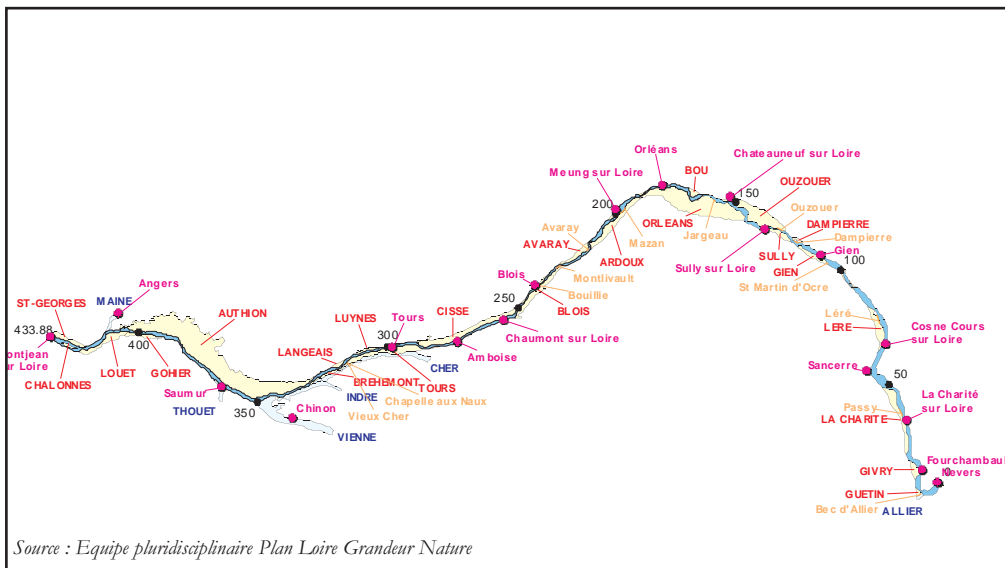


Sommaire du modèle Hydra 1998 Loire moyenne



Sommaire du modèle Hydra 1998 Loire moyenne1

Description et limites du modèle Hydra 19982

Constitution et résultats du modèle Hydra 19987

Calage et qualité du modèle Hydra 199818

Hydrologie de crue dans le modèle Hydra 199830

Les crues analysées dans le modèle Hydra 199842

Crue des affluents de la Loire dans le modèle Hydra 1998.....44

Une notion compliquée : la période de retour48

Système de protection par levée et déversoir.....50

Comportement des ponts en crue60

Sensibilité du modèle Hydra 1998 dans le fleuve et les vals64

Apparition et détection du maximum67

Description et limites du modèle Hydra 1998

Ce chapitre traite du bilan de ce que simule ou non le modèle, de sa précision, des partis pris pour sa mise en œuvre et des précautions à prendre dans l'utilisation des résultats

L'étude des différents scénarios de crue pour évaluer dans quelles conditions hydrologiques et hydrauliques, le territoire Loire Moyenne est susceptible d'être inondé, est menée à l'aide du modèle numérique de propagation des crues de la Loire entre Nevers et Montjean - modèle Hydra 1998 "Loire moyenne" - établi par HYDRATEC pour le compte de l'Etat, de l'Epala et de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne.

Construction du modèle Hydra 1998

Le modèle repose sur la mise en œuvre de deux principes de modélisation distincts : le **modèle filaire** et le **modèle à casiers**.

Le **modèle filaire** rend compte du fonctionnement de la Loire, de ses affluents et des principaux axes d'écoulement identifiés dans les vals. Il est construit à partir de profils en travers relevés en Loire et dans les principaux affluents, et à partir de données topographiques issues de cartes au 1/25 000^{ème} pour les filaires secondaires dans les vals.

Le modèle calcule, tout au long du modèle filaire, et à chaque instant de la simulation, la cote d'eau, le débit dans le lit mineur et le lit majeur et la vitesse moyenne par section.

Le **modèle en casier** représente les champs d'expansion des crues situés au-delà du lit majeur endigué de la Loire, dans les vals et dans les espaces inondables riverains du fleuve. Les casiers sont définis par des contours correspondant à des éléments graphiques et hydrauliques concrets : routes, voies SNCF, coteaux... La définition des casiers s'appuie sur les cartes au 1/ 25 000^{ème}. Dans le modèle, ils sont représentés par leur superficie et une relation donnant le pourcentage de la superficie du casier inondée en fonction de la cote d'inondation.

Le modèle calcule, pour chaque casier, et à chaque instant de la simulation, la cote d'eau moyenne sur l'ensemble du casier.

Les échanges entre un casier et filaire ou entre deux casiers correspondent aux entrées et sorties d'eau analysées et dimensionnées. Ils sont représentés dans le modèle par des liaisons numériques de quatre types : la **loi de surverse**, la **loi d'orifice**, l'**écoulement rugueux** et la **brèche**.

Dans la **loi de surverse**, l'eau déborde au-dessus d'une levée ou d'un talus.

La **loi d'orifice** est une liaison qui simule un passage par une ouverture quelconque.

Dans l'**écoulement rugueux** de casier à casier, l'eau coule sans obstacle précis, mais les forces de frottement de l'eau sur le terrain sont représentées.

La liaison de type **brèche** représente l'ouverture progressive d'une brèche dans le calcul lorsque le niveau d'eau dépasse le niveau altimétrique "seuil" correspondant généralement au sommet de la levée ou de la banquette. Le même type de liaison est utilisé pour représenter les déversoirs équipés de fusibles.

Les ponts et les seuils artificiels situés dans le lit de la Loire et de ses principaux affluents ont été modélisés en introduisant dans le calcul une perte de charge augmentant avec le débit. Les ponts anciens aux arches étroites et encombrantes sont représentés par des pertes de charge plus importantes que les ponts modernes ayant une faible emprise sur le fleuve.

Calage du modèle Hydra 1998

Le calage du modèle a consisté à retrouver, par le calcul et avec la plus grande précision possible, les niveaux d'eau observés sur le terrain par la DIREN de Bassin pour les crues de la Loire de novembre 1992, janvier 1994, mai et décembre 1996. Le modèle est capable de bien reproduire la réalité pour ces crues puisqu'il restitue, à plus ou moins 15 centimètres, 87% des 300 niveaux observés par les services de l'Etat lors de ces quatre crues.

Les données utilisées pour construire et caler le modèle filaire Loire allouent à celui-ci une précision, en moyenne, de 25 centimètres environ. Cela signifie qu'un niveau d'eau calculé de 40,50 m par le modèle serait dans la réalité compris entre 40,25 m et 40,75 m.

Les crues utilisées pour le calage ne mobilisent pas les vals. Les hypothèses faites lors de la modélisation pour représenter l'inondation des vals ont été réalisées par des hydrauliciens. En l'absence d'une crue forte récente ayant sollicité le système de protection, elles n'ont pu être vérifiées.

Des tests de sensibilité ont alors été réalisés. Ils permettent d'examiner dans quelle mesure la propagation des débits de la Loire est dépendante des paramètres utilisés pour représenter les mécanismes d'inondation dans les vals

Les tests de sensibilité effectués sur les largeurs, les cotes de fonctionnement et les rugosités des liaisons montrent que, à l'échelle globale de la Loire moyenne, les résultats du modèle sont peu sensibles aux variations d'une seule de ces grandeurs.

En ce qui concerne la précision dans les casiers, le modèle calcule pour chacun d'eux un niveau d'eau unique sur tout l'élément, à partir des volumes entrant et sortant par les liaisons, et de sa géométrie. Lorsqu'il y a un écoulement dans les casiers inondés, le modèle ne tient donc pas compte de la pente hydraulique des vals et le niveau moyen est calculé avec une précision de l'ordre de 50 cm.

Utilisation du modèle Hydra 1998 pour l'étude

Deux utilisations distinctes du modèle sont faites dans le cadre de l'étude, le mode absolu et le mode relatif.

Le **mode absolu** est le mode utilisé pour le diagnostic de la situation actuelle. Il consiste à comparer des niveaux d'eau calculés et des cotes réelles (levées, déversoirs, etc...) de manière à déterminer les atteintes lors des crues. Ce mode nécessite une bonne précision, d'où l'importance du calage.

Le **mode relatif** consiste à comparer deux scénarios de crue. Dans le cadre de l'étude Loire moyenne, on a par exemple comparé divers scénarios d'entretien du lit. Ce mode d'utilisation permet de déterminer de manière très précise l'impact d'un scénario par rapport à un autre.

Crues simulées par le modèle Hydra 1998

L'analyse de toutes les crues connues et historiques de la Loire moyenne a permis de déterminer des volumes de crue, des débits de pointe, des formes générales et des durées à l'aide de méthodes statistiques. Six crues caractéristiques ont été retenues. Elles sont définies par le débit naturel au Bec d'Allier écrêté de 1 000 m³/s par le barrage de Villerest. Leurs périodes de retour sont les suivantes :

- 50 ans (4 200 m³/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 5 200 m³/s naturels),
- 70 ans (5 000 m³/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 6 000 m³/s naturels),
- 100 ans (6 000 m³/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 7 000 m³/s naturels),
- 170 ans (6 500 m³/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 7 500 m³/s naturels),
- 200 ans (7 000 m³/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 8 000 m³/s naturels),
- 500 ans (8 500 m³/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 9 500 m³/s naturels).

Pour ce qui est des principaux affluents (Cher, Indre, Vienne, Thouet et Maine), la crue de 1856 reconstituée a été injectée dans le modèle pour toutes les périodes de retour.

Dans le cadre d'un modèle à l'échelle interrégionale (au 1/50 000^{ème}) il a en effet été délibérément choisi de ne pas multiplier les scénarios à comparer en gardant le même débit sur les affluents quelle que soit la période de retour. Par conséquent, les résultats sont fiables et homogènes sur le secteur du Bec d'Allier à Tours, où on ne note pas d'apport notable des affluents, pour les crues de période de retour supérieure à 70 ans. Ils sont à prendre avec plus de précautions en aval de Tours où les hauteurs d'eau en Loire en crue se tiennent toutes dans un intervalle de 1 m pour les 6 scénarios étudiés.

Inondation simulées par le modèle Hydra 1998

Grâce aux éléments numériques de type filaire, casier et liaisons, plusieurs mécanismes d'inondation sont simulés par le modèle Loire moyenne. Ils correspondent à différentes configurations Loire - levées - système de protection :

- inondation par expansion dans le lit majeur endigué ou entre coteaux,
- inondation du val par remous dans l'affluent,
- inondation du val par fonctionnement d'un déversoir (il en existe trois sortes : déversoir au terrain naturel, déversoir simple, plus haut que le terrain naturel, sans fusible, déversoir plus haut que le terrain naturel, équipé d'un fusible),
- Inondation du val par surverse par-dessus la levée,
- Inondation du val par ouverture d'une brèche dans la levée suite à une surverse.

En ce qui concerne l'ouverture de brèches et l'effacement des fusibles des déversoirs, la modélisation ne représente pas le comportement géotechnique des levées, banquettes et fusibles. Elle ne déclenche une brèche (ou un effacement de fusible) que lorsqu'elle détecte une surverse par-dessus la levée ou le fusible. L'ouverture est relativement lente (10 à 12 heures) pour la tenue numérique du calcul. Ce parti pris de modélisation fait que le déversoir d'Ouzouer fonctionne en crue centennale pour 1 cm de surverse par-dessus un point bas et que le déversoir de La Chapelle-aux-Naux ne s'ouvre pas en crue deux-centennale alors que le Cher s'appuie pendant 4 jours sur les trois quarts de sa hauteur.

Le modèle fournit des résultats hydrauliques (hauteurs d'eau, débits) qui doivent être utilisés en tenant compte de la précision liée d'une part au calage et d'autre part à l'élément considéré (filaire ou casier). A ce titre, il convient d'être vigilant à ne pas les sortir du contexte de l'étude et à ne pas les dissocier des hypothèses ayant présidé à l'élaboration du modèle.

C'est un parti pris fondamental et original en 1997 que la modélisation puisse, à l'échelle de la Loire moyenne, décrire avec précision la progression des événements dans le temps et donner ainsi une image dynamique de l'inondation globale. Ce choix de conception exclut l'utilisation de résultats dans les vals à une échelle locale.

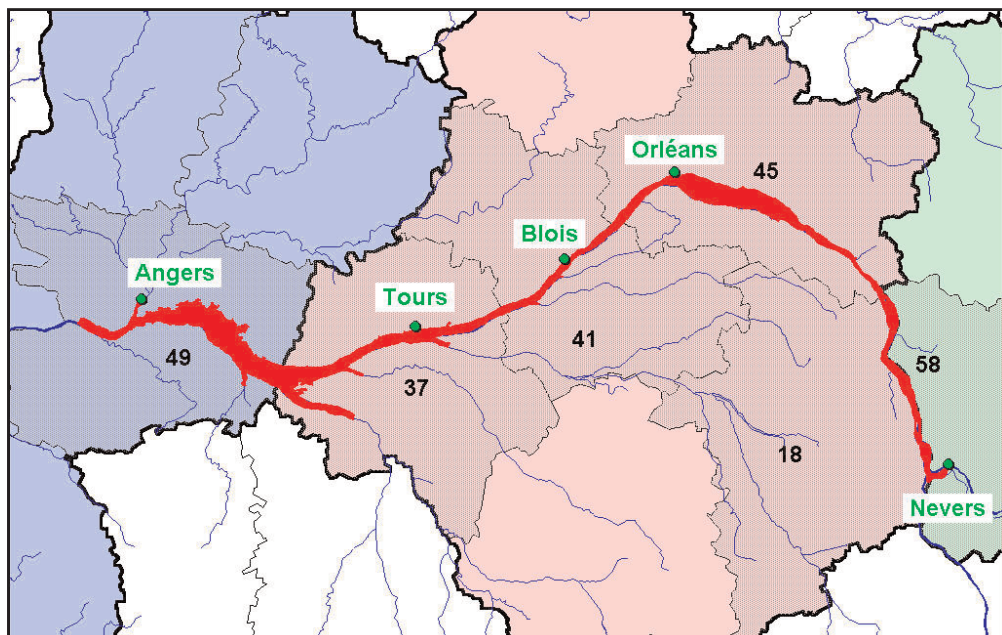
Ce que le modèle Hydra 1998 ne simule pas

Plusieurs facteurs d'aggravation de l'inondation ne sont pas simulés par le modèle. Il s'agit :

- des effets du vent,
- des rehausses dans les courbures,
- des brèches accidentelles,
- des remontées de la nappe alluviale,
- des embâcles de végétaux.
- des embâcles aux ponts.

La modélisation donne seulement une image de l'inondation prévisible. L'utilisation des résultats n'a de sens que si on considère qu'un certain nombre de facteurs sont susceptibles d'aggraver la situation.

Constitution et résultats du modèle Hydra 1998



Le modèle Hydra 1998 Loire moyenne

L'étude des différents scénarios de crue pour évaluer dans quelles conditions hydrologiques et hydrauliques, le territoire Loire Moyenne est susceptible d'être inondé, est menée à l'aide du modèle numérique de propagation des crues de la Loire entre Nevers et Montjean - modèle "Loire moyenne" - établi par HYDRATEC pour le compte de l'Etat, de l'Epala et de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne.

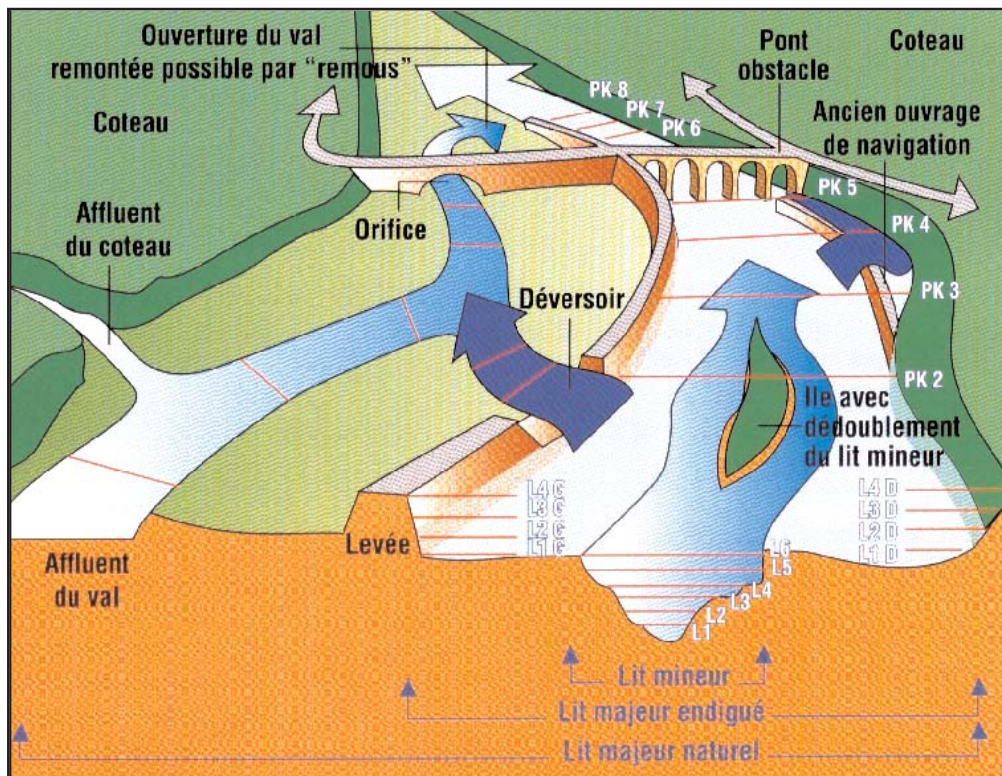
De Nevers à Angers, ont été modélisés : 450 km de Loire, les principaux affluents, 150 000 ha de zones inondables et 600 km de levées isolant 100 000 ha de val en 33 vals différents.

Le modèle Loire moyenne est construit à partir d'une topographie précise de 1995, définie, pour le lit du fleuve, par un profil en travers de Loire tous les kilomètres, et, pour les vals, par la cartographie existante, principalement les cartes de l'Institut géographique national au 1/25 000ème. Et une série de profils réalisés sur certains axes routiers ou sur des ouvrages pouvant influencer les écoulements (ponts, buses...). Ce travail minutieux a été réalisé en concertation avec les gestionnaires du fleuve et les élus riverains.

Le découpage de la Loire moyenne en casiers et domaines filaires a été présenté lors de réunions organisées par le préfet dans chaque département (Cher et Nièvre ensemble) au début de l'année 1997.

Le calage du modèle a consisté à retrouver, par le calcul et avec la plus grande précision possible, les niveaux d'eau observés sur le terrain par la Diren de Bassin pour les crues de novembre 1992, janvier 1994, mai et décembre 1996. Le modèle est capable de bien reproduire la réalité pour ces crues puisqu'il restitue, à plus ou moins 15 centimètres, 87% des 300 niveaux observés par les services de l'Etat lors de ces quatre crues.

Le modèle repose sur la mise en œuvre de deux principes de modélisation distincts : le modèle filaire et le modèle à casiers.



Le modèle filaire

Le modèle filaire rend compte du fonctionnement de la Loire dans son lit majeur endigué, de ses affluents et des principaux axes d'écoulement.

Les emprises d'écoulement sont la Loire non endiguée, délimitée par ses coteaux, la Loire endiguée délimitée par des levées, les principaux affluents du fleuve, les ruisseaux ou thalwegs de drainage dans les vals, et les terrains situés dans le prolongement des déversoirs qui deviennent des axes d'écoulement en cas de crue.

Le couloir d'écoulement est gradué en points kilométriques. Pour la Loire moyenne, le pont de la RN7 à Nevers est le pk 0,000 km et le pont de Montjean est le pk 433,800 km. En tout, 698 profils en travers de la Loire ont été entrés dans le modèle. Parmi ceux-ci, les deux tiers sont des profils relevés par un géomètre et un tiers a été interpolé.

Le modèle filaire se construit à partir de profils en travers. L'hydraulicien synthétise avec 14 points, les profils en travers levés par le géomètre. Il interpole des profils supplémentaires pour rester fidèle à la géométrie du lit du fleuve.

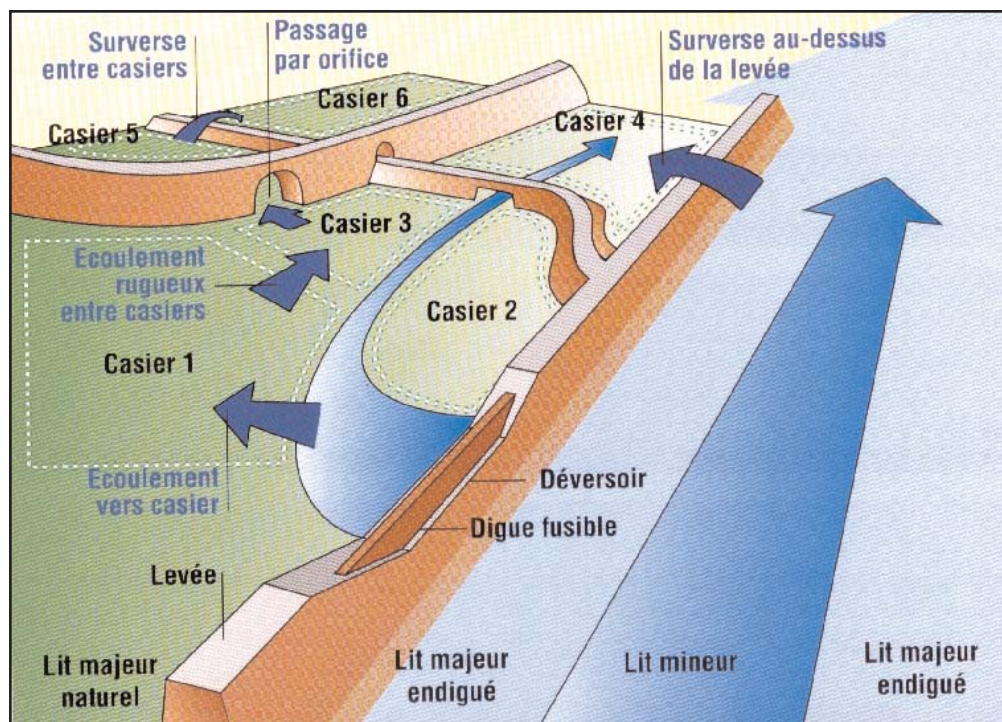
Dans un filaire, l'eau coule généralement de l'amont vers l'aval. Toutefois, dans les zones de confluence de deux filaires, l'écoulement peut changer de sens lors des crues, le niveau de l'eau peut monter par "remous". C'est ce qu'il se produit dans les affluents ou les vals lorsque la montée d'eau en Loire les inonde de l'aval vers l'amont.

