au moins 12 points de calcul, celui du canal de la Nièvre est quant à lui représenté par au moins 5 points.

Pour les autres cours d'eau drainant la plaine, chaque section du lit mineur a été représentée par 3 points.

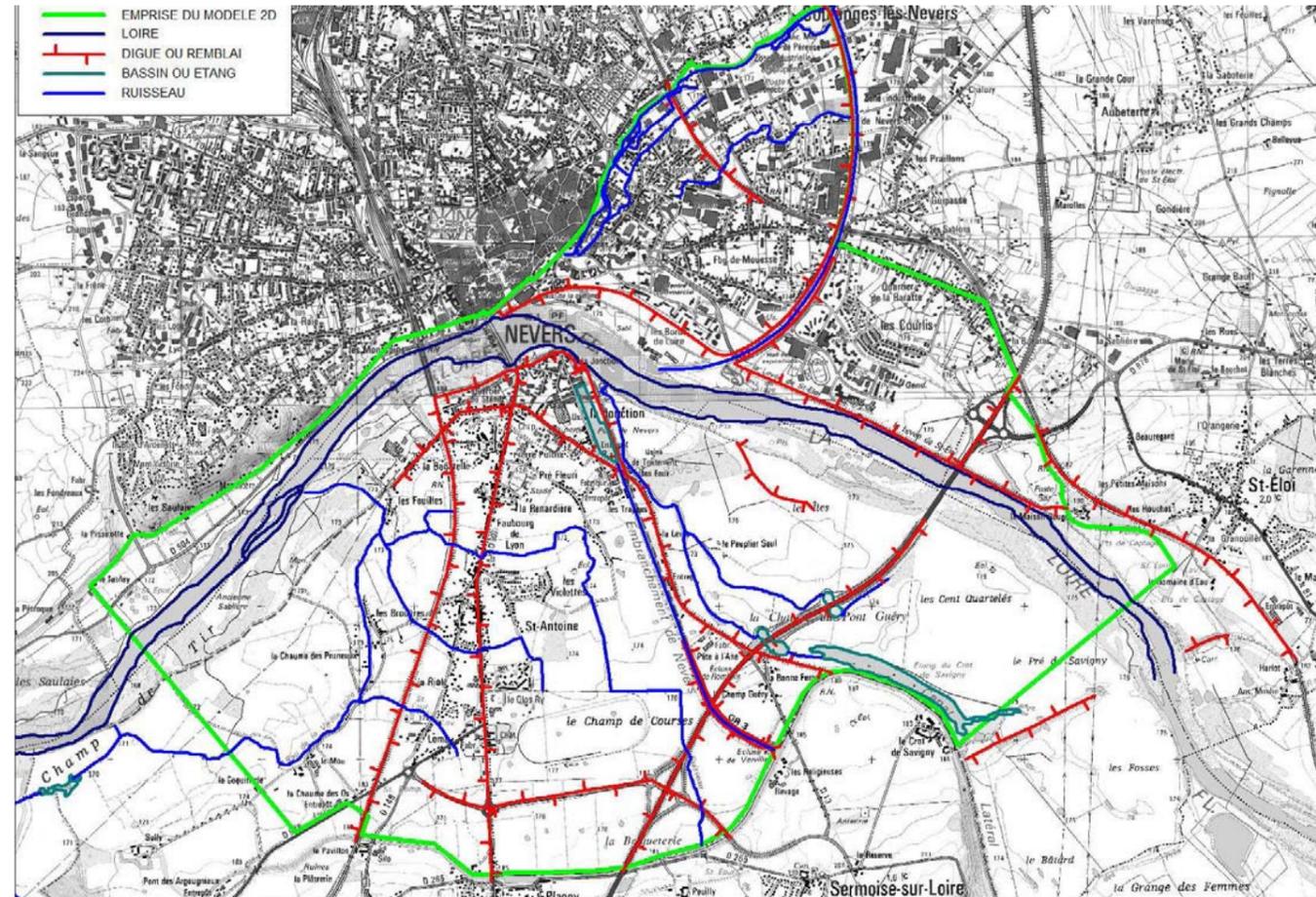


Figure 2 - Emprise du modèle local bidimensionnel et principaux éléments structurants du secteur

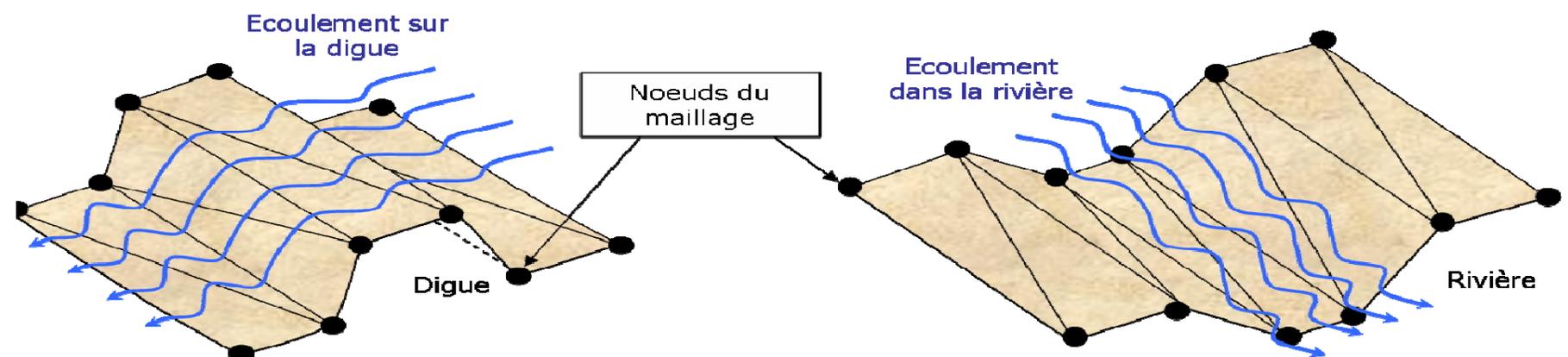


Figure 5 - Schématisation d'une digue et d'un cours d'eau dans un modèle 2D

Les constructions sont représentées

Les constructions sont représentées comme des blocs étanches.

Dans les zones urbaines denses, le choix a été de représenter explicitement les bâtiments.

Les grands axes de circulation favorisant les écoulements sont maillés de manière à pouvoir y calculer les hauteurs d'eau et les vitesses.

Les zones bâties sont regroupées en blocs de maisons sous la forme d'obstacles insubmersibles et imperméables.

Pour les secteurs peu denses, un coefficient de porosité est déterminé.

Dans les zones d'habitat individuel, il a été adopté une approche sans représentation des bâtiments. Deux effets induits par le bâti sur l'écoulement y sont représentés.