Le modèle casier

Le modèle en casier représente les champs d'expansion des crues situés au-delà du lit majeur endigué de la Loire, dans les vals et dans les espaces inondables riverains du fleuve.

Chaque casier est défini géographiquement par ses contours qui correspondent, en général à des obstacles physiques influençant l'écoulement : levées, coteaux, routes, talus ... puis numériquement par sa superficie et par une courbe $a(Z)$ où a est le pourcentage de la superficie du casier situé sous la cote Z . La planimétrie générale du terrain est ainsi entrée dans le modèle ce qui définit le volume d'eau susceptible d'être stocké dans la zone inondée.

Les entrées et sorties d'eau pour un casier sont analysées et dimensionnées : des liaisons numériques sont définies pour représenter dans le modèle les échanges d'eau entre casiers. Quatre types de liaisons hydrauliques sont utilisés : la **loi de surverse**, la **loi d'orifice**, l'**écoulement rugueux** et la **brèche**.



Dans la **loi de surverse**, l'eau déborde au-dessus d'une levée ou d'un talus. La liaison est calée au niveau de l'arase du point bas de la levée ou de la banquette. Les débits susceptibles d'entrer dans le val sont calculés par une loi de type déversement simple fonction de la cote d'arase, de la largeur de la zone basse et du coefficient de seuil.

La **loi d'orifice** est une liaison qui simule un passage par une ouverture quelconque : buse, dalot ou pont. Elle est représentée par les dimensions de l'orifice et les coefficients de seuil et d'orifice.

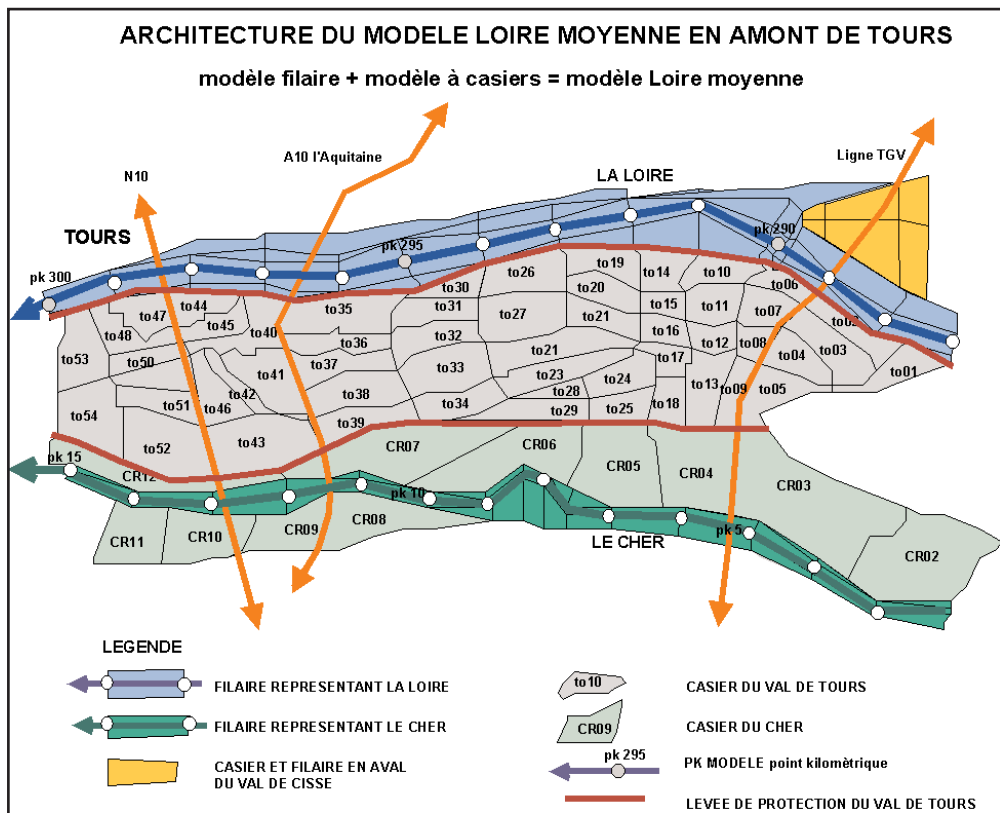
Dans l'**écoulement rugueux** de casier à casier, l'eau coule sans obstacle précis, mais les forces de frottement de l'eau sur le terrain sont représentées. La liaison est définie par sa cote, sa largeur, un coefficient de rugosité et la distance entre casiers.

La liaison de type **brèche** représente l'ouverture d'une brèche dans le calcul lorsque le niveau d'eau, calculé à un pas de temps, dépasse le niveau altimétrique " seuil " correspondant généralement au niveau, mesuré par le géomètre, de la levée ou de la banquette. La liaison ouvre totalement la brèche en 12 heures. Ce type de liaison est défini par un seuil de déclenchement, une largeur, un seuil bas, un coefficient de seuil et un temps d'ouverture.

Un même casier peut avoir plusieurs liaisons de différents types.

En tout, ce sont 549 casiers et 1 548 liaisons (dont 83 de type " brèche ", 512 de type " surverse ", 923 de type " rugueux " et 30 de type orifice) qui ont été modélisés.

La confection du modèle a nécessité le travail de quatre ingénieurs entre l'été 1996 et le printemps 1997.



Un exemple de l'architecture du modèle est présenté ci-dessous. Il montre les axes filaires d'écoulement du Cher et de la Loire, repérés par le point kilométrique modèle, le découpage du val de Tours - partie amont - en casiers et le nom des casiers.

Les voies TGV, l'Autoroute A71 et la N10 franchissant la Loire au Pont Wilson à Tours sont ajoutées pour faciliter le repérage.

La précision du modèle dans le filaire Loire

Le long du filaire de la Loire, le modèle calcule l'évolution des niveaux d'eau, des vitesses moyennes d'écoulement et des débits. Les données utilisées pour construire et caler le modèle filaire allouent à celui-ci une précision, en moyenne, de 25 centimètres environ. Cela signifie qu'une crue réelle identique à celle simulée par le modèle, qui en calcule la cote de 40,50 m en un point précis, devrait dans la réalité apparaître entre 40,25 m et 40,75 m.

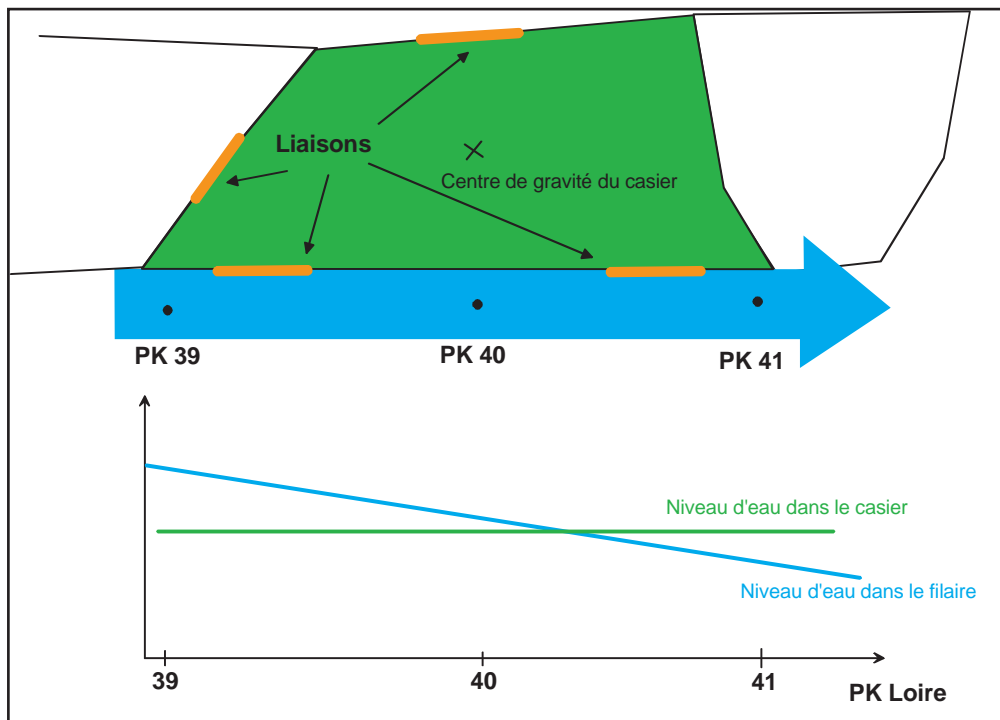
La précision du modèle dans les autres filaires

Les autres filaires, correspondant aux affluents de la Loire et aux chemins d'écoulement dans les vals, ont été construits à partir de données géométriques uniquement, sans calage.

Les apports des petits affluents circulant dans les vals sont essentiellement définis pour des raisons d'attribution d'un débit minimum constant dans les filaires des vals pour que le modèle puisse calculer. Ces débits sont très petits devant les débits circulant dans les vals lorsque les déversoirs les alimentent ou lorsque des brèches s'ouvrent. Ils n'ont pas d'influence sur la crue mais sont nécessaires pour des impératifs numériques. Toutefois, ils sont suffisants parfois pour mettre en eau certains fonds de casier.

Le modèle permet de rendre compte de façon satisfaisante des mécanismes hydrauliques rencontrés sur les petits et moyens affluents : remous, écoulement dans le val suite au fonctionnement d'un déversoir, etc... même si, en l'absence de calage, la précision des résultats numériques est inférieure à celle obtenue dans le filaire Loire.

Sur les principaux affluents (Cher, Indre, Vienne et Maine), on a vérifié que les résultats hydrauliques calculés par le modèle étaient cohérents avec les niveaux observés sur ces cours d'eau lors des crues passées.



La précision du modèle dans les casiers

Les casiers sont définis par un niveau d'eau unique, calculé à partir des volumes entrant et sortant par les liaisons, et de la loi de remplissage du casier, liée à sa géométrie. Il s'agit donc d'un niveau moyen sur l'ensemble du casier. La hauteur d'inondation calculée est également une hauteur moyenne sur l'ensemble du casier.

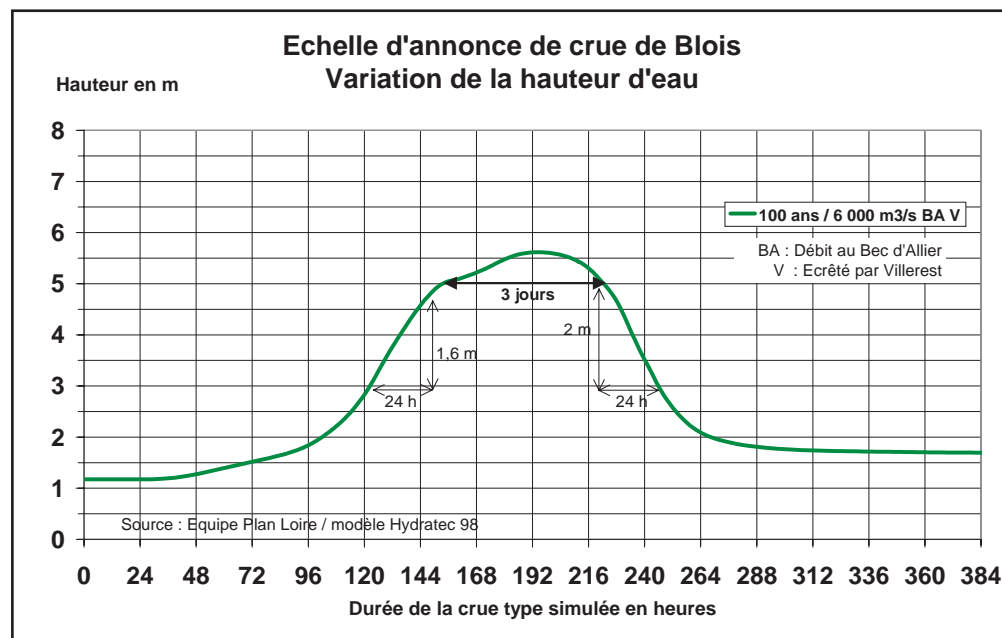
Pour des casiers de 1 à 2 km de long, on a donc une unique valeur de niveau d'eau, ce qui est cohérent lorsqu'il s'agit de casiers inondés par remous, et qui ne coulent donc pas, mais qui ne l'est plus lorsqu'une partie du débit de la crue s'écoule dans le val.

La pente naturelle du val est en effet identique à la pente de la Loire, comprise entre 20 et 50 cm/km selon les secteurs. Pour un casier long de 2 km, la différence de niveau d'eau entre l'amont et l'aval peut donc varier, dans la réalité, de 40 cm à 1 m. Par rapport au niveau moyen calculé par le modèle, l'erreur peut donc atteindre plus ou moins 50 cm, d'où une précision des résultats du modèle dans les casiers de l'ordre de 50 cm.

Résultat exploité dans l'atlas : évolution de la hauteur d'eau en fonction du temps

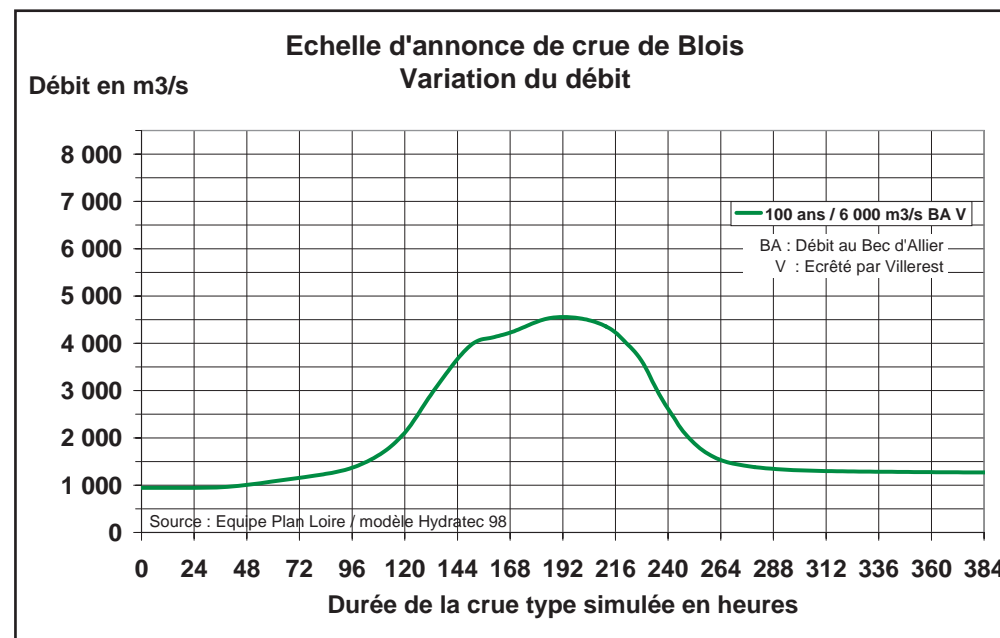
Ces courbes permettent d'analyser l'évolution de la crue en un lieu précis. Elles donnent la vitesse de montée et de descente des eaux et le nombre de jours où le niveau se maintient au-dessus d'un niveau donné.

Par exemple, pour la crue centennale à Blois, la vitesse de montée des eaux est de 7 cm/heure à partir de 3 m à l'échelle ; la hauteur à l'échelle se maintient pendant 3 jours au-dessus de 5 m et atteint un maximum de 5,6 m ; et la vitesse de la décrue est de l'ordre de 8 cm/heure lorsque la hauteur à l'échelle passe sous les 5 m.



Résultat exploité dans l'atlas : évolution du débit en fonction du temps

Ces courbes décrivent le passage du débit, avec une pointe plus ou moins étalée dans le temps, et donnent le maximum atteint en un point donné.

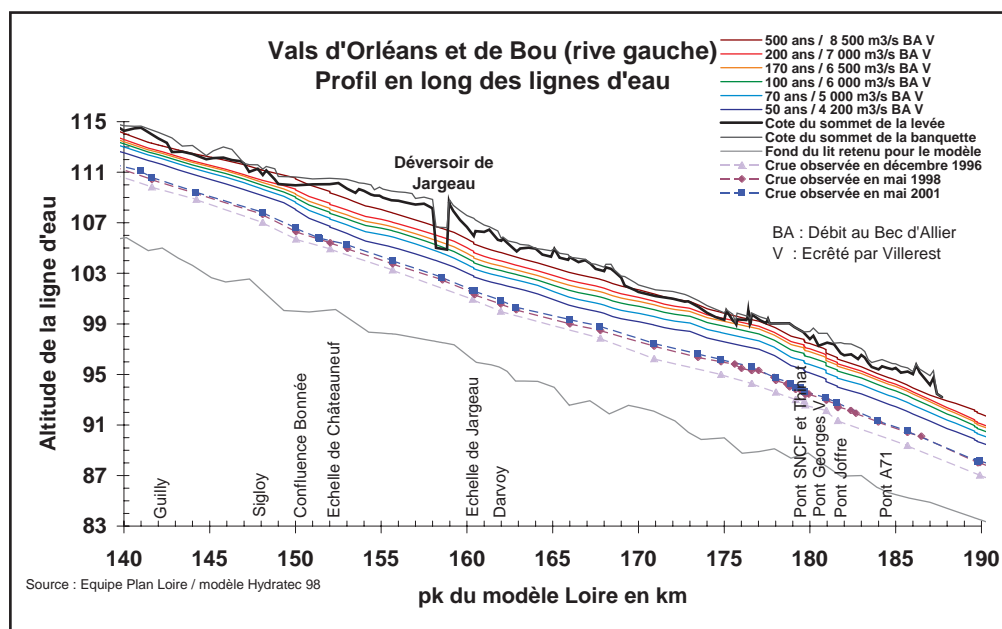


Résultat exploité dans l'atlas : profil en long de la ligne d'eau

Les profils en long exploités sont ceux de la ligne d'eau maximale. Il s'agit de graphiques donnant, en fonction du PK, le niveau maximum calculé par le modèle au cours de la simulation. Il s'agit donc de lignes d'eau artificielles qui ne correspondent pas à une ligne d'eau observée à un moment donné puisque la Loire ne sera jamais à son maximum partout en même temps.

L'analyse des profils en long de la ligne d'eau maximale permet de repérer les secteurs sensibles caractérisés par des revanches faibles, par un appui de la ligne d'eau sur la banquette ou par des surverses par-dessus la levée ou la banquette.

L'analyse des lignes d'eau apporte également des renseignements sur la morphologie de la Loire : des lignes d'eau rapprochées les unes des autres sont le signe d'un lit majeur large tandis que des lignes d'eau écartées les unes des autres traduisent un encaissement du lit.



La diminution de la pente de la ligne d'eau résulte soit d'une diminution de la pente de la Loire, soit d'une obstruction à l'écoulement due par exemple à la présence d'un pont, d'un rétrécissement du lit, ou d'un secteur particulièrement resserré ou encombré.

Par exemple, l'analyse du profil en long de la Loire le long du val d'Orléans permet de mettre en avant les points suivants :

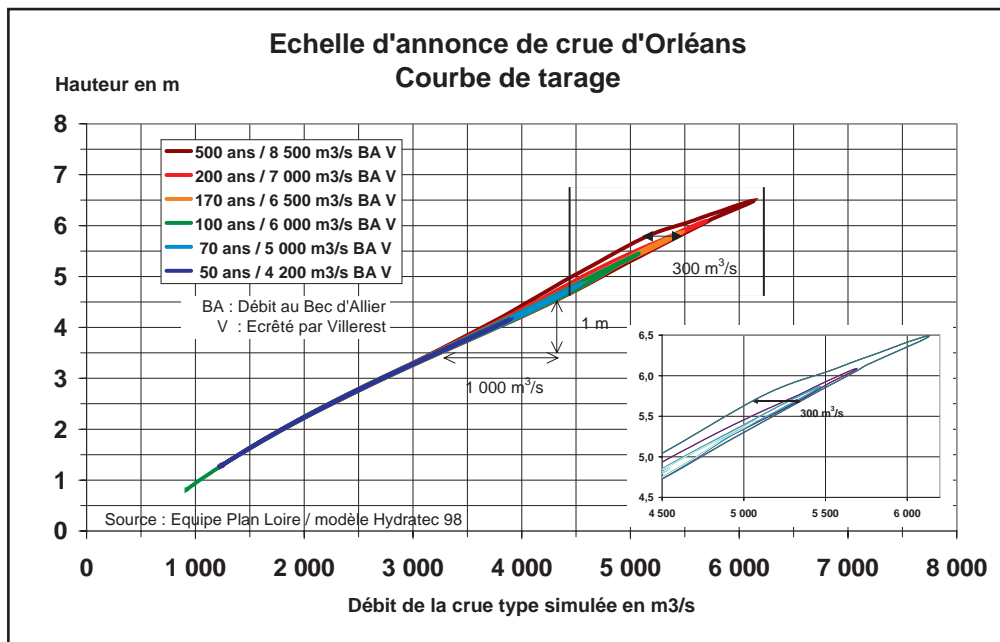
- Revanches, les appuis et les surverses.