C'est la diminution de la capacité de stockage de l'eau du fait du volume occupé par le bâti et de la difficulté de l'écoulement à passer à travers une surface parsemée d'obstacles.

Un coefficient de porosité est donc déterminé.

Ce coefficient est calculé sur la zone considérée par un ratio de la surface au sol, libre de tout bâtiment, sur la surface totale de la zone.

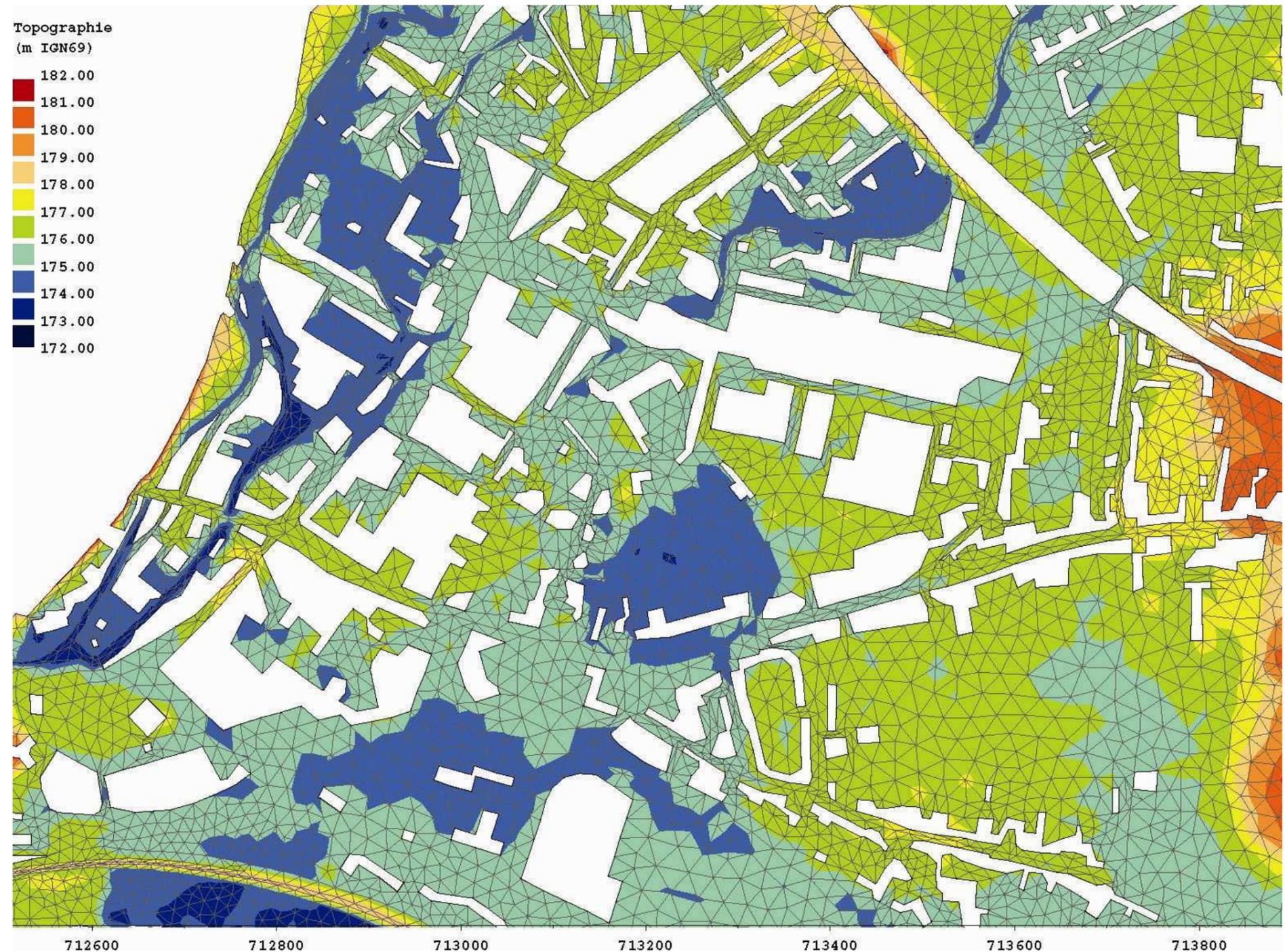


Figure 7 - Exemple de maillage en zone urbaine

Déterminer les conditions aux limites

Les conditions aux limites permettent de prendre en compte ce qui se passe en amont et en aval du modèle