Le profil en long fait apparaître des zones où la revanche (différence de niveau entre le sommet de la levée et la ligne d'eau) est importante (PK 150 à 170), où la Loire s'appuie sur la banquette de la levée (PK 145 - 150 et 173 - 178) et où des surverses par-dessus la banquette ont lieu (PK 175).

- Pente de la ligne d'eau.

Les gonflements (diminution de la pente) de la ligne d'eau au niveau de Sigloy (PK 149), entre Châteauneuf et Jargeau (PK 155) et en amont d'Orléans (PK 173) sont dus au rétrécissement du lit endigué et à son encombrement par des îles et d'anciens ouvrages de navigation, qui contraignent la ligne d'eau à monter pour faire s'écouler le débit dans ces secteurs.

La pente de la ligne d'eau augmente ensuite dans la traversée d'Orléans qui est une zone dégagée d'îles et de bancs de sable, peu végétalisée. La Loire peut donc y couler avec des vitesses importantes, ce qui a pour conséquence d'augmenter la pente de la ligne d'eau malgré la présence des ponts qui ne semblent pas contraindre l'écoulement, même s'ils provoquent des pertes de charge sensibles.



Résultat exploité dans l'atlas : courbe de tarage

Le modèle a permis de calculer des courbes de tarage au droit des échelles de crue. Il s'agit de courbes qui donnent la relation entre le débit en Loire et la hauteur lue sur l'échelle.

Usuellement, ces courbes sont construites à partir de jaugeages (mesures de débit du fleuve à l'aide d'un moulinet) réalisées simultanément avec une lecture du niveau d'eau aux échelles hydrologiques. Elles sont réalisées par la DIREN de Bassin et servent à estimer les débits de la Loire en fonction des niveaux d'eau. Elles permettent théoriquement de suivre le déroulement de la crue et en particulier de détecter le passage du maximum de manière à mettre en place les moyens adaptés pour les secteurs situés en aval (par exemple des fermetures de routes, des protections locales aux interruptions de banquettes, voire des évacuations de personnes).

Les courbes de tarage obtenues avec le modèle mettent en avant la difficulté d'estimer le débit en temps réel lors des crues. En effet, toutes les courbes présentent un phénomène d'hystérésis, c'est-à-dire que pour un même débit, le niveau d'eau est plus haut à la descente de la crue qu'à la montée. Ce phénomène, plus ou moins marqué selon les échelles, implique également que le maximum de débit passe en réalité avant qu'on observe la hauteur maximale à l'échelle.

A l'échelle d'Orléans, une augmentation de 1 m d'eau représente un débit supplémentaire en Loire de 1 000 m³/s au-delà de 2,5 m à l'échelle.

Il est parfois difficile de faire une lecture précise de la hauteur à l'échelle pendant la crue à cause des mauvaises conditions climatiques et des oscillations de la Loire lorsque s'écoulent de forts débits. La courbe de tarage de l'échelle d'Orléans indique qu'une incertitude de 15 cm sur la mesure de la hauteur se traduit par une incertitude sur le débit inférieure à 150 m³/s.

Le phénomène d'hystérésis est assez peu prononcé jusqu'à la crue deux-centennale. Pour la crue cinq-centennale, pour une même hauteur à l'échelle d'Orléans, il peut y avoir une différence de 300 m³/s entre la montée et la descente de la crue, ce qui montre la difficulté, pendant la crue de détecter le passage de la pointe de la crue, et surtout de quantifier le débit maximum passé au droit de l'échelle.

Résultats dans les casiers

Dans les casiers, le modèle fait à chaque pas de temps le bilan des quantités d'eau qui sont entrées et sorties du casier par les différentes liaisons et en déduit le volume d'eau dans le casier au temps t.

Le casier est défini par une loi de remplissage reliant le pourcentage de la surface du casier inondée et la cote d'inondation. Le modèle déduit de cette loi et du volume d'eau dans le casier la cote d'inondation sur toute la superficie du casier à chaque instant.

La cote maximale d'inondation correspond à la valeur maximale qu'atteint cette cote au cours de la simulation.

La hauteur moyenne maximale dans le casier correspond à la différence entre la cote d'eau maximale calculée dans le casier et la hauteur moyenne du fond du casier.

Autres résultats

En plus de ces résultats, le modèle calcule également, à chaque instant et en tout point du filaire, d'autres grandeurs physiques telles que le rayon hydraulique, la vitesse moyenne sur une section dans le lit mineur et le lit majeur, et la section mouillée.

Ces grandeurs ne sont pas directement exploitées dans l'atlas.

Ce que le modèle ne simule pas

Plusieurs facteurs d'aggravation de l'inondation ne sont pas simulés par le modèle. Il s'agit :

- **Des effets du vent.** Le vent, en soufflant fortement sur un plan d'eau, forme des vagues dont la hauteur dépend à la fois du fetch, c'est-à-dire la distance sur laquelle le vent souffle dans la même direction, de la vitesse du vent, et de la durée pendant laquelle il souffle. Un fort vent d'ouest sur des longueurs droites de fleuve de 20 kilomètres, le long du val de Cisse par exemple, peut ainsi rehausser les niveaux d'eau en amont de la zone de 20 centimètres en créant des vagues qui remonteraient le cours de la Loire de Vouvray à Chaumont.
- **Des rehausses dans les courbures.** Dans les virages de la Loire, les hauteurs d'eau peuvent être localement plus importantes que celles calculées par le modèle à cause de la surélévation de la ligne d'eau à l'extérieur de la courbe sous l'effet de la force centrifuge. Les hauteurs peuvent ainsi être augmentées de 10 cm environ pour des crues fortes dans les virages serrés de la Loire.
- **Des brèches accidentelles.** Le modèle ne prend en compte que les brèches par surverse. Dans la réalité, d'autres facteurs sont susceptibles de déclencher l'ouverture de brèches accidentelles dans la levée : le phénomène de renard hydraulique, l'érosion du pied de levée, la déstabilisation par circulation d'eau en fondation, ou encore d'autres fragilités internes des levées qui n'ont pas toutes été renforcées.
- **Des remontées de la nappe alluviale.** Plusieurs vals qui, selon le modèle, ne seraient pas inondés par surverse par-dessus la levée de protection pour des crues fortes sont cependant exposés à des phénomènes de remontée de nappe.
- **Des embâcles de végétaux.** Certaines levées portent suffisamment de végétation sur leur parement ou à leur pied pour bloquer des corps flottants à la dérive et provoquer un embâcle végétal qui pourrait éventuellement induire des zones d'écoulement tourbillonnaire susceptibles d'endommager la levée, voire de provoquer des brèches.
- **Des embâcles aux ponts.** Un embâcle au niveau d'un pont ancien de la Loire pourrait créer une perte de charge locale importante avec pour conséquences une hausse du niveau en Loire en amont du pont et un risque de débordement accru si la revanche n'était pas suffisante. Le site le plus exposé à ce risque est le pont de Beaugency.

La modélisation donne seulement une image de l'inondation prévisible. L'utilisation des résultats n'a de sens que si on considère qu'un certain nombre de facteurs aggravants sont susceptibles de se produire.

Calage et qualité du modèle Hydra 1998

Les résultats du calage du modèle Loire moyenne

L'étude des différents scénarios de crue pour évaluer dans quelles conditions hydrologiques et hydrauliques le territoire Loire Moyenne est susceptible d'être inondé, est menée à l'aide du modèle numérique de propagation des crues de la Loire entre Nevers et Montjean - modèle "Loire moyenne" - établi par HYDRATEC pour le compte de l'Etat, de l'Epala et de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne.

Le modèle Loire moyenne est construit à partir d'une topographie précise de 1995, définie, pour le lit du fleuve, par un profil en travers de Loire tous les kilomètres, et, pour les vals, par la cartographie existante, principalement les cartes de l'Institut géographique national au 1/25 000ème.

Ce travail minutieux s'est réalisé en concertation avec les gestionnaires du fleuve et les élus riverains.

Le calage du modèle a consisté à retrouver, par le calcul et avec la plus grande précision possible, les niveaux d'eau observés sur le terrain par la Diren de Bassin pour les crues de novembre 1992, janvier 1994, mai et décembre 1996. Le modèle est capable de bien reproduire la réalité pour ces crues puisqu'il restitue, à plus ou moins 15 centimètres, 87% des 300 niveaux observés par les services de l'Etat lors de ces quatre crues.

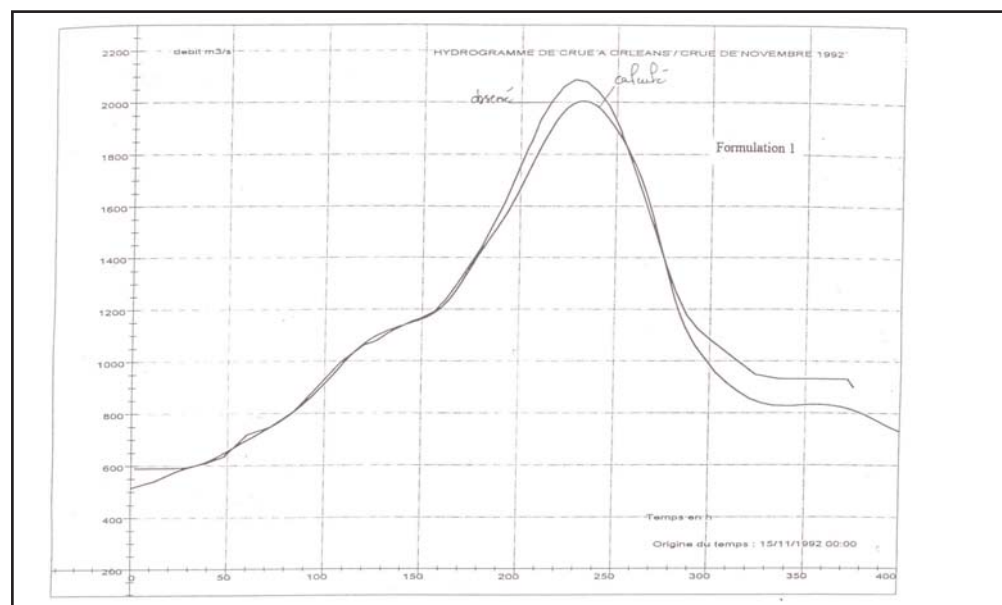
Le calage du modèle consiste à faire varier les coefficients de rugosité caractérisant les berges et le fond de la Loire autour des valeurs classiques représentatives de ce type de rivière jusqu'à retrouver, par le calcul, les cotes observées pour les quatre crues, dites "crues de calage".

C'est une étape très importante car de sa réalisation dépend le droit d'utiliser le modèle pour établir le diagnostic.

Les différentes étapes du calage

Les différentes opérations enchaînées pour réaliser le calage du modèle après sa construction sont :

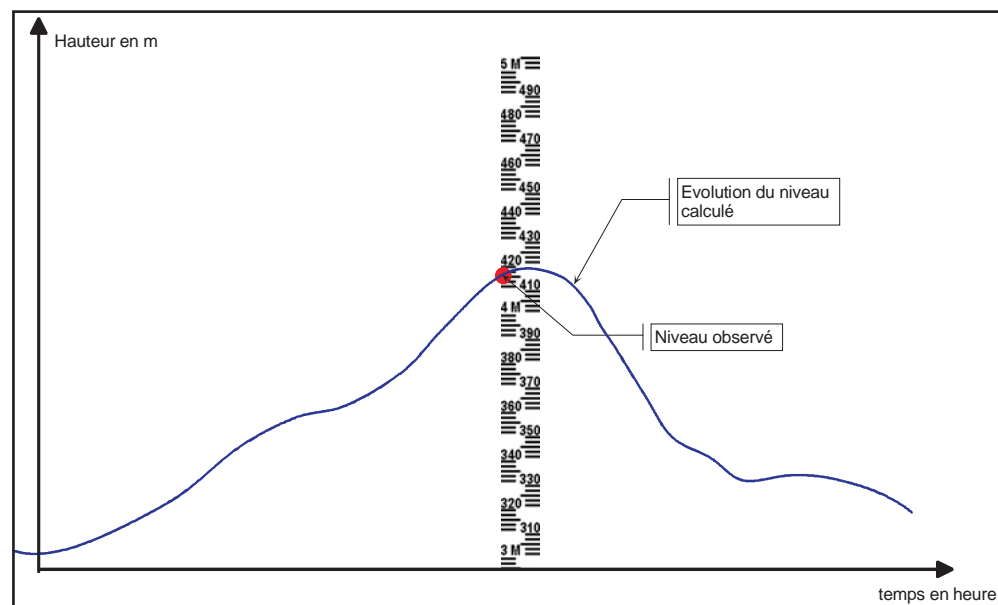
- Reconstituer les apports de la Loire et de ses affluents pendant les crues retenues pour le calage - à injecter en tête des filaires du modèle Loire moyenne pour simuler les crues. Cette reconstitution de l'hydrologie est menée à partir des mesures de niveaux d'eau aux stations hydrologiques de la Loire : Givry, Belleville, Gien, Dampierre, Orléans, Blois, Tours, Langeais, Chinon, Saumur, Ponts de Cé et Montjean et de leurs courbes de tarage construites à partir des jaugeages.
- Simuler la propagation de chaque crue avec pour objectif la définition des rugosités moyennes à mettre en place pour respecter les temps de propagation et l'évolution de la forme de la crue le long de la Loire moyenne. Ce travail compare les hydrogrammes mesurés aux hydrogrammes calculés par le modèle. Un exemple pour la crue de novembre 1992 à l'échelle d'Orléans : la première courbe correspond aux mesures réalisées par les services de l'Etat et la seconde est calculée par le modèle.



- Simuler la propagation pour affiner localement les rugosités de façon à retrouver par le calcul les niveaux d'eau observés par les Services Techniques de l'Etat pendant la crue.

Un exemple de comparaison d'un niveau observé à une échelle et de l'évolution des niveaux calculés par le modèle.

Ici, le niveau observé ne correspond pas toujours au passage de la pointe de crue.



Nature, compréhension et effet du calage

Deux types d'analyse hydraulique peuvent être conduits avec un modèle de simulation des écoulements :

Dans l'**analyse en mode absolu**, le calcul donne des niveaux d'eau qui sont comparés à des niveaux relevés sur les différents sites : les niveaux d'eau calculés par le modèle déclenchent plusieurs mécanismes : fonctionnement des déversoirs, formation de brèches suite à une surverse.... Le calage est donc très important pour décrire correctement les mécanismes d'inondations en Loire en fonction de la période de retour.

L'**analyse en mode relatif** s'intéresse aux modifications de niveaux d'eau, de débits et de vitesses générées par une hypothèse d'aménagement. L'analyse des différentes politiques d'entretien a été réalisée suivant ce mode. Les hypothèses d'entretien (de référence, entretien maximum ou dégradés) sont traduites par une modification du modèle.

Les différents tests sont comparés à la situation de référence, l'impact sur la ligne d'eau de chacun des tests peut être étudié. Dans ce cas, le calage est moins important puisqu'il s'agit d'une comparaison entre deux états.

Les incertitudes liées aux méthodes d'acquisition des données de calage

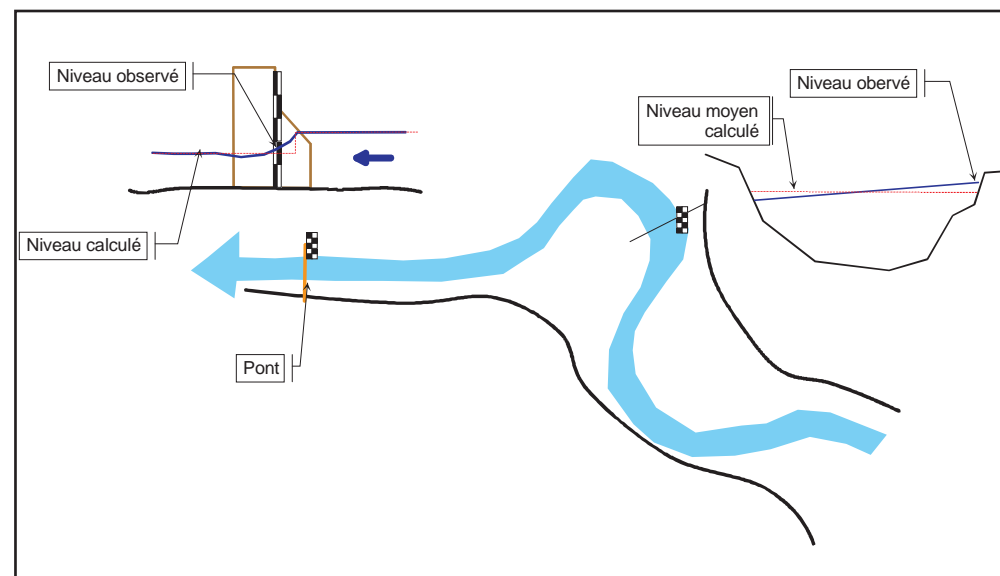
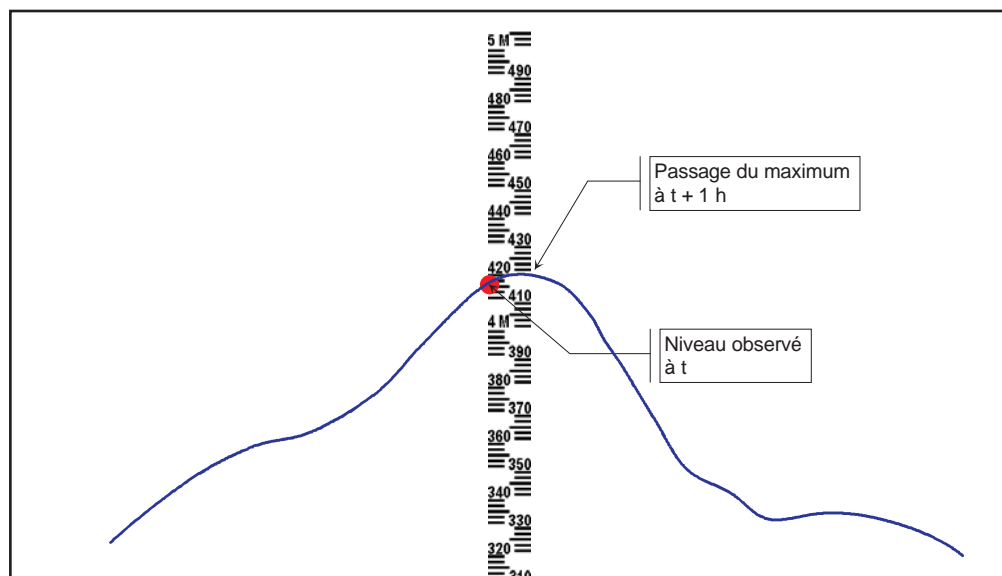
Les incertitudes sur la connaissance des débits de crue écoulés, sur le moment de lecture et sur la lecture elle-même des échelles de crue du fait de conditions expérimentales difficiles, font que le calage n'est jamais parfait.

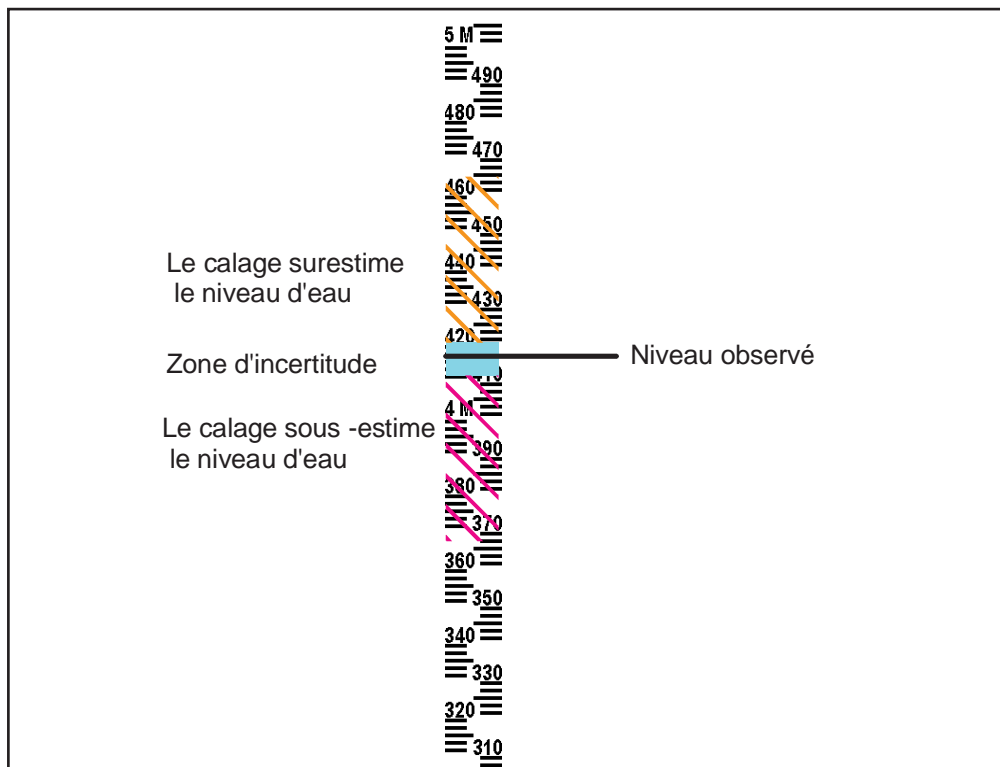
Les incertitudes engendrent les imprécisions suivantes :

- L'incertitude sur l'hydrologie : la reconstitution des débits aux échelles à partir des observations de niveaux par l'intermédiaire des courbes de tarage engendre des imprécisions sur les débits injectés dans le modèle.
- l'incertitude sur le moment de la lecture (la lecture de l'échelle n'a pas lieu au moment du passage du maximum) et la difficulté de lecture (vagues, nuit, accessibilité de l'échelle...) induisent une imprécision sur les niveaux mesurés.
- l'incertitude liée à la position de l'échelle : les échelles situées dans l'extrados d'une courbe ou dans le remous d'un pont induisent une surcote qui n'est pas prise en compte dans le modèle.

Il n'est pas nécessaire de chercher à caler le modèle avec une précision plus fine que l'intervalle

[+15 cm ; -15 cm]. Cela reflèterait une précision illusoire qui ne correspond pas à la réalité.





Précision du calage

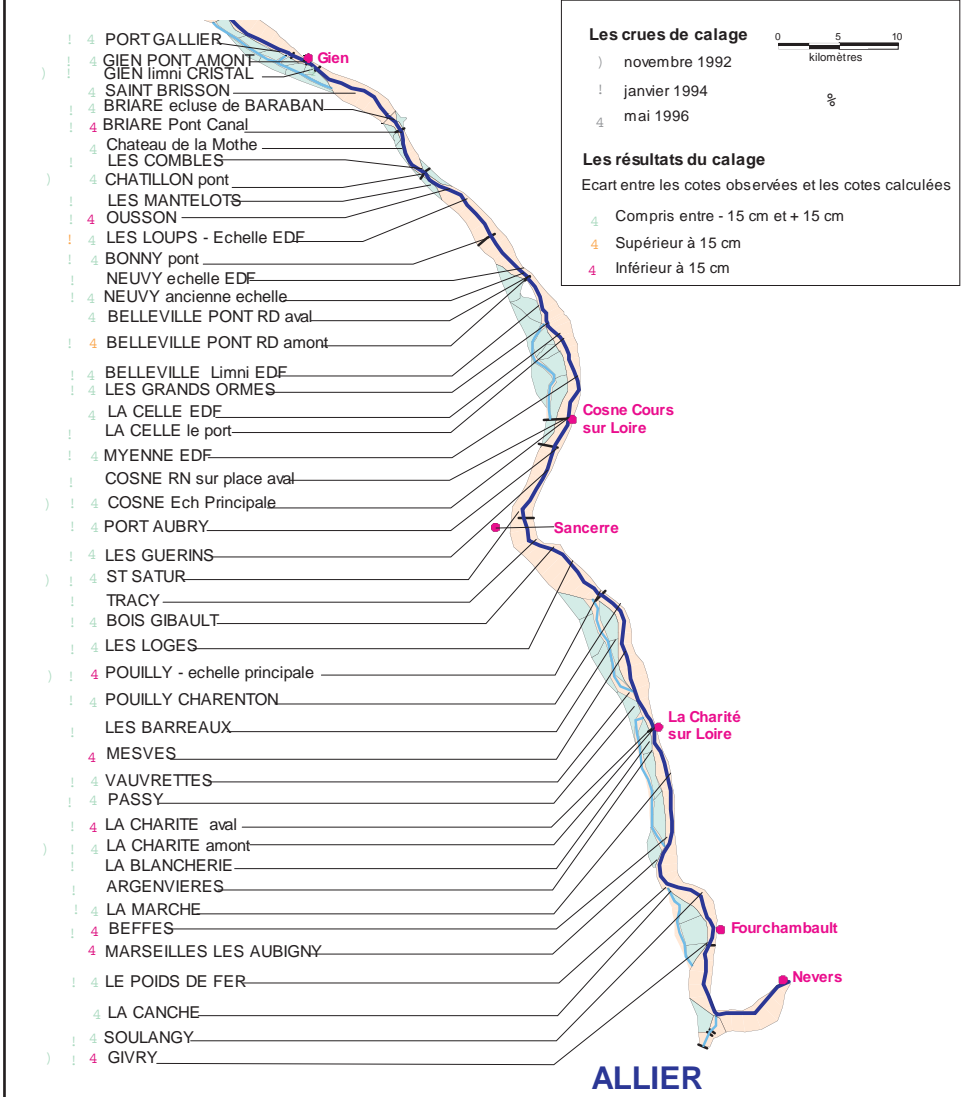
Carte des résultats du calage

Les cartes de résultats de calage indiquent pour les trois crues de calage :

- en vert les points dont l'écart entre la cote observée et la cote calculée est compris dans l'intervalle -15 cm ; $+15 \text{ cm}$; Pour ces points le calage est satisfaisant et la précision dans ce secteur est bonne,
- en orange, les points dont l'écart entre la cote observée et la cote calculée est inférieur à 15 cm . Dans ce secteur le modèle a tendance à surestimer la ligne d'eau par rapport à la réalité : les risques de surverses sont plutôt surestimés.
- en violet, les points dont l'écart entre la cote observée et la cote calculée est supérieur à 15 cm . Dans ce secteur le modèle a tendance à sous-estimer la ligne d'eau et donc les phénomènes d'inondation par rapport à la réalité. Les points concernés sont très localisés. Ils se situent à l'amont entre Givry et Pouilly et à l'aval entre St Mathurin et Montjean.

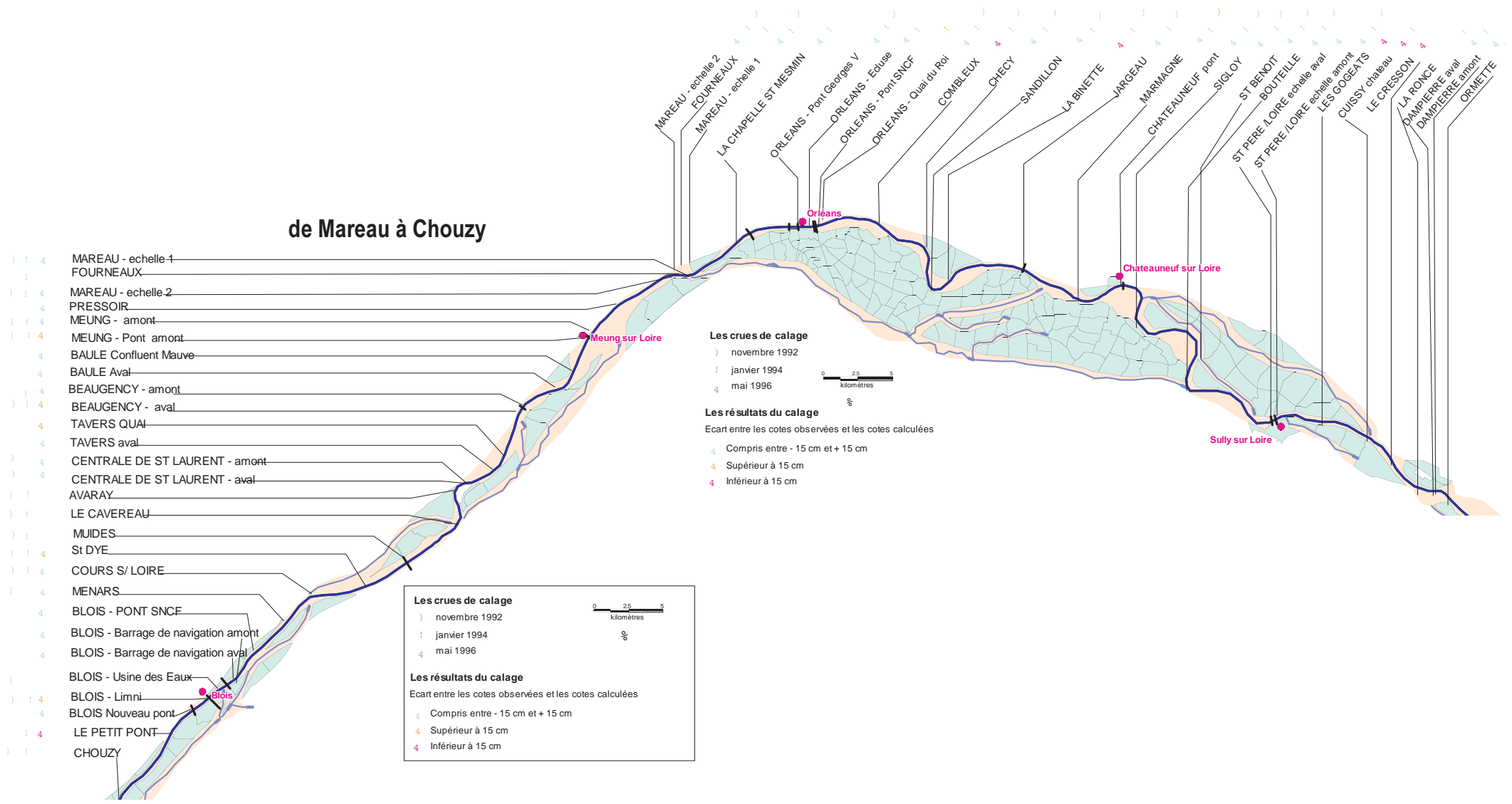
Le calage du modèle Loire moyenne est tout à fait satisfaisant puisqu'il restitue 87% des niveaux observés à plus ou moins 15 centimètres, seul 7 % des niveaux calculés sont inférieurs à ceux observés. Le modèle est bien adapté à la problématique Loire moyenne et répond aux objectifs fixés par le comité technique pour décrire l'écoulement en Loire moyenne.

Le Calage du modèle et sa qualité de Givry à Gien

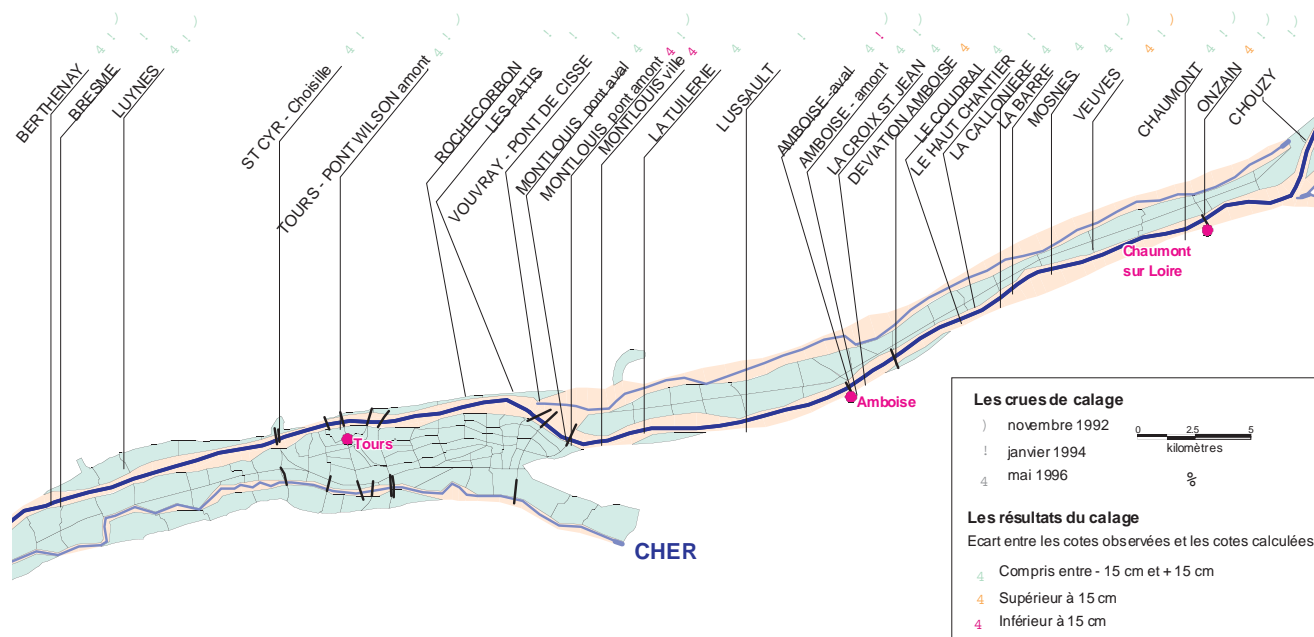


Le calage du modèle et sa qualité de Dampierre à Mareau

de Mareau à Chouzy



Le calage du modèle et sa qualité de Chouzy à Berthenay



Le calage du modèle et sa qualité de Berthenay à Montjean

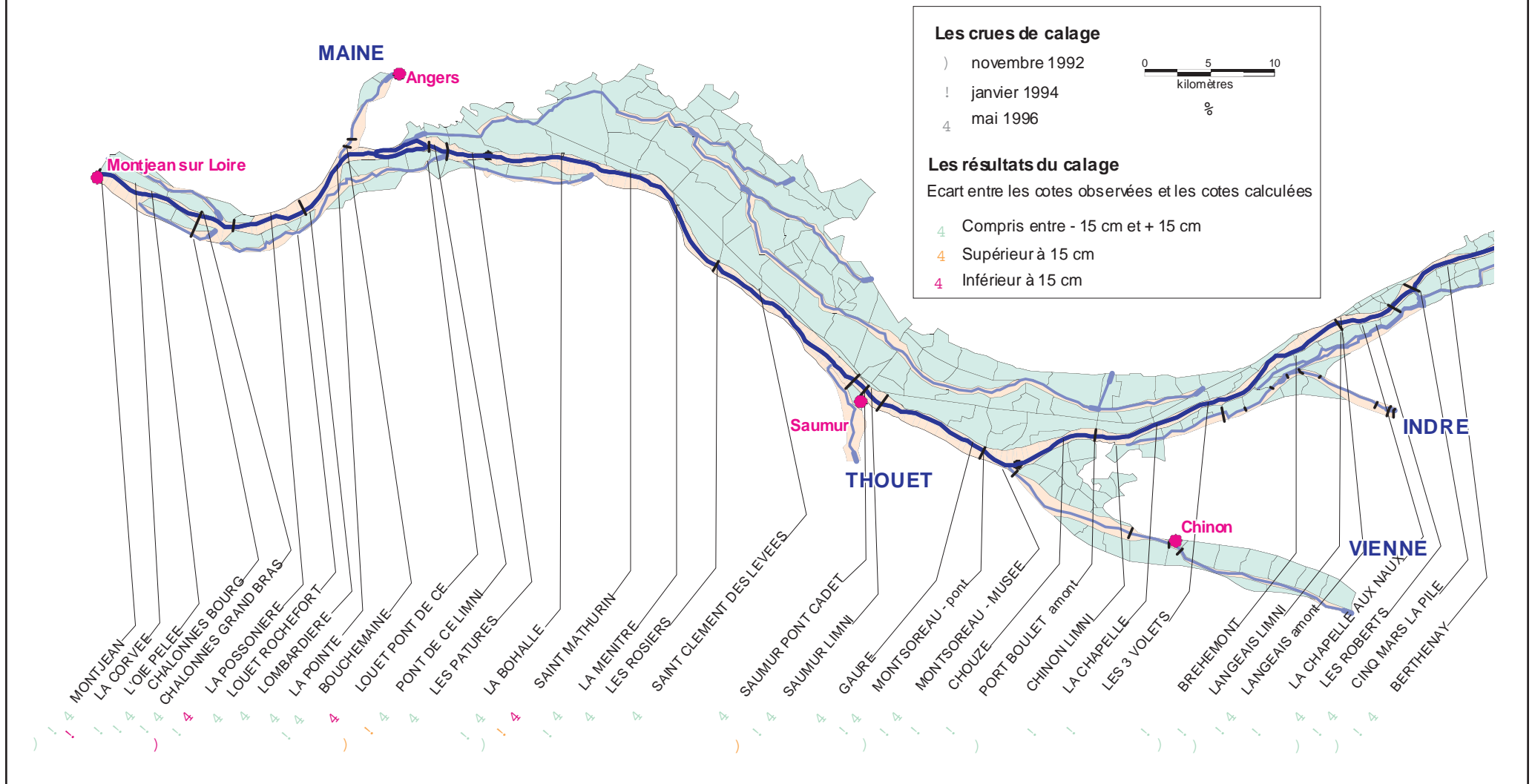


Tableau des résultats

Sur certains sites, il existe une difficulté de caler correctement les crues de calage : il s'agit de secteurs où il est nécessaire de prendre les résultats avec précaution.

Les tableaux suivants listent, pour chaque crue de calage, les échelles pour lesquelles l'écart entre la cote observée et la cote calculée est différent de l'intervalle [-15 cm ; 15 cm]. Il s'agit de secteurs où le modèle a tendance à surestimer ou à sous-estimer (cases grisées) les résultats.

Crue de 1992		
Echelle	PK modèle	Ecart Cote observée – Cote calculée cm
MARMAGNE	155.65	0.19
VEUVES	262.41	0.21
SAUMUR LIMNI	363.50	0.32
PONT DE CE LIMNI	404.50	0.18
LA POSSONIERE	419.35	-0.19

Crue de 1994		
Echelle	PK modèle	Ecart Cote observée – Cote calculée
LES LOUPS - Echelle EDF	89.70	0.20
ORLEANS - Pont SNCF	179.64	0.29
AMBOISE -aval	275.00	-0.16
SAINT MATHURIN pont	388.75	0.16
PONT DE CE LIMNI	404.50	0.30
LA CORVEE	431.90	-0.19

Crue de 1996		
Echelle	PK modèle	Ecart Cote observée – Cote calculée
GIVRY	13.78	-0.26
MARSEILLES LES AUBIGNY	23.36	-0.31
BEFFES	25.32	-0.32
LA CHARITE aval	35.15	-0.25
MESVES	42.36	-0.27
POUILLY - echelle principale	48.36	-0.27
BELLEVILLE PONT RD amont	81.09	0.32
OUSSON	91.60	-0.18
BRIARE Pont Canal	98.35	-0.18
l'ORMETTE	116.00	0.21
LE CRESSON	121.50	-0.17
CUISSY chateau	124.20	-0.27
LES GOGATS	128.00	-0.20
LA BINETTE	165.97	-0.22
MEUNG - Pont amont	199.00	0.41
BEAUGENCY - aval	206.64	0.30
TAVERS QUAI	210.24	0.19
St DYE	225.75	0.17
BLOIS - Limni	240.51	0.33
LE PETIT PONT	244.10	-0.25
ONZAIN	257.13	0.22
VEUVES	262.41	0.28
DEVIATION AMBOISE	272.36	0.27
MONTLOUIS ville	286.57	-0.17
MONTLOUIS pont amont	287.70	-0.18
SAINT MATHURIN pont	388.75	-0.25
LA POSSONIERE	419.35	-0.33
LOUET PONT DE CE	1.48	-0.18

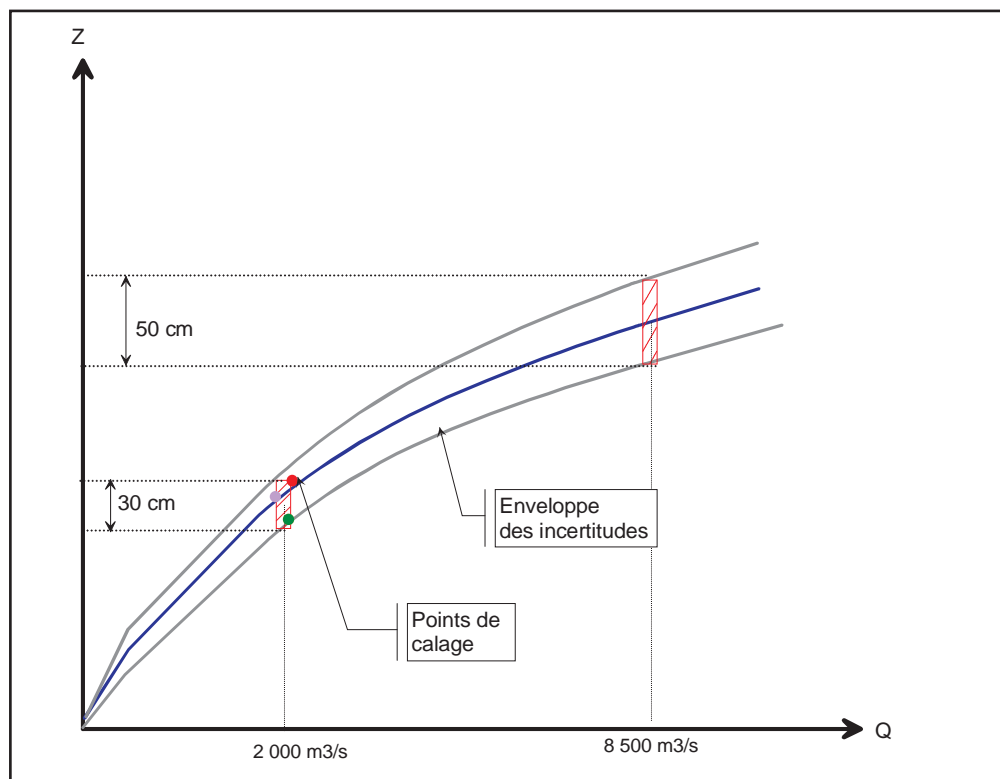
Précision des résultats de l'étude Loire moyenne

Exploitation des résultats en mode absolu

Pour les crues de calage, la précision des résultats du modèle Loire moyenne se situe dans l'intervalle [-15 cm ; +15 cm]. Le débit de ces crues est de l'ordre de 1 800 m³/s à 2 000 m³/s à Givry.