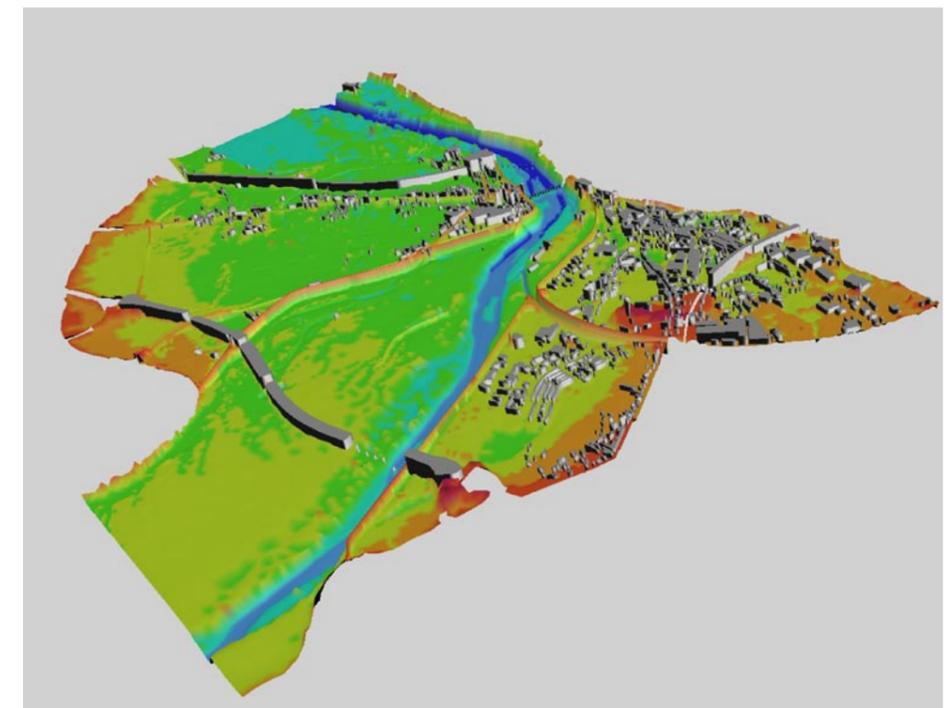
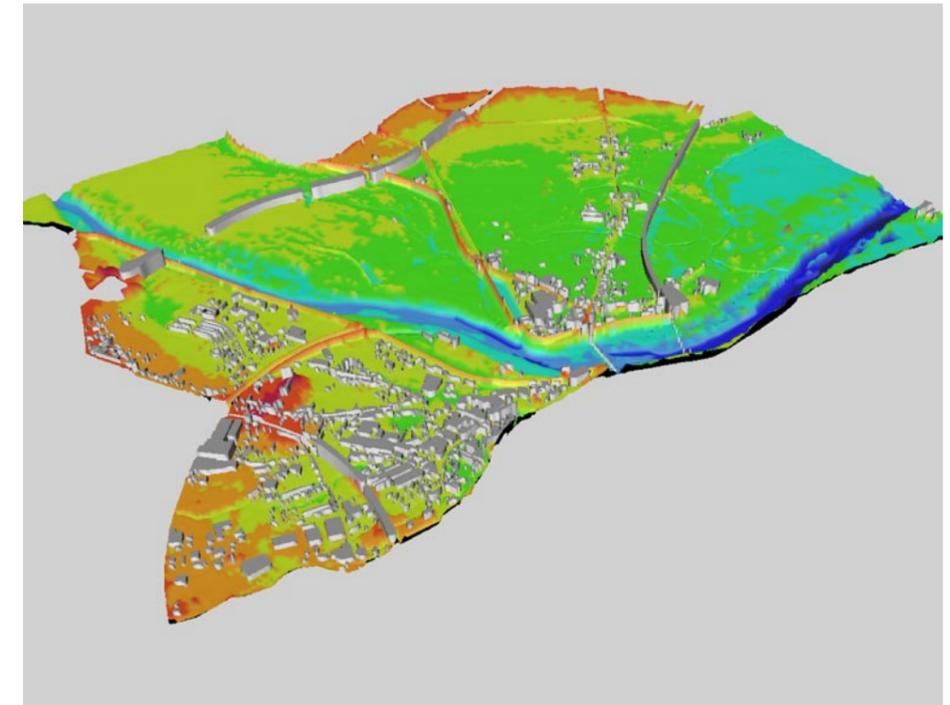
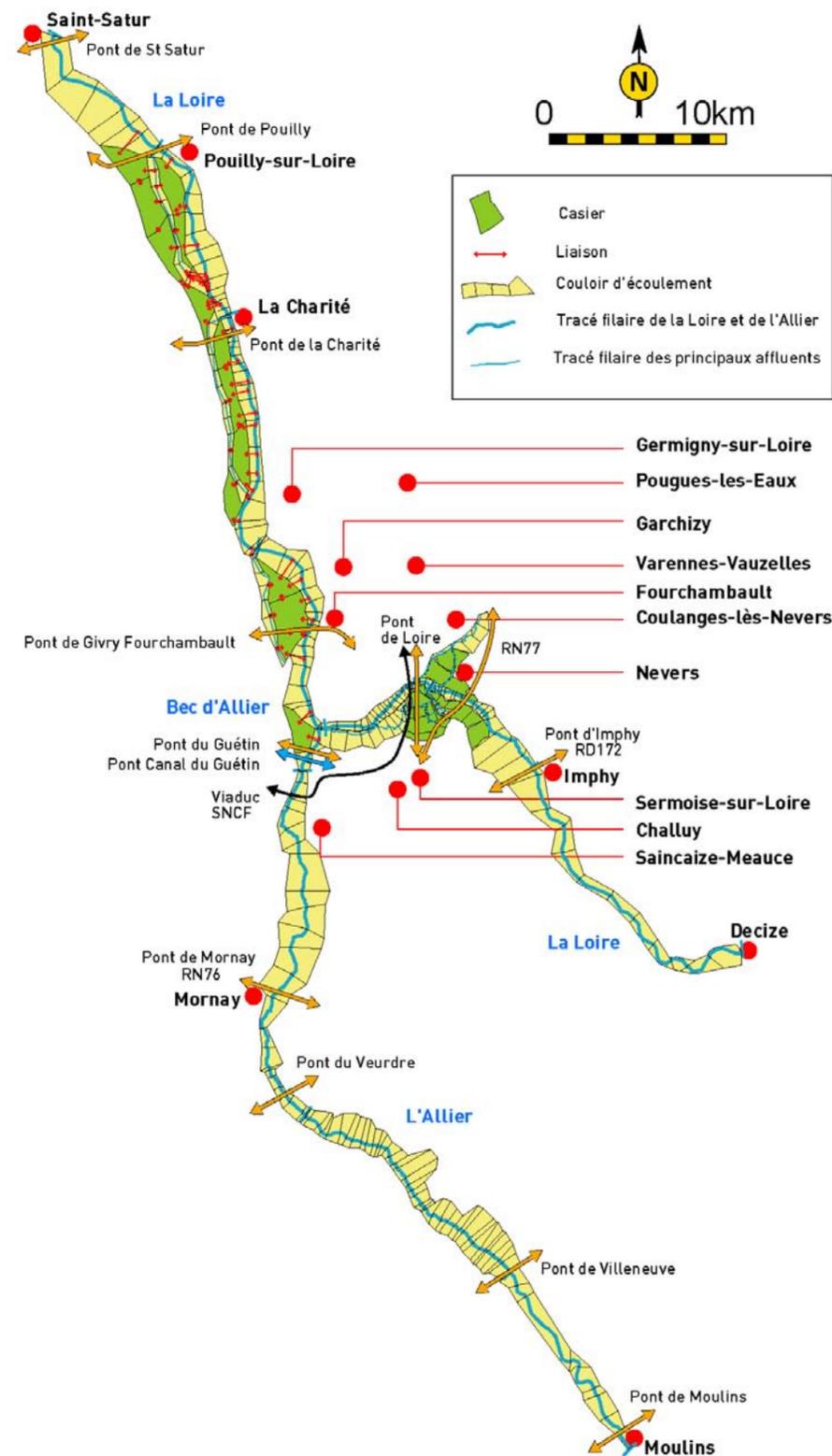
Les modèles ont des limites amont et aval déterminées lors de la première étape. Mais le cours d'eau, lui, ne s'arrête pas aux limites du modèle. Pour se raccrocher à ce qui se passe ensuite, la manière dont l'eau va sortir du modèle, il faut déterminer la condition limite aval.

Lors d'une simulation, le logiciel aura comme contrainte d'ajuster ses calculs pour que l'eau sorte du dernier point du modèle avec une cote donnée en fonction du débit qu'il aura trouvé.

Il faut rendre les modèles compatibles

La condition limite aval du modèle global 1D correspond à une relation débit/cote issue des résultats du modèle «Loire moyenne», ce qui permet de rester cohérent avec cette étude.

Les conditions limites amont et aval du modèle 2D sont, quant à elles, issues des résultats du modèle 1D.