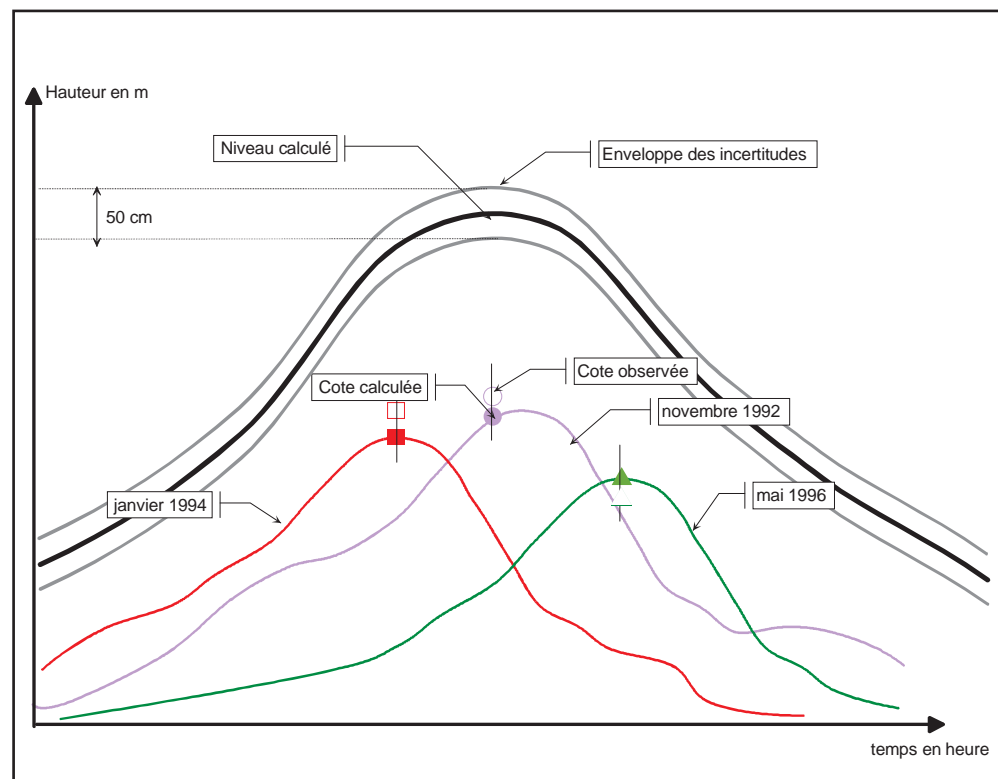
L'enveloppe des incertitudes est reportée sur une courbe de tarage :

- au débit de calage de 2 000 m³/s, l'incertitude est de 30 cm;
- pour les crues fortes étudiées (débit compris entre 4 200 m³/s et 8 000 m³/s au Bec d'Allier), l'extrapolation selon la courbe de tarage fournit une incertitude de 50 cm.



Dans l'exploitation des résultats du modèle, cela signifie qu'un niveau d'eau calculé de 40,50 m par le modèle serait dans la réalité compris entre 40,25 m et 40,75 m.

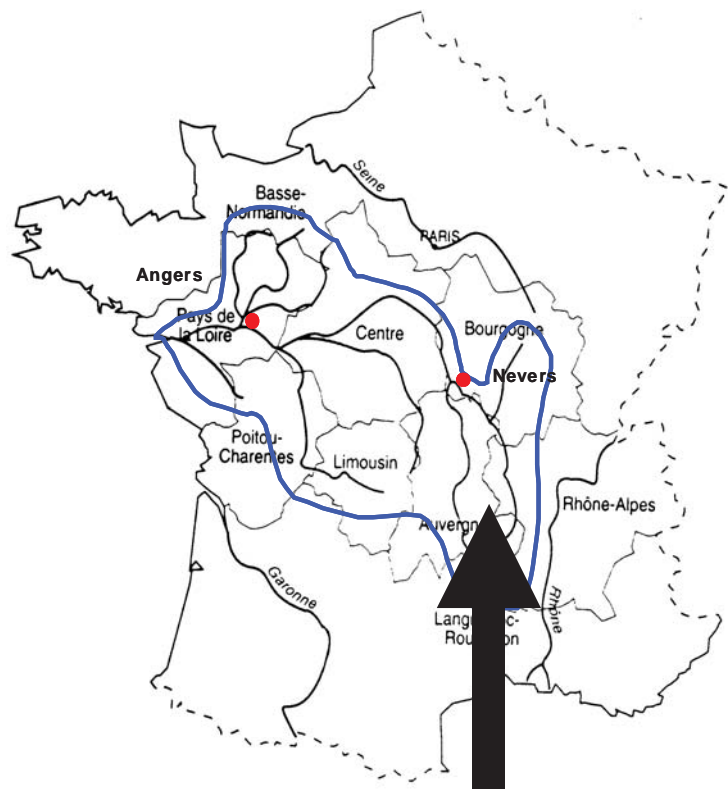
A titre d'illustration, le schéma ci-dessous représente le limnigramme résultant des calculs, et l'enveloppe d'incertitude, dans lequel le niveau réel se situe.



Exploitation des résultats en mode de calcul relatif

En mode de calcul relatif, les résultats du modèle sont très fiables. Il a ainsi été possible de simuler des scénarios d'entretien et d'aménagements et d'en évaluer les impacts à la fois localement et à l'échelle de toute la Loire moyenne en fonction de différentes crues.

Hydrologie de crue dans le modèle Hydra 1998



La Loire en crue

La Loire et ses affluents drainent 1/5ème du territoire français. Le fleuve voit varier très fortement son débit de 11 m³/s pendant l'été à Gien en 1949 à 7000 m³/s estimés en 1856 et 1866 dans cette même ville.

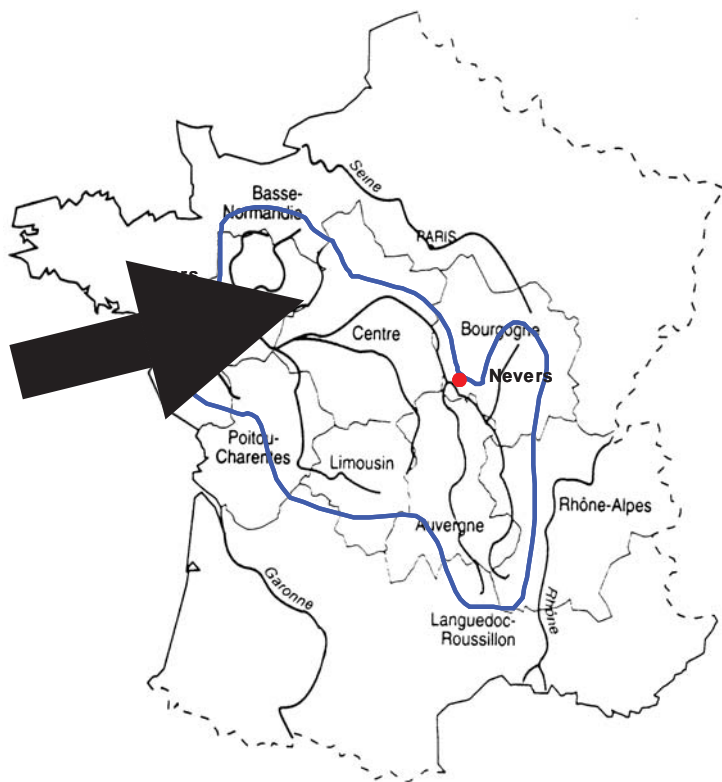
Des volcans du Massif Central aux marais de la Grande Brière, les climats sont très contrastés. Ils engendrent trois types de crues : les crues cévenoles, les crues océaniques et les crues mixtes

Les crues cévenoles, type 1980, 1996 : provoquées par des orages violents et brusques, elles se localisent dans le haut bassin de la Loire et de l'Allier.

Des masses d'air chaud franchissent la Méditerranée et se gorgent d'eau. Elles viennent buter sur les Cévennes. Elles dépassent les Cévennes et restent bloquées par les Alpes. Il tombe 200 à 600 mm de pluie en 48 heures. Toutefois, c'est une crue faible qui arrive en Loire moyenne.

Les crues océaniques, type 1982, 1995, 1998 : dues à de longues périodes de pluies océaniques, elles s'installent surtout à l'Ouest et au Nord du bassin versant.

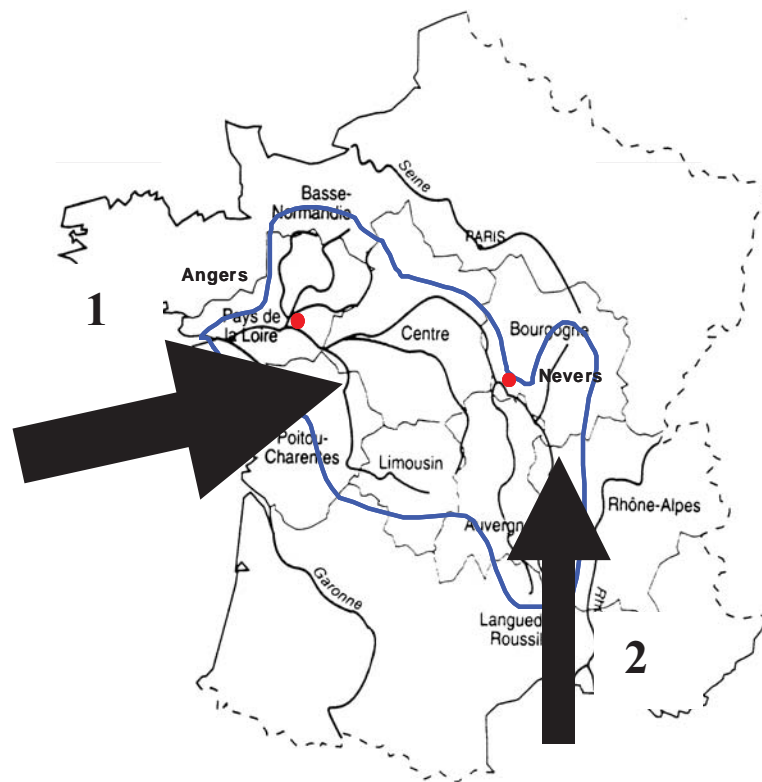
A l'origine, une suite de dépressions vient de l'Atlantique. En passant au Sud elle provoque une crue sur la Vienne, puis le Cher comme en décembre 1982. Elle peut aller jusqu'à l'Allier puis la Loire. Pour ce type d'évènements, la pointe de crue de la Loire passe après celle de la Vienne.

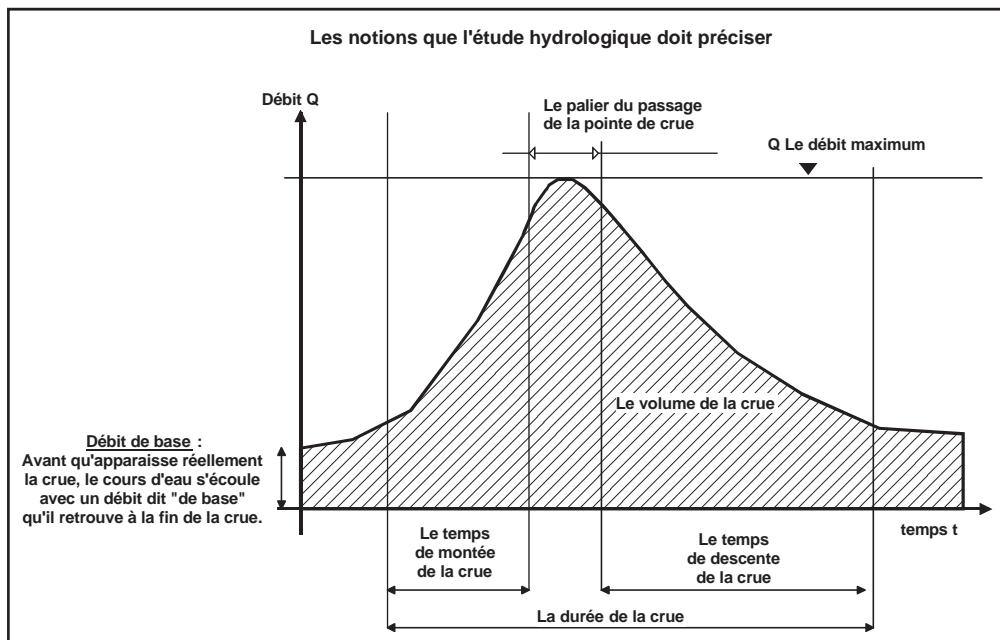


Les crues mixtes, type 1846, 1856, 1866, 1907 : ce sont les crues les plus fortes en Loire moyenne. Elles proviennent de la conjonction des deux types d'évènements. Elles ont lieu en mai-juin ou en octobre - novembre, voire exceptionnellement fin septembre.

Des pluies océaniques touchent tout le bassin, y compris le Nord du haut-bassin. Une petite crue océanique généralisée apparaît. Un orage cévenol survient sur le haut-bassin et provoque une crue qui "surfe" sur la crue océanique.

Pour ces évènements forts, les crues de l'Allier et de la Loire au Bec d'Allier sont généralement concomitantes à quelques 10 heures près.





Le rôle et l'objet de l'étude hydrologique "Loire moyenne"

L'étude hydrologique "Loire moyenne" a pour objet de définir les hypothèses d'alimentation en eau du modèle Loire moyenne - construit et calé par hydratec pour le compte de l'Etat, de l'Epala et de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne - pour simuler la propagation des crues et pour évaluer dans quelles conditions hydrologiques et hydrauliques, le territoire Loire moyenne est susceptible d'être inondé.

Ces hypothèses sont très importantes : elles servent à caractériser la fréquence d'apparition des différents mécanismes d'inondation incluant l'inondation des communes riveraines de la Loire, celle des vals par remous, le fonctionnement des déversoirs, le déclenchement des fusibles pour les déversoirs qui en sont équipés, la rupture de levées suite à leur submersion, etc.

La connaissance du déroulement des crues anciennes nous indique que tous ces phénomènes ne se produisent pas au même moment dans la progression de la crue et que leur réalisation dépend de l'importance de la crue. C'est la raison pour laquelle le modèle de simulation est utilisé en régime transitoire simulant successivement la mise en eau du lit et des vals, le passage de la pointe de crue et la descente des niveaux d'eau jusqu'à la fin de la crue.

Dans la pratique, pour alimenter le modèle, il faut définir, à chaque point d'injection du modèle de simulation, un hydrogramme représentant l'évolution des débits entrant dans le modèle en fonction du temps et en fonction de la période de retour. Chaque hydrogramme mesure la forme et l'importance de l'apport : temps de montée, débit au passage de la pointe de crue et forme de la pointe, temps de descente et, implicitement, volume d'eau que cela représente.

Avec ces données d'entrée, le modèle calcule, non seulement le déroulement de la crue en tout point donné de la Loire moyenne (pk modèle), mais encore son évolution du Bec d'Allier jusqu'à Montjean et évalue :

- Les délais d'apparition des atteintes, leur importance et leur durée,
- L'écrêtement de la pointe de crue consécutive à l'inondation des territoires, au fur et à mesure de sa progression vers l'aval et son renforcement suite aux arrivées des affluents de la Loire.

Une hydrologie validée par un groupe d'experts

Les phénomènes physiques, simulés par le modèle lorsqu'il est mis en eau, représentent l'évolution de l'aléa au cours du temps. Ils servent de base pour caractériser la sollicitation des enjeux humains et socio-économiques en Loire moyenne, c'est dire l'importance des hypothèses hydrologiques.

C'est pourquoi le Comité Technique de l'étude Loire moyenne a mis en place un groupe d'experts en hydrologie pour accompagner puis valider la démarche de définition des apports.

Le groupe d'experts a validé la quantification des débits variables en fonction du temps injectés dans le modèle de façon à disposer de scénarios cohérents avec les scénarios déjà utilisés dans les études antérieures, principalement ceux représentant la crue de 1866 en tenant compte aussi des particularités de la crue de 1866, et de décliner ces scénarios en fonction de la période de retour.

Des études hydrologiques spécifiques ont montré le caractère exceptionnel de la forme de la crue de 1856 (très fort débit de pointe et relativement faible volume dans la partie supérieure de l'hydrogramme), la forme plausible pour les crues très fortes étant plutôt celles de la crue de 1866 et de 1907 (fort débit de pointe et important volume).

Quelques constats pour mesurer les enjeux de l'étude hydrologique "Loire moyenne"

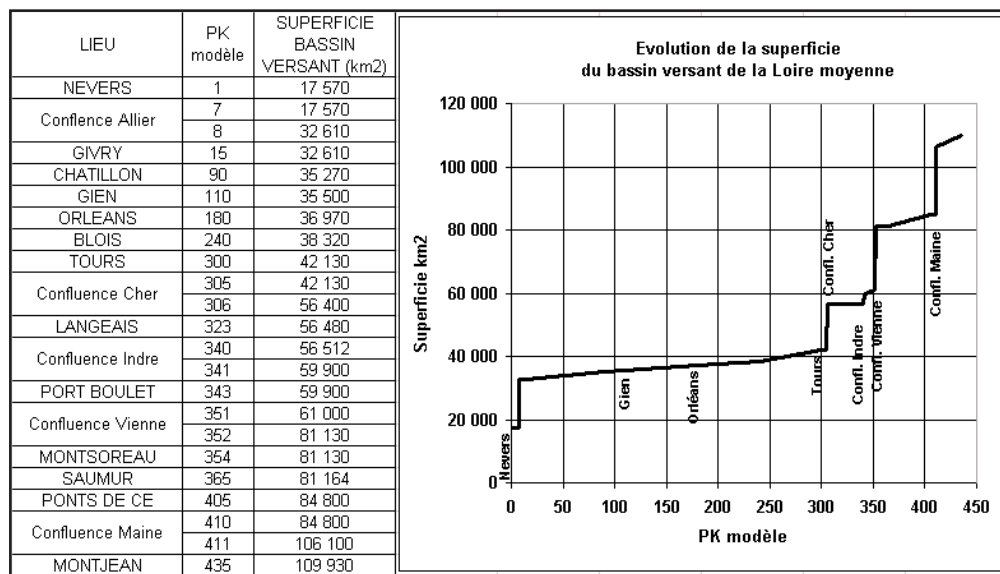
La Loire moyenne contrôle un bassin versant de 32 610 km² au Bec d'Allier (17 570 km² pour la Loire à Nevers et 14 310 km² pour l'Allier au Veurdre) et un bassin de 109 930 km² à Montjean.

Entre ces deux points, l'évolution de la superficie du bassin versant est contrastée.

Le tableau et le graphique représentent l'évolution de la superficie le long de la Loire moyenne : à Nevers, à la confluence avec l'Allier, à Givry, à Châtillon, à Gien, à Orléans, à Blois, à Tours, à la confluence avec le Cher, à Langeais, à la confluence avec l'Indre, à Port-Boulet, à la confluence avec la Vienne, à Montsoreau, à Saumur, aux Ponts-de-Cé, à la confluence avec la Maine et à Montjean.

Le tableau suivant indique la superficie contrôlée par le barrage de Villerest, et celle drainée par les affluents importants de la Loire moyenne :

On distingue la succession de trois zones distinctes.



La **première** s'étend du Bec d'Allier jusqu'à l'aval de Tours, elle est longue de 300 km, la superficie du bassin versant y passe de 32 600 km² à 42 130 km² de manière à peu près linéaire. Dans cette zone, il est surtout important de définir avec soin l'apport de la Loire à Nevers et celui de l'Allier au pont SNCF du Guétin. Sur ce long tronçon, on ne rencontre en effet aucun autre apport notable d'affluent, la définition du débit de la Loire au Bec d'Allier conditionne donc fortement les résultats.

La **seconde** s'étend de l'aval de Tours jusqu'à la confluence avec la Maine, elle est longue d'une centaine de kilomètres. Elle est d'abord caractérisée par l'augmentation des débits maximum circulant en Loire depuis l'aval de Tours jusqu'à Montsoreau, avec en 45 km, l'arrivée des apports importants de la rive gauche Cher+Indre+Vienne, et le doublement de la superficie du bassin versant drainé de 42 130 km² à 81 000 km². En aval de ce secteur, le long des vals de Bréhémont en rive gauche et d'Authion en rive droite, la Loire subit une hausse importante des débits transités en Loire, suite à ces confluences.

La **troisième** débute à l'aval de la confluence avec la Maine. Elle est surtout caractérisée par le fait qu'elle structure la condition limite aval du modèle Loire moyenne prise à Montjean qui donne un résultat pertinent à la confluence.

COURS D'EAU	LIEU	SUPERFICIE BASSIN VERSANT (km ²)
ALLIER	LE GUETIN	14 310
CHER	SAVONNIERES	13 680
INDRE	RIGNY USSE	3 380
VIENNE	NOUATRE	19 920
MAINE	ANGERS	21 300
LOIRE	VILLEREST	6 585

La méthode, les études et les hypothèses utilisées pour définir l'hydrologie de l'étude Loire moyenne

La mise au point de l'hydrologie " Loire moyenne " s'appuie sur de nombreuses études menées depuis des décennies sur la Loire entre autre par le Service Hydrologique Centralisateur (aujourd'hui Service de Bassin de la DIREN Centre - DIREN de Bassin) et sur de multiples résultats concernant les crues historiques de 1856, 1866 et 1907.

La démarche méthodologique a suivi les quatre étapes suivantes :

1. La méthode du Gradex:

Elle apporte en fonction de la période de retour, à partir du débit moyen naturel sur 5 jours au Bec d'Allier, le volume de la crue et le débit de pointe naturel.

2. Les études du SHC réalisées à partir de 1975 :

Elles apportent la méthode statistique de construction des hydrogrammes des crues naturelles synthétiques.

3. Les études sur le rôle et l'action du barrage de Villerest :

Elles donnent la transformation que le stockage dans la retenue et l'écrêtement par inondation de la vallée de la Loire entre Roanne et Nevers, occasionnent à l'hydrogramme de crue naturelle à Nevers. Elles produisent l'hydrogramme de crue synthétique de la Loire à Nevers influencé par le barrage de Villerest.