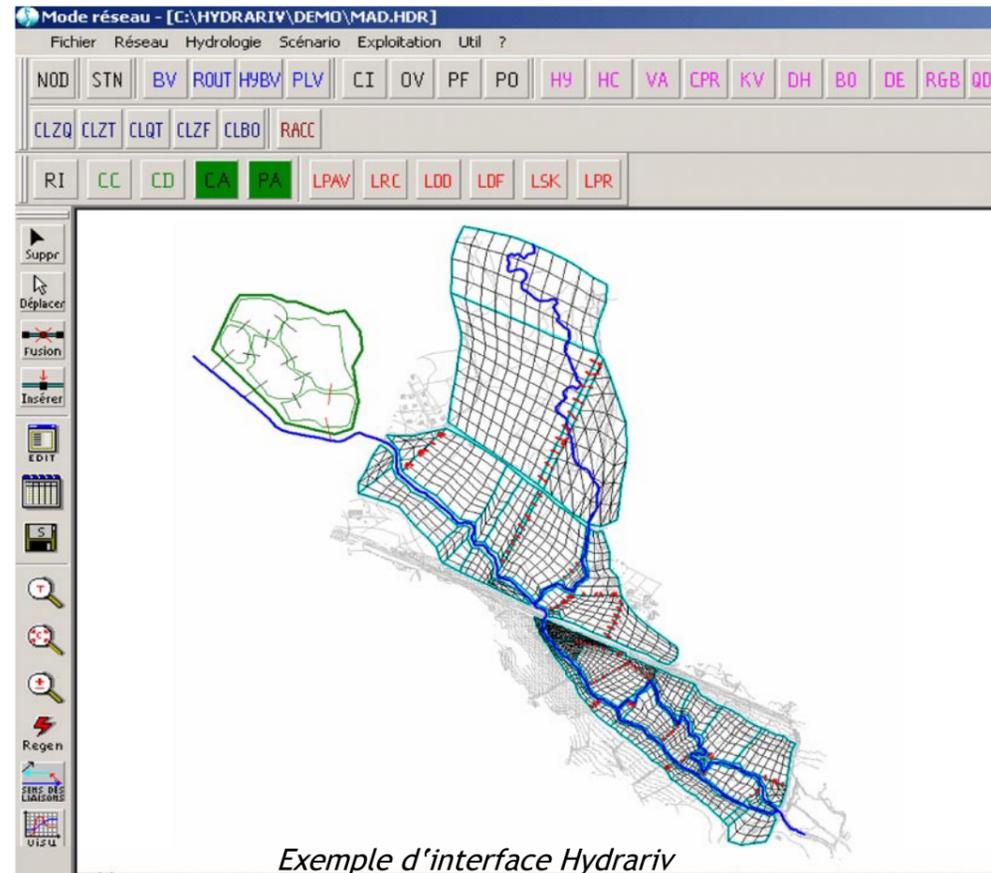
Construire les modèles dans les logiciels

Quand tout le travail préparatoire est fait, il faut entrer toutes ces données et ces hypothèses dans les logiciels.

Construire le modèle global

Le tracé du modèle filaire est dessiné sur une carte, en prenant en compte les profils en travers de la rivière tout au long du parcours ; les casiers sont placés, ainsi que les liaisons. A chaque liaison sont associés les différents coefficients. Et enfin, les ponts et les ouvrages hydrauliques sont implantés aux bons emplacements avec les bonnes mensurations.

Le modèle 1D est construit à partir de profils en travers qui peuvent s'espacer de 100, 500 ou 1 000 mètres. Lorsque les enjeux sont importants, un MNT est indispensable.



Exemple d'interface Hydrariv

Construire le modèle détaillé.

Pour un modèle 2D, il faut disposer d'un MNT. Le modélisateur triangule plus ou moins finement son territoire.

Le logiciel très puissant peut calculer, en tout point triangulé, les écoulements (hauteurs et vitesses).

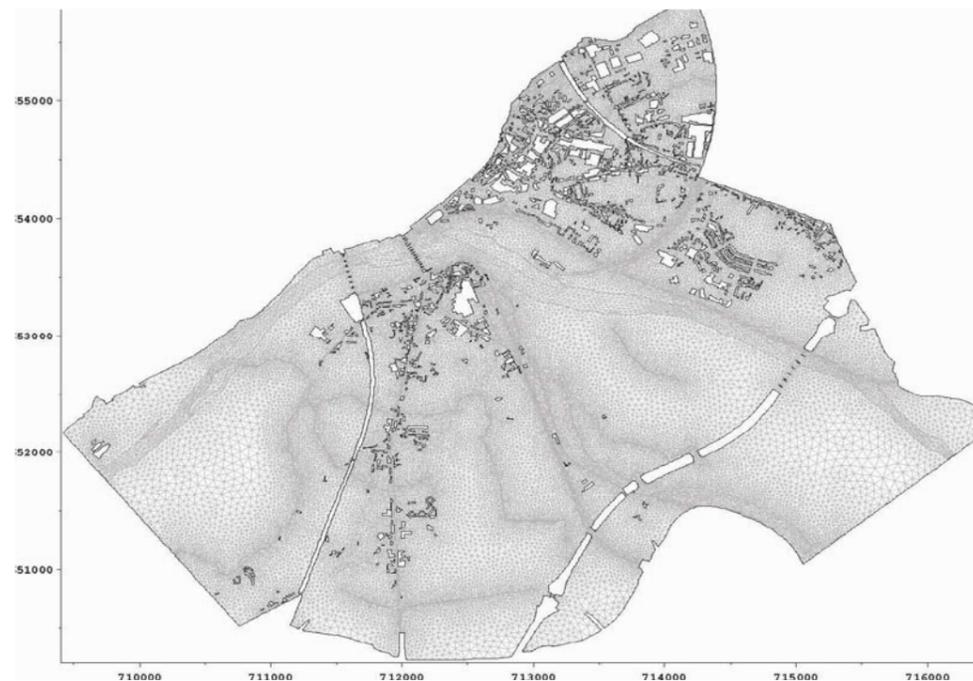


Figure 3 - Maillage du modèle

Le modèle détaillé est une interprétation du MNT

Tous les modèles sont des créations « d'auteurs ».

La densité des noeuds de calcul doit être interprétée par rapport à la complexité hydraulique des lieux et aux objectifs de la modélisation.

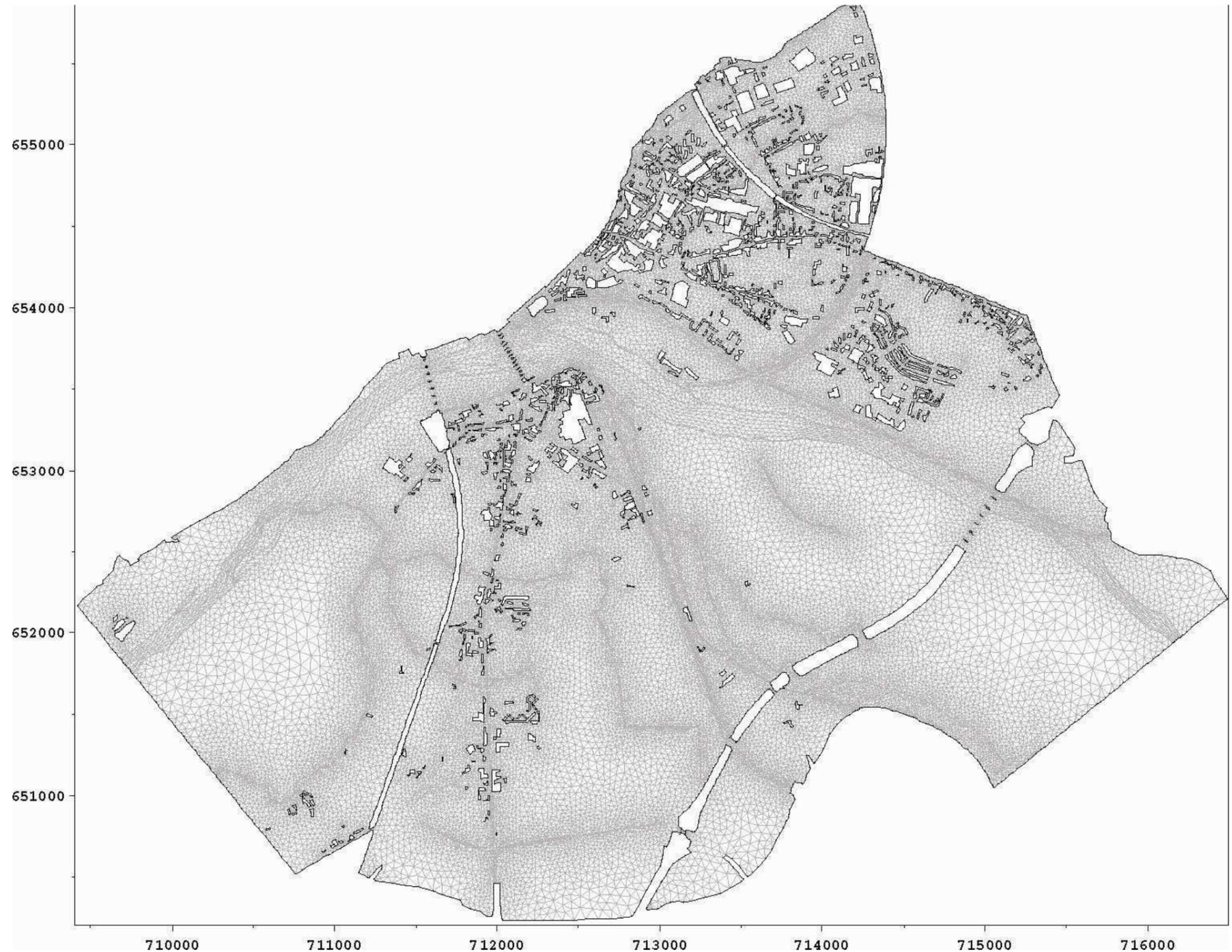


Figure 3 - Maillage du modèle

Il faut bien caler les modèles

Le calage se fait par rapport à des crues connues sur le terrain.

Les modèles sont « calés » en injectant différentes crues aux entrées de la maquette.

Cela se fait avec des crues dont on connaît les caractéristiques en hauteur, en vitesse, en débit et dans le temps.

Les modèles doivent traduire au plus près la réalité.

Pour caler, il faut régler différents coefficients qui dépendent de la nature des terrains et des configurations.

Pour le cas des liaisons, « le coefficient de rugosité » est apprécié par rapport à la nature du sol, et à la présence d'obstacles qui augmenteront le caractère « rugueux » de la surface. On peut faire de même avec le coefficient de déversement ou le coefficient d'orifice.

Caler : c'est une suite d'allers-retours...

C'est avec le réglage de ces paramètres que l'on cherche à représenter au mieux plusieurs crues connues : hauteur d'eau, débit, expansion, et que l'on cale les modèles.

Le principe est d'être au plus près, dans les modèles, des repères de crue observés lors du pic de la crue en hauteur et dans le temps.



Les sites d'observation servent au calage

Des sites d'observation installés tout au long du fleuve et de l'histoire

Les données de calage sont fournies par des stations de mesures et des sites d'observation enregistrant les données hydrologiques importantes lors des épisodes de crue. Les stations de mesures installées par le passé fournissent des éléments précieux. La majorité des sites observations ont été installés au XXème siècle.

50 stations ont été retenues pour le modèle 1D, dont 11 sur Nevers

Sur l'ensemble de l'emprise du modèle global EGRAN, il existe plus de 50 stations de mesures. La traversée de Nevers par la Loire est suivie par 11 sites d'observation dont 10 en rive droite et 1 en rive gauche.