4. Les analyses sur les apports importants de la partie aval de la Loire moyenne :

Elles conduisent à conclure qu'une hydrologie robuste et simple, comme celle reconstituée pour la crue type 1856, est suffisante dans le cadre de l'étude Loire moyenne pour conduire le diagnostic hydraulique du tronçon de Loire compris entre le Val de Bréhémont et les Pont-de-Cé. Ce scénario hydrologique est d'abord réaliste en tant que généré par la partie " océanique " de la pluie mixte, son utilisation est conforme à l'usage technique consistant à fixer certains paramètres pour en étudier d'autres, puisqu'il rend possible la compréhension du fonctionnement de la Loire dans ces secteurs en limitant l'analyse aux cas d'étude les plus productifs d'enseignements.

La méthode du Gradex

C'est la méthode recommandée par le Comité International des grands barrages pour l'estimation des crues de projet pour la conception des barrages.

Le postulat de base de la méthode du Gradex est qu'il doit y avoir une relation entre la distribution statistique des débits et celle des pluies génératrices puisque les débits sont formés par les pluies.

Dans certaines conditions d'écoulement extrêmes (crues très fortes), le sol est si saturé que tout accroissement de pluie va se traduire, en terme de volume - débit moyen sur une durée T - par le même accroissement en débit. Autrement dit tout ce qui est précipité, ruisselle.

Le calcul du volume susceptible de ruisseler lorsqu'on dépasse sur le bassin versant de la Loire, la saturation, nécessite un premier choix : celui de la durée de la pluie à considérer.

Cette durée correspond au temps caractéristique du bassin versant visible sur les hydrogrammes des crues fortes de la Loire après la confluence de l'Allier.

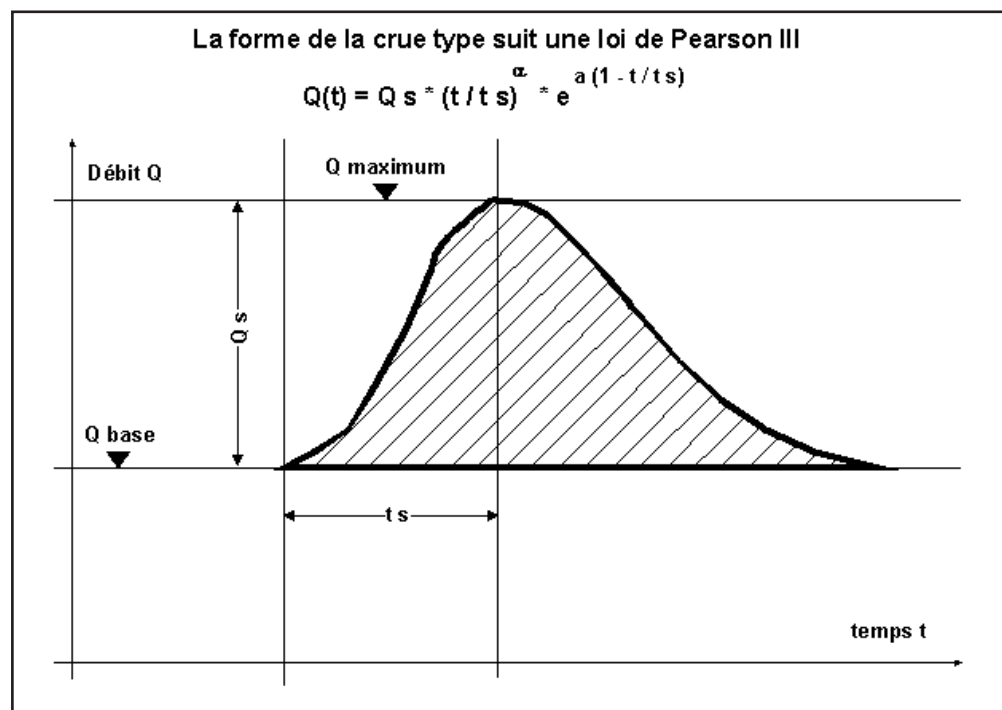
Les hydrogrammes reconstitués pour les crues très fortes du passé fixent le choix d'un temps caractéristique de 4 jours pour la Loire à Nevers et pour l'Allier au Veurdre et de 5 jours pour la Loire au Bec d'Allier.

Un second choix est nécessaire dans la suite du calcul. Il concerne l'évaluation du rapport (p) entre le débit de pointe de la crue et le débit moyen sur 5 jours. En considérant les hydrogrammes reconstitués, nous retenons la valeur (p) = 1,6 à Givry - Bec d'Allier - 1,5 à Nevers et 1,8 au Veurdre.

Les hypothèses sur la forme de l'hydrogramme de la crue

Les études réalisées par le SHC pour définir la forme de l'hydrogramme de la crue, ont porté sur un échantillon constitué de l'ensemble des crues fortes et très fortes reconstituées par le Service de 1852 à 1980.

Pour les débits de crue de l'échantillon ayant atteint ou dépassé les valeurs de 2000 m³/s à Givry, 1500 m³/s à Nevers et 800 m³/s au Veurdre, en ne retenant alors que la partie de l'hydrogramme pour laquelle le débit était supérieur à 0,6 Q_{max}, il a été constaté que la forme de la crue est bien décrite par une loi statistique hydrologique de PEARSON type III.



Des hydrogrammes de crue naturelle aux hydrogrammes influencés par le barrage de Villerest

Connaissant par la méthode du Gradex, le débit de pointe et le volume d'une crue pour une période de retour donnée et sa forme par la Loi de Pearson III, l'Equipe pluridisciplinaire a pu, pour la première fois, construire les hydrogrammes naturels pour la Loire à Nevers et l'Allier au Veurdre pour différentes périodes de retour comprises entre la cinquantennale et la millénaire.

Si l'hydrogramme de l'Allier au Veurdre est encore naturel, celui de la Loire à Nevers est aujourd'hui influencé par le barrage de Villerest.

La méthode de définition de l'hydrogramme synthétique écrêté par le barrage de Villerest à Nevers utilisée par l'Equipe pluridisciplinaire a consisté à enchaîner, pour chaque période de retour de crue étudiée, les opérations suivantes :

1. La propagation de Roanne à Nevers de l'hydrogramme synthétique de la Loire à Villerest. Cet hydrogramme est construit selon la même méthode que l'hydrogramme synthétique à Nevers - sans tenir compte du barrage de Villerest. Il est propagé avec le modèle de simulation des crues construit en 1996 par le Bureau d'Etudes Techniques HORIZONS (aujourd'hui rattaché à SAFEGE) lors d'une étude précédente pour le compte du Service de Bassin Loire Bretagne de la DIREN Centre.
2. Le calcul de la différence entre l'hydrogramme synthétique à Nevers et l'hydrogramme à Villerest propagé. Cette différence est supposée correspondre aux apports intermédiaires - entre autre du Morvan - qui arriveront aussi en Loire lorsque le barrage de Villerest fonctionnera.
3. L'écrêtement de l'hydrogramme synthétique de la Loire à Villerest avec le logiciel du Centre de Gestion du réseau CRISTAL et la propagation jusqu'à Nevers avec le modèle de simulation de crue de la DIREN Centre. Ils donnent l'hydrogramme synthétique de Villerest influencé par le barrage arrivant à Nevers.
4. L'addition de cet hydrogramme avec l'hydrogramme représentant les apports intermédiaires issu du calcul 2 et le lissage de la somme donnent enfin l'hydrogramme synthétique écrêté par le barrage de Villerest à Nevers.

Le barrage de Villerest et ses modalités de gestion

Le barrage de Villerest par décret du 4 mai 1983 est un ouvrage à buts multiples. Ses fonctions principales sont l'écrêtement des crues et le soutien d'étiage. La production d'électricité et l'utilisation touristique estivale du site sont des fonctions secondaires.

Le barrage est un ouvrage poids arché en béton de 70 mètres de haut pour une largeur en crête de 469 mètres.

Sa crête est au niveau 325 mètres. Les organes d'évacuation consistent en :

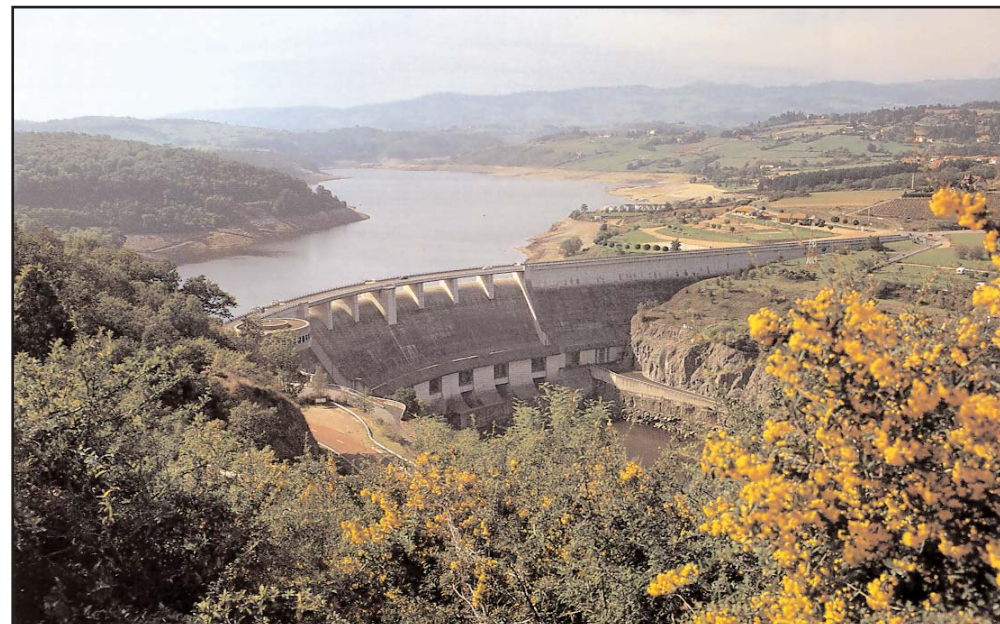
- Un déversoir de surface calé à 320 mètres.
- Cinq pertuis de demi fond calés au niveau 290 mètres,
- Un pertuis de faibles débits calé au niveau 280 mètres,
- Un pertuis de fond du barrage calé au niveau 270 mètres,

La tranche inférieure du volume de retenue est située sous le niveau 290 mètres, elle représente une capacité de 15 millions de m³.

La tranche moyenne est définie entre les niveaux 290 et 316 mètres. A 316 mètres, la tranche supérieure commence, le plan d'eau occupe 770 hectares, le volume d'eau retenu est de 128 millions de m³.

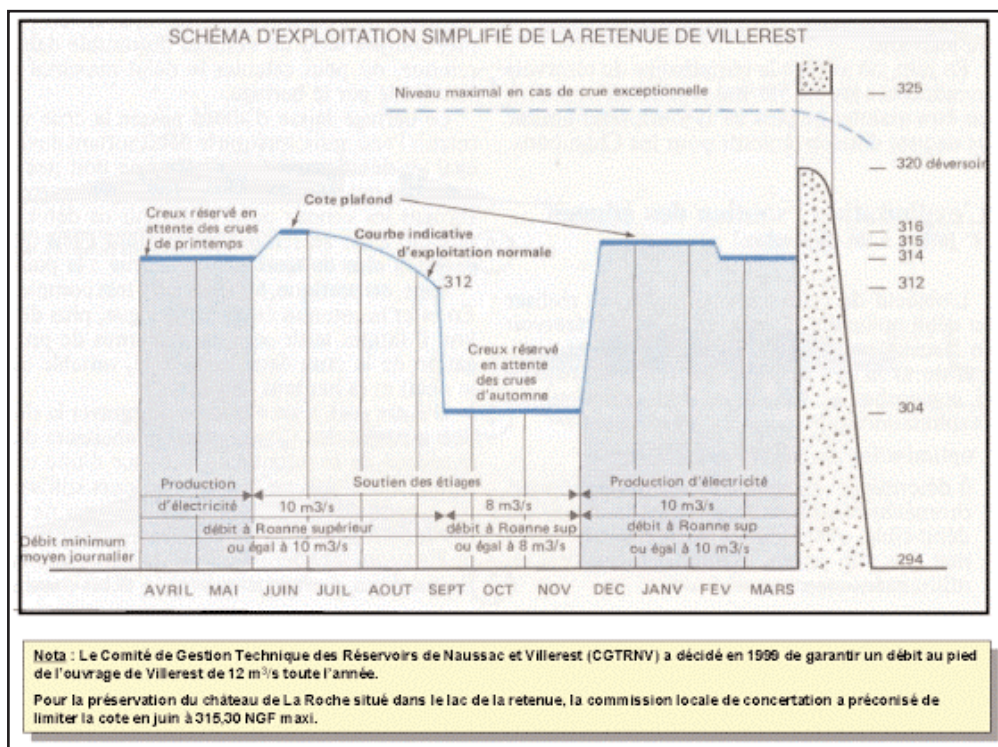
A 320 mètres, le plan d'eau occupe 1700 hectares, le volume d'eau retenu est de 165 millions de m³.

A 324 mètres, le plan d'eau occupe 2300 hectares, le volume d'eau est de 238 millions de m³. Si le plan d'eau atteint ce niveau, le déversoir du barrage évacue 8500 m³/s.



Le règlement d'eau définit le schéma d'exploitation du barrage de Villerest :

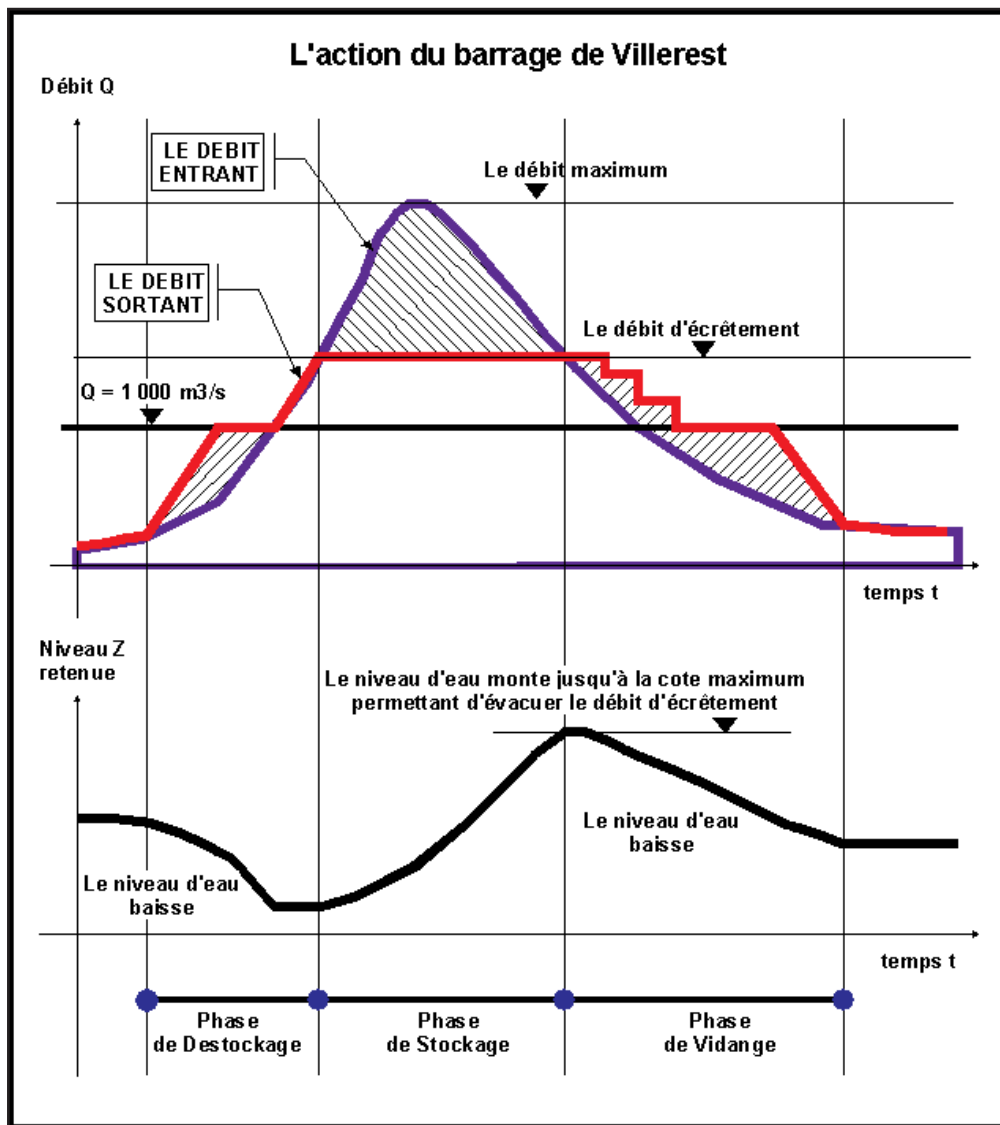
- Du 1er décembre au 15 décembre, la cote de la retenue n'excède pas 315 m. L'amplitude maximale des variations journalières de niveau est inférieure à 0,5 m.
- Du 15 décembre au 31 mai, la cote de retenue est comprise entre 313,5 et 314 m pour le stockage éventuel d'une crue de printemps.
- A partir du 1er juin, le niveau de la retenue est relevé jusqu'à la cote maximale de 316 qui n'est pas maintenue plus de quinze jours ; au-delà de ces quinze jours, la cote est ramenée dans un nouveau délai maximal de 15 jours à une valeur au plus égale à 315,5 m. Le niveau de la retenue descend pour assurer le soutien d'étiage.
- Du 15 septembre au 15 novembre, la cote de retenue ne dépasse pas 304 m pour le stockage éventuel d'une crue d'automne.



Le rôle important de la retenue dans le soutien d'étiage explique pourquoi le creux réservé est plus important dans l'attente des crues d'automne que celui dans l'attente des crues de printemps.

Le principe de gestion du barrage enchaîne 5 phases

- Phase 1 : la définition de l'état de risque de crue. Cela se produit lorsque des pluies supérieures à 50 mm sont mesurées sur un au moins des pluviomètres témoins dans le bassin versant ou si la Loire atteint 350 m³/s à Bas-en-Basset. Dans cet état, du 10/9 au 30/11, le niveau dans le barrage est descendu à 304 m et du 1/12 au 9/9 le niveau est descendu à 314 mètres.
- Phase 2 : la définition de l'état de crue. Cela se produit lorsque 1000m³/s sont prévus à Feurs ou 1000 m³/s sont constatés à Montrond, Feurs ou à l'entrée du barrage. Dans cet état, il y a astreinte et permanence obligatoire et recherche de la prévision du débit maximum de la Loire au barrage.
- Phase 3 : le destockage de la retenue est mis en œuvre pour créer le plus grand creux possible avant l'arrivée de la pointe de crue.
- Phase 4 : le stockage et l'écrêtement de la crue sont effectifs, le barrage restitué à l'aval moins d'eau qu'il n'en reçoit à l'amont. Cette phase commence une fois que le débit maximum arrivant au barrage est prévu, que le débit d'écrêtement et le niveau pour atteindre ce débit en sortie est calculé. Elle s'arrête lorsque ce niveau est atteint et, donc que le débit entrant dans le barrage est égal au débit sortant.
- Phase 5 : le retour à la cote normale est recherché en augmentant le débit envoyé à l'aval.



Notons que le modèle complet définissant les modalités de gestion du barrage pour les trois phases de destockage, stockage et vidange, est secouru par différentes procédures de calcul ce qui garantit, même en mode dégradé d'acquisitions des données nécessaires pour gérer le barrage, un écrêtement important de la crue.

Notons également que l'écrêtement systématique des crues de $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ correspond à une situation d'automne (creux à 304 m), il est difficile d'obtenir un écrêtement de $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ avec un niveau de 314 m correspondant au creux réservé de printemps. Cela signifie que l'hydrologie introduite dans le modèle correspond plutôt à une crue d'automne et que l'écrêtement calculé est supérieur à celui qu'il serait possible d'atteindre pour une crue en mai-juin.

L'analyse des possibilités diverses d'écrêtement selon la variabilité des situations hydrologiques n'a pas été faite dans le cadre de l'étude Loire moyenne. Elle aurait nécessité par exemple avec trois cas de gestion du barrage, la simulation d'au moins 18 situations hydrologiques complémentaires, ce qui alourdisait considérablement l'étude générale. Le parti d'étude retenu par la maîtrise d'ouvrage en accord avec le groupe d'experts hydrologues a été de simplifier sur la base de scénarios réalistes pour garder une vision homogène et synthétique du risque inondation le long de la Loire moyenne.

Les résultats acquis restent cependant transposables à d'autres situations : un écrêtement de $500\text{ m}^3/\text{s}$ à Villerest au lieu de $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ ferait augmenter les débits en Loire de $500\text{ m}^3/\text{s}$ environ, ainsi, les effets du passage de la crue de période de retour 100 ans seraient ceux de la crue simulée dans le cadre de l'étude pour la période de retour 170 ans. En niveau d'eau, ce moindre écrêtement donnerait une surcote pour la période de retour considérée de 50 cm environ.