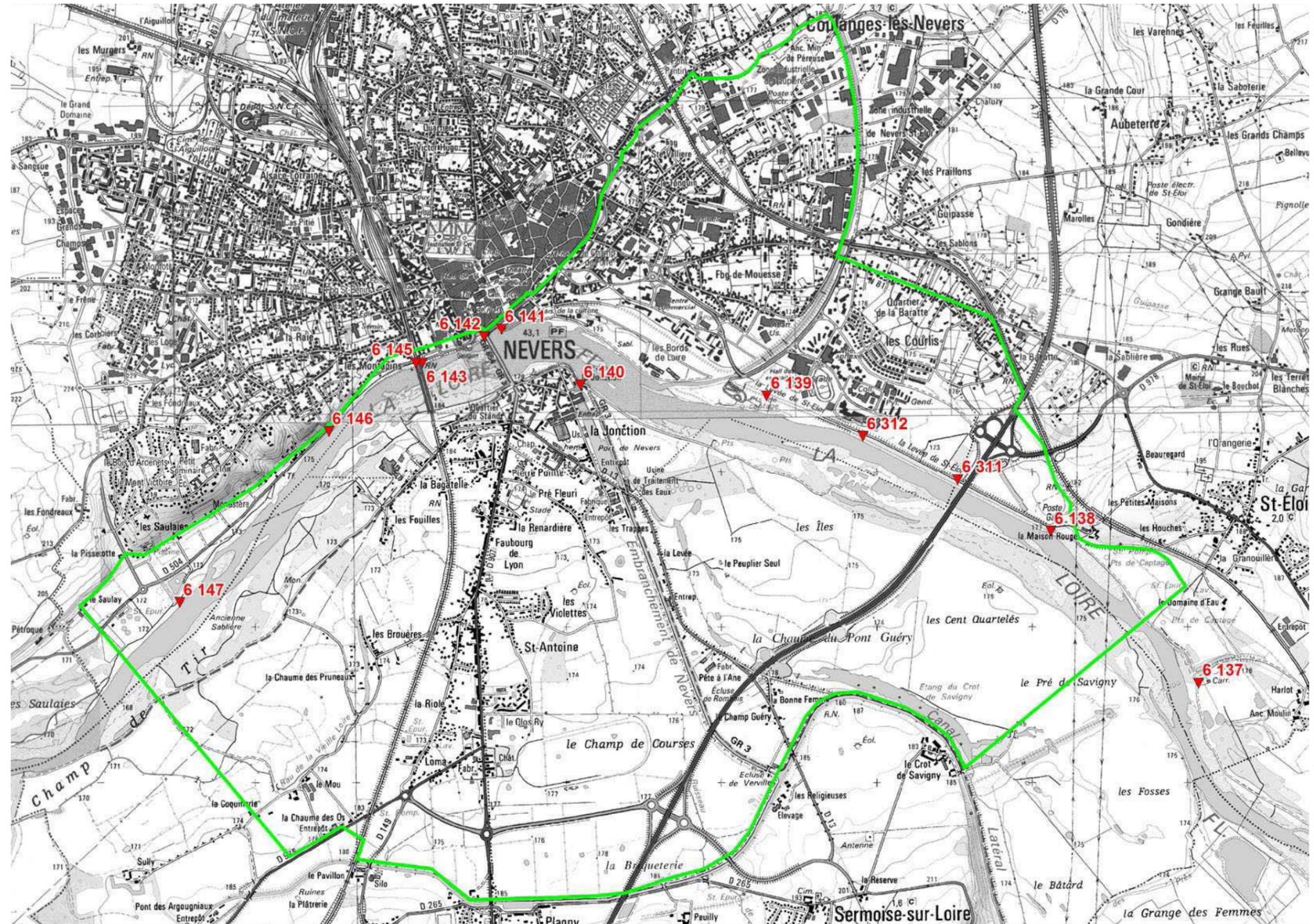


Figure 9 - Localisation des sites d'observation des crues dans la traversée de Nevers

Les crues de calage utilisées

Des critères de sélection

La sélection des crues de calage a été effectuée selon les critères ci-dessous :

- crues récentes (dix dernières années),
- une crue de période de retour inférieure ou voisine de 10 ans et une crue plus forte de période de retour voisine de 50 ans,
- disponibilité des mesures (en débits et hauteurs) pour ces crues au niveau des stations hydrométriques.

Crue	Q Loire à Imphy	Q Allier à Moulins	Q Nièvre	Q Loire à Givry
Décembre 2003	2 170 m ³ /s	1 580 m ³ /s	33 m ³ /s	3 290 m ³ /s
Mai 2001	1 730 m ³ /s	910 m ³ /s	81 m ³ /s	2 550 m ³ /s
Avril 2005	1 260 m ³ /s	820 m ³ /s	34 m ³ /s	1 810 m ³ /s

Crue	Loire amont	Allier	Loire aval
Décembre 2003	50 ans	> 50 ans	20-50 ans
Mai 2001	10 ans	5 ans	10 ans
Avril 2005	2-5 ans	2-5 ans	2-5 ans

La crue de décembre 2003

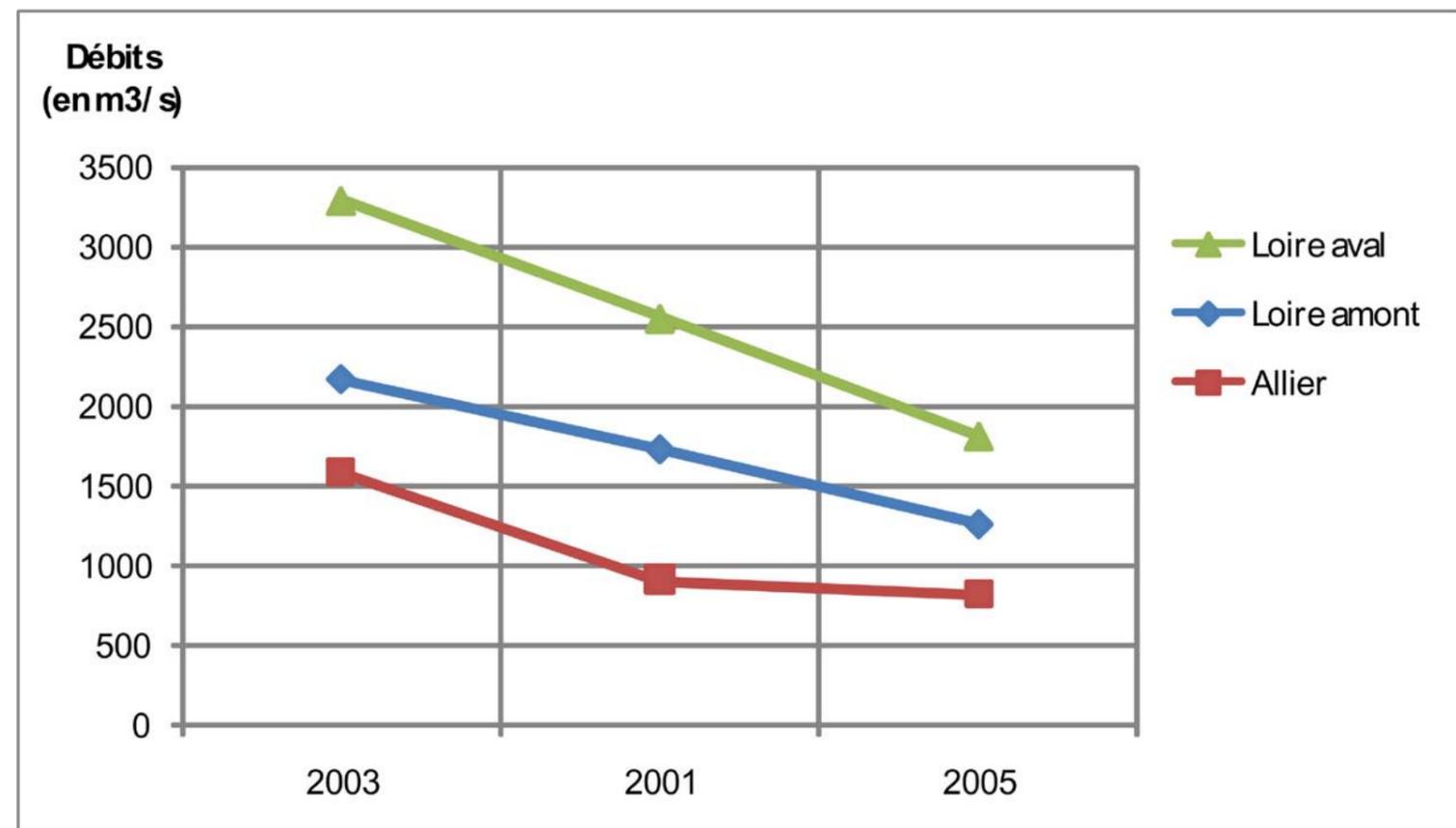
Elle apparaît comme cinquantennale à l'amont du Bec d'Allier et entre vicennale et cinquantennale après la confluence.

La crue de mai 2001

Celle-ci apparaît comme décennale.

La crue d'avril 2005

La période de retour de cette crue est comprise entre 2 et 5 ans.



Simuler pour caler les modèles

Les modèles doivent s'approcher au plus près de la réalité

Pour savoir si les modèles représentent la réalité, on se sert des données historiques des crues importantes : les « crues de calage ».

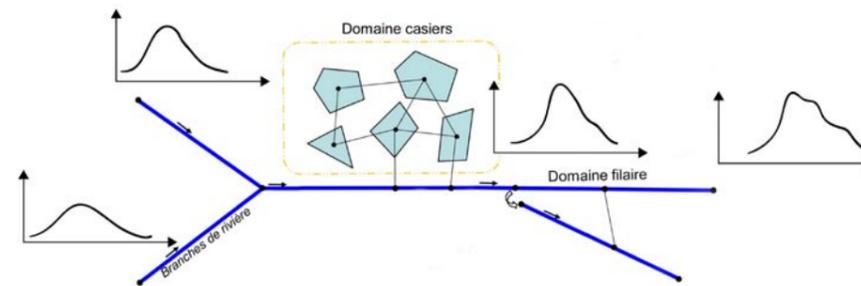
Les hydrogrammes de calage

On utilise pour cela les hydrogrammes.

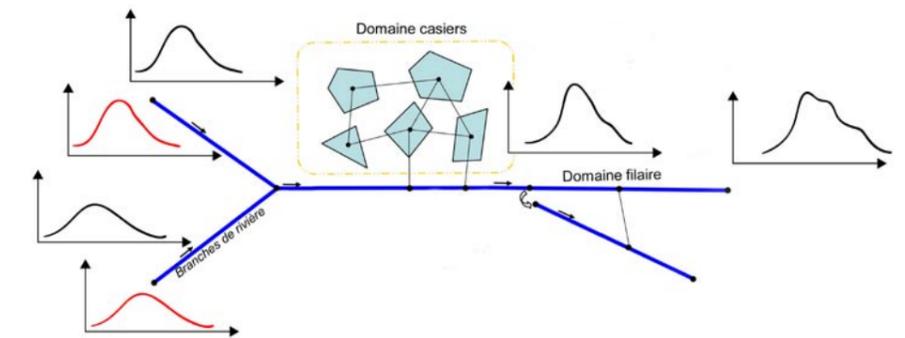
Ces courbes représentent l'évolution du débit en un point du cours d'eau tout au long de l'épisode de crue. Pour caler le modèle, il faut détenir des hydrogrammes d'une crue de référence en différents points.

Comparer les calculs du modèle aux mesures passées

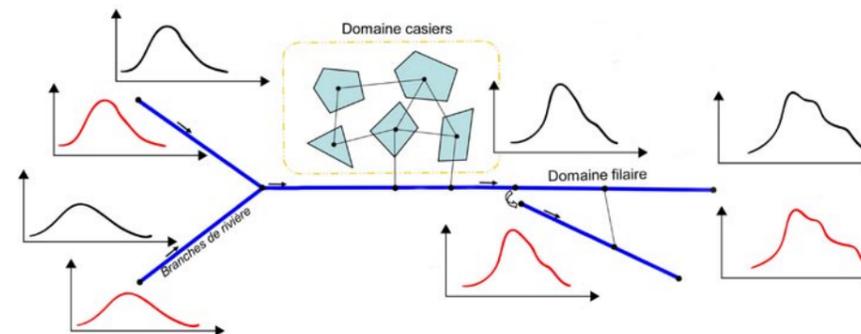
L'idée est de faire couler l'eau tout en amont du modèle de la même manière que cela a été mesuré lors de la crue de calage. On demande ensuite au logiciel de calculer l'évolution du débit en tout point dont on connaît les hydrogrammes de la crue de calage. Si le modèle est bien construit, les hydrogrammes de simulation seront proches des hydrogrammes historiques.



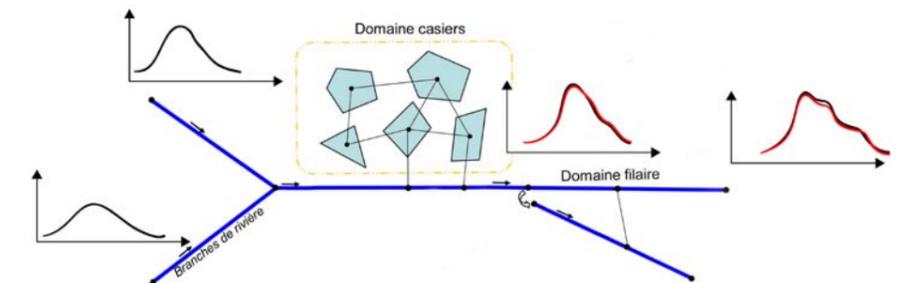
Les données existantes pour une crue historique sont caractérisées par des courbes et des hauteurs.



En amont du modèle, on injecte les mêmes quantités d'eau que celles de la crue historique.



Le logiciel calcule les hydrogrammes aux mêmes points pour lesquels on possède des données.



On compare les courbes pour en tirer des conclusions sur la précision du modèle.

Un modèle est un outil qui a des limites

Le calage est rarement satisfaisant du premier coup.

En comparant les différences entre les hydrogrammes simulés et historiques, l'hydraulicien émet des hypothèses pour améliorer le calage. Quels sont les coefficients mal évalués ? De combien ?

Les modèles se confrontent à la réalité.

Commence alors une série d'allers-retours entre la simulation, la comparaison des résultats et le calage des coefficients. Le calage s'arrête lorsque la différence entre la simulation et la réalité est acceptée par le groupe technique.

Une marge d'interprétation est indispensable

Pour EGRIAN, le modèle global a été calé à plus ou moins 15 cm sur les 55 stations retenues. Le calage du modèle est donc très satisfaisant.

Sur la traversée de Nevers, seule une dizaine de sites d'observation sont disponibles. Le modèle détaillé a été calé à plus ou moins 10 cm. Il est considéré comme très fiable.



Localiser les brèches potentielles

La brèche doit toujours être envisagée.