	Les filaires à alimenter	l'Hydrogramme est injecté	Bief	PK modèle	Val concerné si affluent d'un val
1	La Loire	à Nevers	1	0.00	
2	L'Allier	au pont SNCF du Guétin	50	0.00	
3	La Canche	en tête du filaire	52	0.00	Val de Givry
4	Le ru de Château Vert	en tête du filaire	54	0.00	Val de La Charité amont
5	Le Moule	en tête du filaire	56	0.00	Val de La Charité aval
6	La Judelle	en tête du filaire	58	0.00	Val de Léré
7	Le Rousson	en aval du déversoir de Saint-Martin d'Ocre, en tête du filaire	59	0.00	Val de Gien
8	Le Bras	en tête du filaire	61	0.00	Val de Gien
9	La Sange	en tête du filaire	62	100.00	Val de Sully-sur-Loire
10	La Bonnée	en tête du filaire	64	100.00	Val d'Ouzouer
11	La Vieille Bonnée	en tête du filaire	66	100.00	Val d'Ouzouer
12	La Dhuy et le Loiret	en tête du filaire	78	0.00	Val d'Orléans
13	L'Ousson	en tête du filaire	76	0.00	Val d'Orléans
14	La Marmagne	en tête du filaire	70	0.00	Val d'Orléans
15	Un fossé théorique	en aval du déversoir de Jargeau	72	0.00	Val d'Orléans
16	L'Ardoux	en tête du filaire	86	0.00	Val d'Ardoux
17	L'Ime	en tête du filaire	88	0.00	Val d'Ardoux
18	La Tronne	en tête du filaire	92	100.00	Val d'Avary
19	La Noue	en aval du déversoir de Montlivault	94	100.00	Val de Blois
20	Un fossé théorique	en aval du déversoir de La Bouillie	100	100.00	Val de Blois
21	Le Cosson	en tête du filaire	96	100.00	Val de Blois
22	Le Beuvron	en tête du filaire	104	100.00	Val de Blois
23	La Cisse	en tête du filaire	108	100.00	Val de Cisse
24	La Brenne	dans le filaire de la Cisse	108	136.00	Val de Cisse
25	L'Amasse	dans le filaire de la Loire à Amboise	27	272.67	
26	Le Cher	à Azay-sur-Cher	110	100.00	
27	Un fossé théorique	en aval du déversoir du Vieux Cher	112	0.00	Val du Vieux Cher
28	Un fossé théorique	en aval du déversoir de la Chapelle aux Naux	114	0.00	Val de Bréhémont
29	L'Indre	à Azay-le-Rideau	116	0.00	
30	La Vienne	à l'Île-Bouchard	120	100.00	
31	Le Thouet 1	en tête du filaire	122	0.02	
32	Le Thouet	dans le filaire	122	0.00	
33	Le Lane	en tête du filaire	124	0.00	Val d'Authion
34	Le Changeon	en tête du filaire	129	2.00	Val d'Authion
35	Le Lathan	en tête du filaire	130	0.00	Val d'Authion
36	L'Authion 2	dans le filaire	126	44.16	Val d'Authion
37	Le Régaure	en tête du filaire	132	0.00	Val d'Authion
38	L'Authion 1	dans le filaire	128	50.74	Val d'Authion
39	L'Authion	dans le filaire	128	50.74	Val d'Authion
40	Le Petit Louet	en tête du filaire	134	0.00	Val de Gohier
41	L'Oudon	en amont de la Maine	136	0.00	
42	La Sarthe	en amont de la Maine	136	0.01	
43	Le Loir	en amont de la Maine	136	0.02	
44	La Mayenne	en amont de la Maine	136	0.03	
45	Le Louet	en tête du filaire	138	0.00	
46	Le Bras de Chalennes	en tête du filaire	140	0.00	
47	Le Layon	dans le filaire	140	1.50	
48	La Loge	en tête du filaire	142	0.00	

En pratique 48 points d'injection de débit sont à alimenter

En pratique, dans le modèle Loire, la mise en eau du modèle est réalisée en injectant des débits variables en fonction du temps en tête des filaires ou dans les tronçons filaires structurant le modèle : la Loire limitée par ses coteaux ou par des levées, les principaux affluents du fleuve, les ruisseaux ou thalwegs de drainage dans les vals, les terrains situés dans le prolongement des déversoirs.

C'est l'étude hydrologique "Loire moyenne" qui définit les apports de la Loire à Nevers et de l'Allier au Pont du Guétin.

Les apports des petits affluents (Canche, Moule, Judelle,...) circulant dans les vals sont essentiellement définis pour assurer un débit minimum constant dans les filaires des vals pour que le modèle puisse calculer. Ces débits, de l'ordre de 3 à 10 m³/s, sont très petits devant les débits circulant dans les vals lorsque les déversoirs les alimentent ou lorsque des brèches s'ouvrent. Ils n'ont pas d'influence sur la crue mais sont nécessaires pour des impératifs numériques. Toutefois, ils sont parfois suffisants pour mettre en eau certains fonds de casier. Dans la réalité, cela pourra aussi survenir si une pluie vient provoquer localement de petites inondations dues aux seuls affluents.

Les affluents de la Loire entre Blois et Tours : Beuvron, Cosson, Masse, Cisse et Brenne sont construits par l'équipe pluridisciplinaire à partir de données existantes aux stations hydrologiques avec un débit maximum proche du débit journalier de période de retour 20 ans.

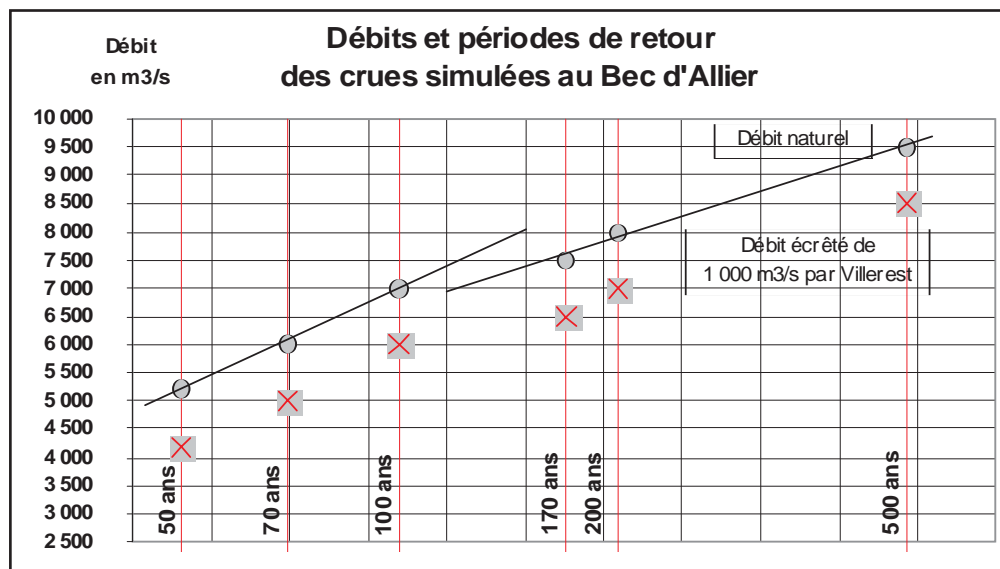
Sur avis du groupe d'experts en hydrologie, les apports retenus pour le Cher, l'Indre, la Vienne, le Thouet, le Loir, la Sarthe, la Mayenne, l'Oudon et le Layon correspondent aux hydrogrammes observés lors de la crue de 1856 extraits des rapports de "l'étude de propagation des crues de la Loire" réalisée en 1982 par SOGREA. Les données avaient alors été fournies par le Service Hydrologique Centralisateur. Ces apports sont caractérisés par des pointes de crue qui arrivent 2 à 3 jours environ avant la pointe de crue en Loire, ce qui tend à épaissir l'hydrogramme en Loire plutôt qu'à le rendre plus pointu.

Notons qu'à la demande du Comité de Pilotage de l'étude, l'Equipe pluridisciplinaire avec l'appui du Service de Bassin Loire Bretagne a élaboré des hydrogrammes de crue centennale pour le Cher et la Vienne afin de réaliser deux tests supplémentaires pour analyser l'effet de la concomitance de ces apports avec le passage de la crue de Loire.

L'apport de l'Authion a été estimé (sur la base d'indications fournies par le Service de Bassin Loire Bretagne de la DIREN Centre) par l'équipe pluridisciplinaire. Il a été réparti par Hydratec entre ses différents affluents, pour satisfaire au critère d'alimentation des filaires.

Dans le cadre d'un modèle à l'échelle interrégionale (au 1/50 000^{ème}) il a été délibérément choisi de ne pas multiplier les scénarios à comparer en gardant le même débit sur les affluents quelle que soit la période de retour. Par conséquent, les résultats sont fiables et homogènes sur le secteur du Bec d'Allier à Tours, où on ne note pas d'apport notable des affluents, pour les crues de période de retour supérieure à 70 ans. Ils sont à prendre avec plus de précautions en aval de Tours où les principaux affluents de la Loire pourraient avoir un comportement différent de celui simulé.

Les crues analysées dans le modèle Hydra 1998



Des volcans du Massif Central au marais de la Grande Brière, les climats sont très contrastés. Ils engendrent trois types de crues : les crues "cévenoles" : les crues "océaniques" et les crues "mixtes" : les plus fortes qui proviennent de la conjonction de deux types d'événements précédents. Elles ont lieu en mai/juin et en octobre/novembre.

Ces différentes crues génèrent des événements de puissance variable. L'analyse de toutes les crues connues et historiques a permis de déterminer des volumes de crue, des débits de pointe, des formes générales et des durées à l'aide de méthodes statistiques.

Les techniciens ont voulu traduire la notion de fréquence d'apparition des événements en temps de retour, ce qui ne facilite pas spécialement la compréhension du risque.

En ce qui concerne la Loire Moyenne, la relation entre la force des crues, caractérisée par le débit au Bec d'Allier écrêté de 1 000 m³/s par Villerest, et les périodes de retour retenues, a conduit à répartir les crues en trois familles.

Les crues 50 ans, 70 ans et 100 ans

Ce sont les crues qui touchent des riverains non protégés.

- **Crue cinquantennale au Bec d'Allier.** C'est une crue forte de débit 4 200 m³/s au Bec d'Allier, écrêtée par Villerest (débit naturel sans Villerest de 5 200 m³/s). Elle correspond à un événement comparable à la crue de 1907 qui a réussi à s'écouler dans le lit sans provoquer de rupture de levée. Cette période de retour de 50 ans signifie qu'elle a une probabilité de survenance de 2% chaque année.
- **Crue septennennale au Bec d'Allier.** C'est une crue de débit 5 000 m³/s au Bec d'Allier, écrêtée par Villerest (débit naturel sans Villerest de 6 000 m³/s). Cette période de retour de 70 ans signifie qu'elle a une probabilité de survenance de 1,4 % chaque année.
- **Crue centennale au Bec d'Allier.** C'est une crue traditionnellement retenue comme référence pour les études. Elle correspond à un débit de débit 6 000 m³/s au Bec d'Allier, écrêtée par Villerest (débit naturel sans Villerest de 7 000 m³/s). Cette période de retour de 100 ans signifie qu'elle a une probabilité de survenance de 1% chaque année.

Les crues 170 ans et 200 ans

Ce sont les fortes crues qui provoquent des dommages malgré le système de protection par levée.

Crue cent-septennennale et crue deux-centennale au Bec d'Allier. Ce sont des puissances de crues comparables aux grandes crues historiques de 1846, 1856, et 1866. Elles correspondent à des débits de 6 500 m³/s et 7 000 m³/s au Bec d'Allier, écrêtés par Villerest (débits naturels sans Villerest de 6 500 m³/s et 8 000 m³/s). La crue deux-centennale a une probabilité de survenance de 0,5 % chaque année.

La crue 500 ans

C'est la crue très forte qu'il fallait analyser.

Crue cinq-centennale au Bec d'Allier. Ce choix relève d'une décision d'analyser avec le modèle une crue extrême, mais dont le risque d'apparition est encore fort. Elle correspond à 8 500 m³/s au Bec d'Allier écrêtée par Villerest (débit naturel sans Villerest de 9 500 m³/s). Elle a chaque année 0,2% de probabilité de se produire, c'est-à-dire qu'elle est 20 fois plus probable et fréquente que la crue utilisée pour calculer la protection des centrales nucléaires le long de la Loire.

N.B. : Les débits arrondis ont aussi guidé les choix de types de crue, de façon à simplifier les mémorisations.

Enfin, à l'issue de cette synthèse, il faut rappeler qu'un travail important reste nécessaire pour améliorer nos capacités de prévision à l'amont du Bec d'Allier, notamment sur les apports du Morvan. Une analyse des conditions pluviométriques ayant précédé les événements historiques (1856, 1866, 1872, 1875, 1878, 1907, ...), sur la base des archives météorologiques existant à Météo France ou ailleurs, pourrait aussi apporter des informations très importantes pour ces prévisions. En effet, sur le haut bassin où les temps de réponse sont très courts, une similitude de conditions météorologiques avec des événements importants passés pourrait être le signal d'une mise en pré-alerte des Services d'Annonces de Crues avant même que les précipitations aient été enregistrées. On pourrait ainsi gagner quelques heures précieuses sur le haut bassin.

Ce travail sur les hauts bassins de la Loire et de l'Allier pourrait être utilement reproduit sur les bassins du Cher, de l'Indre et de la Vienne.

Crue des affluents de la Loire dans le modèle Hydra 1998

Objectif

L'objectif de ce chapitre est de comparer en terme de période de retour les crues simulées en Loire et les crues simulées sur les affluents.

Rappelons qu'il s'agit, pour la Loire, des crues de période de retour suivantes au Bec d'Allier :

- 50 ans (4 200 m³/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 5 200 m³/s naturels),
- 70 ans (5 000 m³/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 6 000 m³/s naturels),
- 100 ans (6 000 m³/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 7 000 m³/s naturels),
- 170 ans (6 500 m³/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 7 500 m³/s naturels),
- 200 ans (7 000 m³/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 8 000 m³/s naturels),
- 500 ans (8 500 m³/s au Bec d'Allier écrêté par Villerest, 9 500 m³/s naturels).

Pour les affluents (Cher, Indre, Vienne, Thouet et Maine), la crue type 1856 reconstituée a été injectée dans le modèle pour toutes les périodes de retour en Loire.

On s'intéresse ici particulièrement aux trois premiers affluents dont les débits de pointe simulés sont les suivants :

- Le Cher : débit de pointe de 1 700 m³/s à Azay-sur-Cher. Ce débit est naturellement écrêté par la vallée et parvient à Savonnières, en amont de la confluence à 1 200 m³/s,
- L'Indre : débit de pointe de 400 m³/s à Azay-le-Rideau,
- La Vienne : débit de pointe de 1 900 m³/s à l'Ile-Bouchard.

Pour la Loire, on souhaite comparer le débit obtenu à Blois, Tours et Saumur lors de la simulation d'une crue cinquantennale au Bec d'Allier avec le débit de pointe de la crue cinquantennale, estimé à ces trois stations par la DIREN. Les estimations de la DIREN, disponibles sur la banque Hydro, sont menées à partir d'analyses statistiques réalisées d'après les enregistrements aux stations de mesure.

Pour les affluents, on comparera le débit de pointe entré dans le modèle, correspondant à une crue 1856 avec les estimations de la DIREN afin d'estimer la période de retour des crues simulées.

On dispose des données aux stations de mesure suivantes :

- La Loire à Blois [1863 - 2002],
- La Loire à Tours [1957 - 2002],
- La Loire à Saumur [1916 - 2002],
- Le Cher à Savonnières [1966 - 1999],
- L'Indre à Lignières-de-Touraine [1966 - 1980],
- La Vienne à Nouâtre [1958 - 2001].

Nota : Les données disponibles sur l'Indre ne couvrent que 14 ans et ne sont pas suffisantes pour établir une estimation fiable des débits de pointe. On ne peut donc pas s'intéresser à cet affluent.

Pour la Loire, deux populations statistiques apparaissent :

- La Loire à Blois, avec la prise en compte des crues de 1866 et 1907,
- La Loire à Tours et Saumur qui ne prennent pas en compte ces crues très fortes.

Les débits de crue estimés par la DIREN sont des débits non écrêtés car le barrage de Villerest, mis en service en 1984, n'a depuis fonctionné qu'en novembre 1996. Il s'agit donc de débits naturels.

Estimation de la période de retour à Blois, Tours et Saumur de la crue de 5 000 m³/s au Bec d'Allier qui correspond environ à une crue cinquantennale naturelle

Le tableau suivant compare :

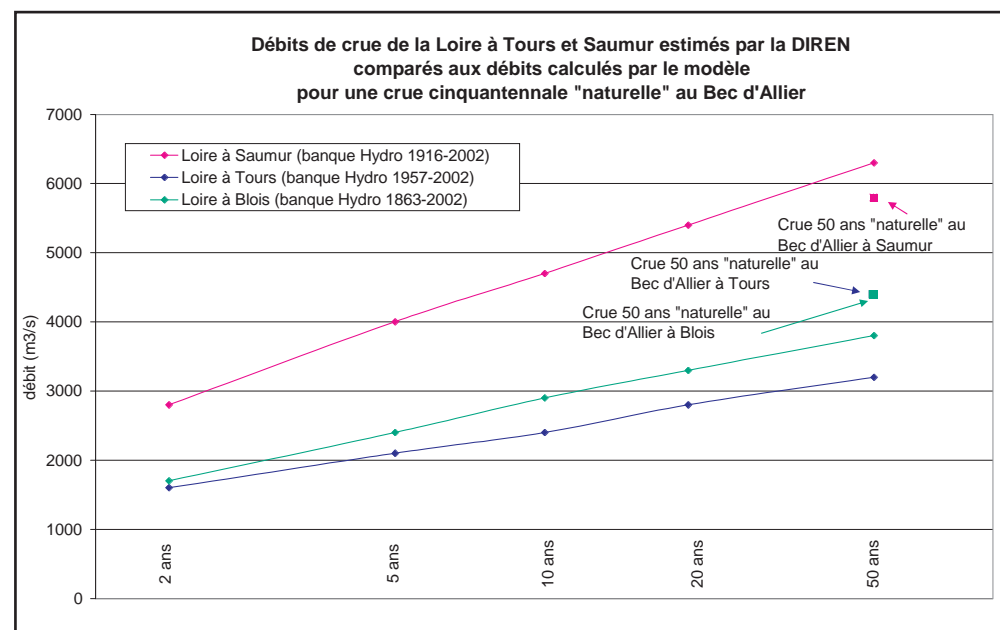
- le débit cinquantennal naturel estimé par la DIREN à Blois, Tours et Saumur en fonction des données enregistrées sur des périodes variables.
- le débit maximal calculé par le modèle à Blois, Tours et Saumur lors de la simulation d'une crue de période de retour 70 ans écrêtée de 1 000 m³/s par le barrage de Villerest. Cette crue a un débit de 5 000 m³/s au Bec d'Allier et correspond donc à peu près à une crue de période de retour 50 ans naturelle (non écrêtée par le barrage).

Station de mesure	Loire à Blois	Loire à Tours	Loire à Saumur
(1) Crue cinquantennale estimée par la DIREN (période de mesure)	3 800 m ³ /s (1863-2002)	3 200 m ³ /s (1957-2002)	6 300 m ³ /s (1916-2002)
(2) Crue simulée : crue cinquantennale naturelle (environ 5 000 m ³ /s au Bec d'Allier),	4 400 m ³ /s	4 400 m ³ /s	5 800 m ³ /s
Ecart (2) - (1)	600 m ³ /s	1 200 m ³ /s	- 500 m ³ /s

Les différences observées à Tours et même à Blois, montrent que la crue cinquantennale considérée pour l'étude est une crue forte par rapport aux statistiques : l'étude hydrologique réalisée sur les crues très fortes dans le cas de l'étude Loire moyenne conduit à l'estimation d'un débit cinquantennal plus fort que l'étude statistique des crues récentes de la Loire.

A Saumur par contre, la crue cinquantennale naturelle simulée en Loire est inférieure de 500 m³/s à la crue cinquantennale estimée par la DIREN. Cette différence provient de l'apport de la Vienne de type 1856 injecté dans le modèle qui correspond, comme nous allons le voir dans la suite, à une crue de faible ampleur.

Le graphique suivant présente les débits de crue estimés par la DIREN aux trois stations de mesure et les débits obtenus



Estimation de la période de retour des crues de type 1856 du Cher et de la Vienne

D'après les estimations de la DIREN, réalisées à partir de 33 années de mesure sur le Cher et 44 années de mesures sur la Vienne, la crue de 1856 utilisée pour la modélisation a une période de retour de :

■ 50 ans sur le Cher (1 200 m³/s à Savonnières),

La crue du Cher de 1856 simulée représente une crue de période de retour 50 ans d'après les données disponibles sur cette rivière. La prise en compte d'une telle crue dans la modélisation de la Loire moyenne est donc satisfaisante pour l'étude des crues de période de retour 50 et 70 ans au bec d'Allier. Par contre, pour des crues plus fortes, il est possible que la crue du Cher soit légèrement sous-estimée par rapport aux événements simulés sur la Loire. La situation décrite par le modèle pourrait donc être aggravée en cas de crue plus forte du Cher. En particulier, le déversoir de La Chapelle-aux-Naux pourrait fonctionner avant une crue cinq-centennale au Bec d'Allier.