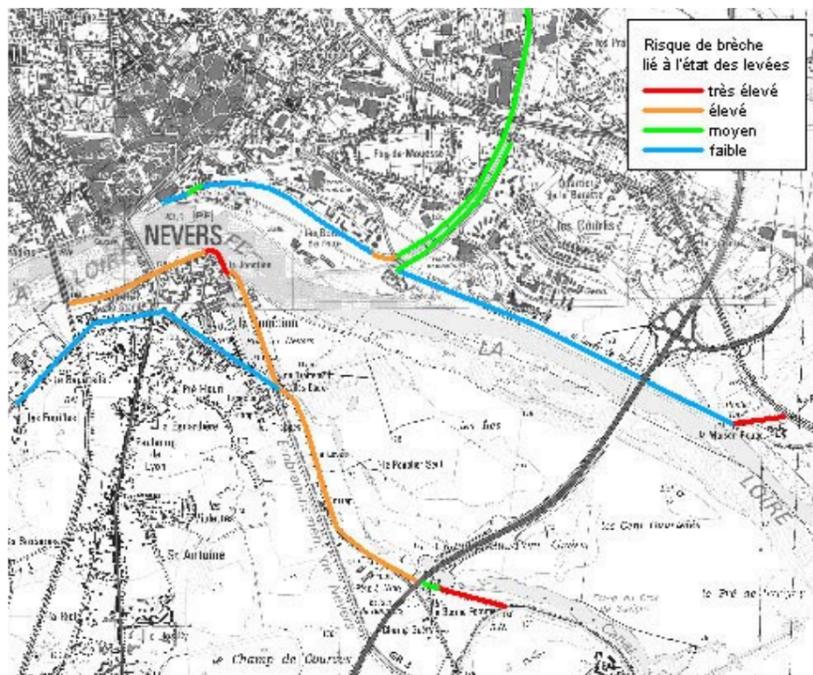
Il existe une singularité spécifique difficile à modéliser : c'est la brèche dans la levée.

La brèche par surverse

La comparaison des lignes d'eau et des profils de levées permet de détecter d'éventuelles zones de surverses qui provoquent, alors, des brèches par érosion du pied de levée côté val.

La brèche accidentelle

L'analyse structurale des levées permet de détecter des sites où, même en l'absence de surverse, il peut apparaître des dysfonctionnements mécaniques ou hydrauliques susceptibles d'entraîner l'apparition de brèches.



Etude EGRIAN - Modéliser pour EGRIAN

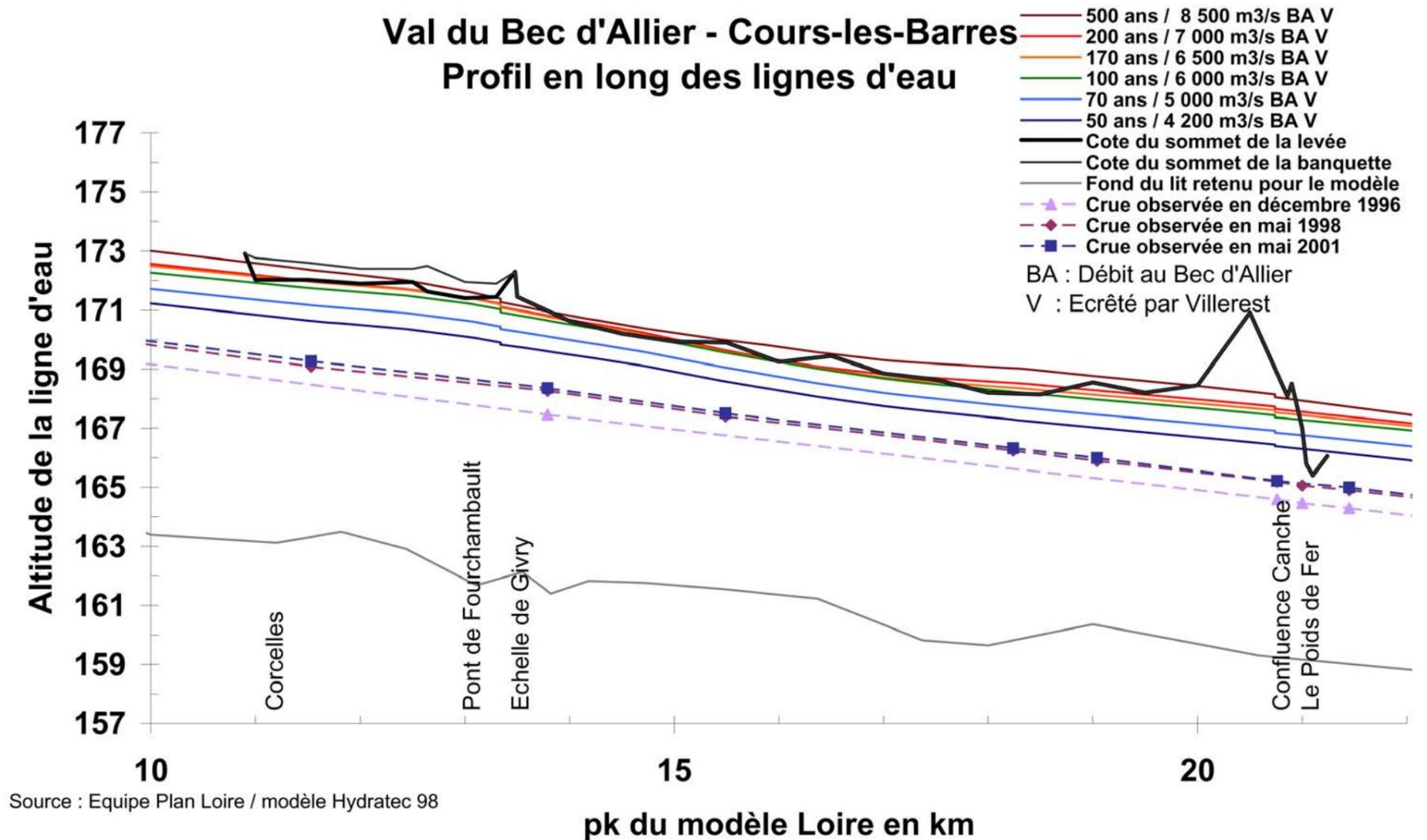
Minea - Septembre 2008

Des brèches accidentelles à l'amont du Bec d'Allier

A l'amont du Bec d'Allier, le modèle global 1D ne détecte pas de surverses. L'analyse structurale, validée par le groupe technique, conduit à modéliser des brèches accidentelles.

Des surverses à l'aval du Bec d'Allier

A l'aval du Bec d'Allier, le modèle global 1D ainsi que le modèle Loire moyenne détecte des surverses provoquant des brèches.



Modéliser les brèches

Le groupe technique a décidé de tester des brèches accidentelles à la hauteur de nevers

Après l'analyse des ouvrages, différents scénarios ont été proposés. Le groupe technique a déterminé également les critères d'ouverture. Il a retenu des 7 brèches de 100 m de large.



Cinq scénarios de brèches à modéliser ont été retenus.