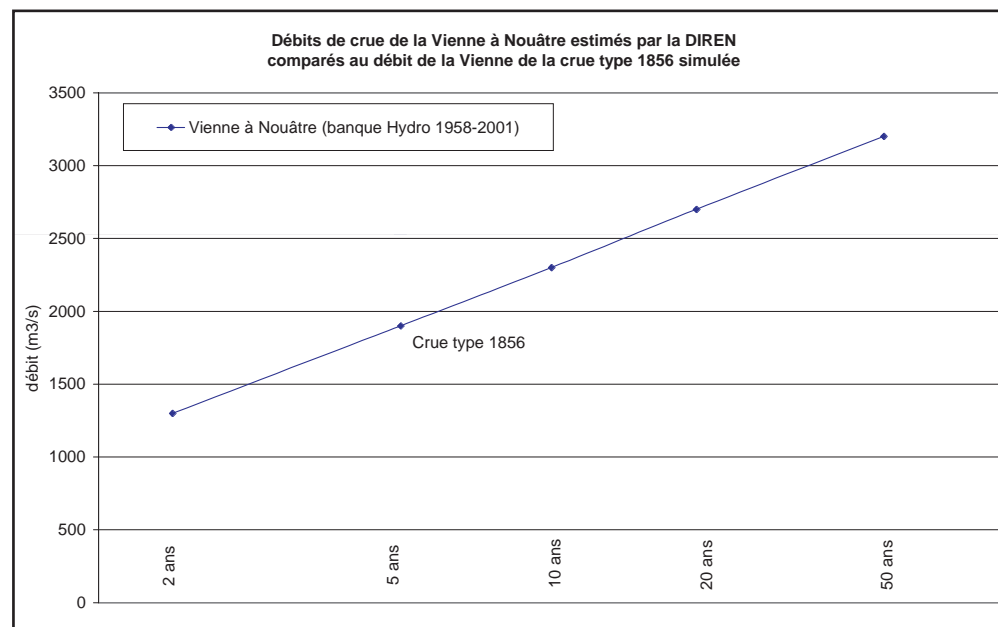
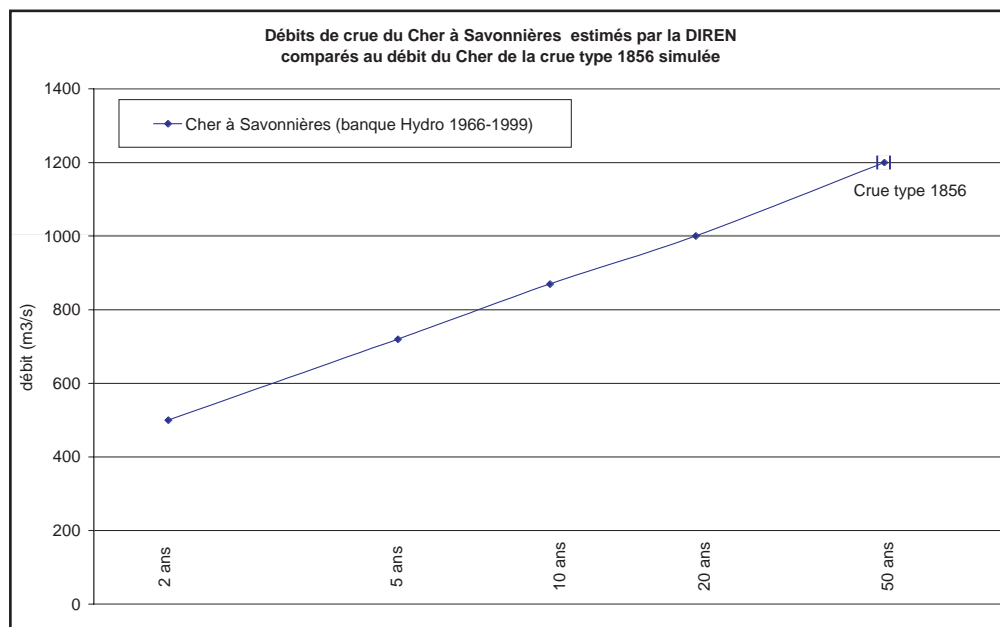
■ ans sur la Vienne (1 900 m³/s à l'Ile-Bouchard).

La crue de la Vienne de 1856 simulée représente une crue de période de retour 5 ans d'après les données disponibles sur cette rivière.

Une crue de période de retour 50 ans de la Vienne représente un débit maximal de 3 200 m³/s, bien supérieur au débit de 1 900 m³/s modélisé sur cet affluent.

La crue de type 1856 est donc une crue fréquente de la Vienne qui paraît sous-estimée par rapport aux événements étudiés sur la Loire.

En cas de crue forte ou très forte de la Vienne, la situation sera plus grave que celle simulée par le modèle, en particulier le long du val d'Authion.



Conclusions

Le modèle fournit des résultats hydrauliques par rapport à un débit injecté en tête. La caractérisation de ces résultats hydrauliques en fonction d'une période de retour tout au long de la Loire moyenne n'aura de sens que lorsqu'on aura résolu la question de la crue cinquantennale naturelle à Blois et à Tours. A ces deux stations, le débit calculé par le modèle pour une crue cinquantennale naturelle au Bec d'Allier est en effet supérieur respectivement de 600 et 1 200 m³/s au débit estimé sur la base de statistiques par la DIREN.

Il en résulte qu'aujourd'hui, la hauteur de 5 m à Tours calculée par le modèle pour la crue cinquantennale naturelle au Bec d'Allier (70 ans écrêtée) est supérieure de plus de 1 m à la hauteur estimée par la DIREN pour une crue cinquantennale à Tours.

En ce qui concerne les affluents, il semblerait que le choix de la crue de type 1856 tende à sous-estimer les débits de ceux-ci par rapport aux événements simulés sur la Loire. Les périodes de retour du Cher et de la Vienne pour une crue de type 1856 peuvent en effet être estimés respectivement à 50 et 5 ans.

En cas de crue du Cher et de la Vienne du même ordre que la crue de la Loire, la situation serait donc aggravée par rapport aux résultats du modèle le long de la Loire des confluences et de l'Authion.

Une notion compliquée : la période de retour

P.Hubert dans le dictionnaire français d'hydrologie couplé au Glossaire international d'hydrologie de l'UNESCO précise la définition de la période de retour et les limites de ce que le public perçoit de ce concept :

Glossaire International d'Hydrologie (1992) "période de retour, synonyme période de récurrence : Moyenne à long terme du temps ou du nombre d'années séparant un événement de grandeur donnée d'un second événement d'une grandeur égale ou supérieure. Exemple : pointe de crue".

Définition proposée

■ **Dans le cas général** : Moyenne de la durée de l'intervalle séparant deux occurrences consécutives de l'événement considéré.

■ **Pour les événements rares** : Inverse de la probabilité d'occurrence de l'événement considéré au cours d'une année quelconque.

Synonymie : Période de retour, période de récurrence, durée de retour.

Commentaires : La notion de temps de retour est destinée à caractériser la fréquence d'apparition d'un phénomène. C'est sans doute dans un souci pédagogique que les statisticiens ont voulu traduire la probabilité d'un événement, notion réputée particulièrement absconse, en temps de retour, supposé plus compréhensible pour les responsables et le grand public. Ce n'était peut être pas une excellente idée, car cette notion, et plus encore celle de période de retour, véhicule un certain nombre d'idées fausses, en particulier celle d'une périodicité des phénomènes extrêmes.

Définition statistique du temps de retour.

Soit un événement particulier, par exemple que le débit d'une rivière dépasse une valeur donnée au cours d'une année donnée. La probabilité de cet événement est une mesure de la vraisemblance de sa réalisation et elle est par convention comprise entre 0, lorsqu'il est impossible que l'évènement se produise et 1, lorsque sa réalisation est certaine. Si p est la probabilité que l'évènement donné se produise au cours d'une année donnée, le temps de retour attaché à cet événement est défini comme l'inverse de cette probabilité : $T=1/p$. Le temps de retour n'est donc qu'une autre façon d'exprimer, sous une forme qui se veut plus imagée, la probabilité d'un événement à un moment donné. Malgré son nom sans doute bien mal choisi, il ne fait référence à aucune notion de régularité ou de périodicité et peut même s'appliquer à des événements qui ne se sont pas produits et qui ne se produiront peut-être jamais à l'avenir. Il est parfaitement légitime de s'intéresser, en particulier pour des études de sécurité des ouvrages, aux crues millennale ou décennale (crues ayant respectivement une probabilité 0,001 et 0,0001 de se produire au cours d'une année donnée) d'une rivière qui n'existait pas il y a cinq mille ans, qui n'existera peut-être plus dans dix mille ans et qui n'est de toute façon plus la même que celle qui existait il y a quelques centaines d'années du fait des multiples transformations naturelles et/ou anthropiques qu'elle a subi. La probabilité et le temps de retour ne sont que des estimations de la vraisemblance de l'évènement considéré.

Les ambiguïtés liées à la notion de temps de retour

Ces ambiguïtés viennent du fait que, faute d'une connaissance suffisante de la physique des processus météorologiques et hydrologiques, l'estimation des probabilités s'est jusqu'à présent essentiellement appuyée sur l'étude de chroniques d'observations. Reprenant l'exemple cité plus haut, on peut imaginer d'observer le débit de la rivière pendant un grand nombre d'années, statistiquement identiques à la manière d'autant de lancés de dés. Si au cours de ces N années, l'événement se produit n fois, sa probabilité sera égale à $p=n/N$. En moyenne, l'événement se produit p fois par an et sa durée de retour sera égale à $T=1/p$ années. Il est alors possible de donner une interprétation plus concrète au temps de retour : c'est la durée moyenne séparant deux occurrences de l'événement. Cette procédure d'estimation peut être directement mise en œuvre à partir de séries d'observations, ce qui limite cette façon de procéder à des durées de retour relativement brèves, de l'ordre de quelques dizaines d'années. Encore faut-il admettre que toutes les années observées sont statistiquement identiques, ce qui n'est au mieux qu'une approximation puisque l'on sait par exemple qu'aujourd'hui comme hier le climat évolue, ou que, si l'on s'intéresse aux crues des rivières, les bassins versants subissent continuellement des modifications.

Comme une probabilité est nécessairement inférieure ou égale à 1 la formule $T=1/p$ ne pourra nous fournir que des temps de retour supérieurs ou égaux à un an. En fait les raisonnements que nous avons tenus ne sont qu'une simplification, dans le cas d'événements rares donc de faible probabilité, de la méthode du renouvellement (Miquel, 1984) qui permet de prendre en compte et d'attribuer un temps de retour (qui peut être inférieur à un an) à n'importe quel événement.

Conclusion

Pour conclure citons Pardé (1947) qui avait bien identifié la difficulté de l'estimation des temps de retour : "L'intervalle des très grandes crues mérite une attention particulière. Pour aucun élément de l'Hydrologie, les moyennes ne sont plus difficiles à établir et plus trompeuses. Ces phénomènes peuvent fort bien se grouper au nombre de deux, trois ou quatre dans un temps inférieur à l'intervalle moyen, puis manquer pendant une période bien plus longue. Signalons comme bizarreries de ce genre les trois crues de la Loire en 1846, 1856 et 1866, presque doubles, au Bec d'Allier, de la plus forte survenue depuis lors..." Remarquons que le hasard avait bien mal fait les choses en espaçant ces événements de dix ans, ce qui n'a pas manqué un temps d'accréditer la thèse de leur périodicité.

Références

- Maurice Pardé, 1947, Fleuves et rivières, Armand Collin, Paris, 224 p.
J. Miquel, 1984, Guide pratique d'estimation des probabilités de crues, Collection de la direction des Etudes et Recherches d'EDF, n°53, Eyrolles Ed., Paris.

Système de protection par levée et déversoir

Les éléments du système de protection simulé par le modèle

Pour simuler le fonctionnement du système de protection par levée et déversoir, il a fallu concevoir et développer un système numérique adapté à la Loire.

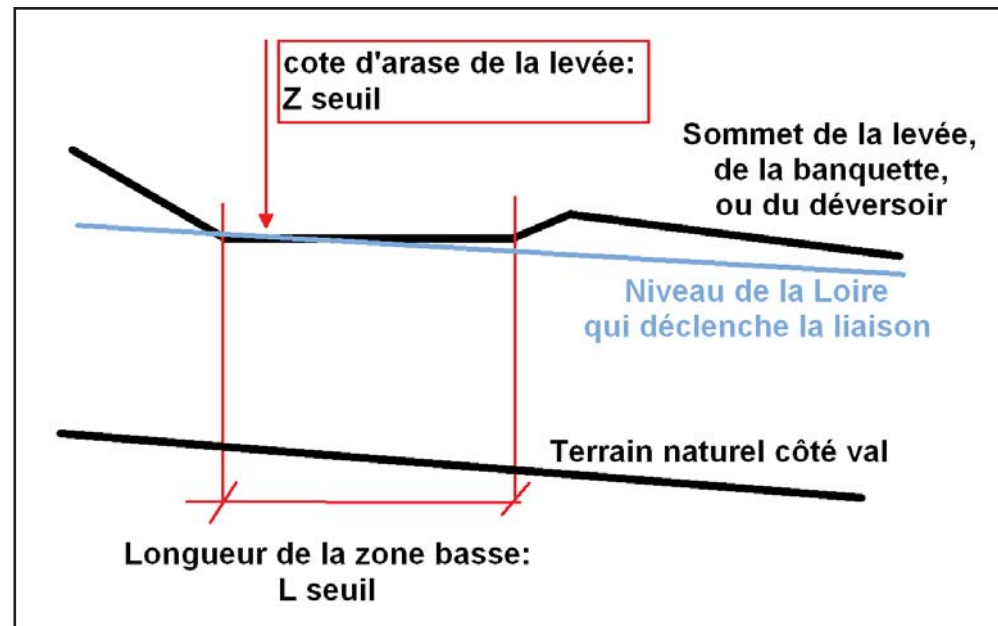
La Loire endiguée est simulée par un modèle filaire construit à partir de profils en travers du fleuve et calé d'après les crues récentes de la Loire (crues de 1992, 1994, 1996). L'écoulement dans le filaire est régi par les lois de propagation de Barré-de-Saint-Venant.

La levée n'est pas intégralement simulée avec son altitude tout le long du fleuve mais uniquement sous la forme d'un certain nombre de liaisons hydrauliques entre le modèle filaire de la Loire et le val au droit des points d'entrée d'eau possibles : points bas, interruption de banquette ou de levée, etc...

Un certain nombre de points bas sur les levées étaient visibles avant même la construction du modèle, uniquement en analysant le profil en long réalisé par le topographe. D'autres points bas et lieux de surverse sont ensuite apparus lors des premières simulations de crue qui ont montré que la ligne d'eau en crue n'était pas parallèle au profil en long des levées. Après ces premières simulations, il a fallu apporter de nouveaux points de surverses possibles en ajoutant des liaisons dans le modèle, et recommencer les simulations.

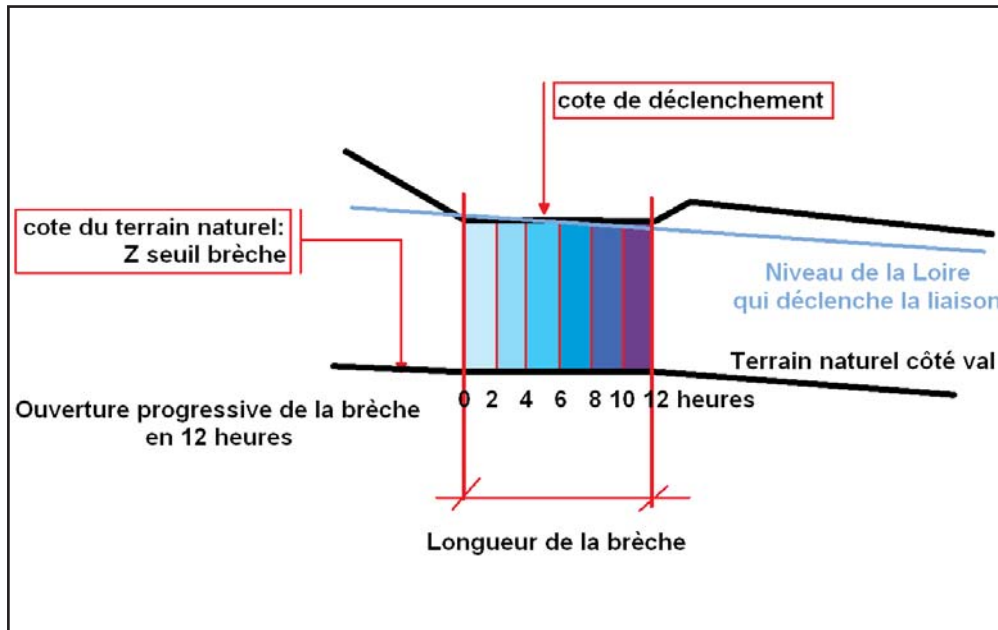
Les liaisons Loire - val utilisées dans le modèle sont de quatre types : la loi de surverse, la loi d'orifice, la brèche et la rupture de fusible.

- la loi de surverse : L'eau déborde au-dessus d'une levée ou d'un déversoir. La liaison est calée au niveau de l'arase du point bas de la levée ou de la banquette. Les débits susceptibles d'entrer dans le val sont calculés par une loi de type déversement simple fonction de la cote d'arase et de la largeur de la zone basse.

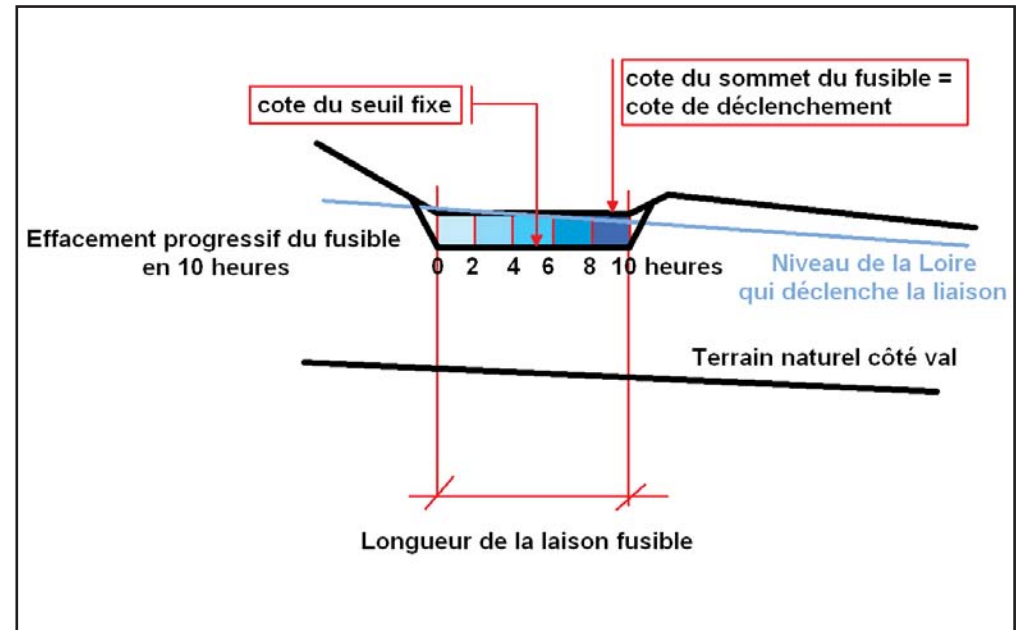


- la loi d'orifice: La liaison simule un passage à travers la levée par une ouverture quelconque : buse, dalot ou pont.

■ la brèche : La liaison représente l'ouverture d'une brèche lorsque le niveau d'eau, calculé à un pas de temps, dépasse le niveau altimétrique " seuil " correspondant généralement au niveau, mesuré par le géomètre, de la levée ou de la banquette. La liaison ouvre progressivement la brèche en 12 heures, jusqu'au terrain naturel.



■ la rupture de fusible.: Il s'agit du même type de liaison que pour la brèche, elle se déclenche lorsque le niveau de la Loire dépasse en un point le sommet du fusible. Le fusible s'efface en 10 heures jusqu'au niveau du seuil fixe du déversoir.



Les vals sont simulés par des casiers et des filaires secondaires qui représentent les affluents de la Loire et les principaux chemins d'écoulement dans les vals. Chaque casier est défini numériquement par sa superficie et par une courbe $a(Z)$ où a est le pourcentage de la superficie du casier situé sous la cote Z . Cette courbe permet au modèle hydraulique d'utiliser dans ses calculs le volume d'eau susceptible d'être stocké dans la zone inondée.

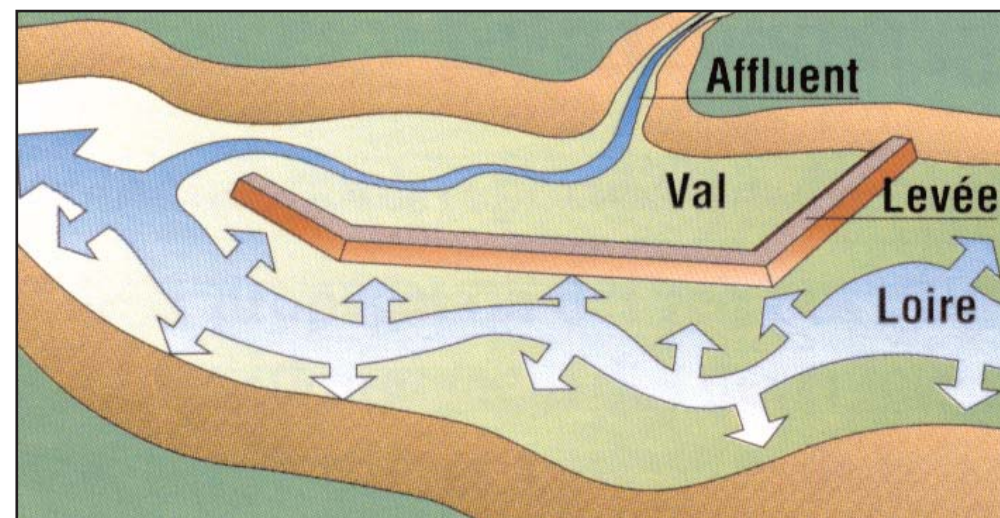
A l'intérieur du val, les échanges filaire - casier et casier - casier sont représentés par :

- Les lois de surverse et d'orifice définies ci-après,
- L'écoulement rugueux de casier à casier : l'eau coule sans obstacle précis, mais les forces de frottement de l'eau sur le terrain sont représentées.

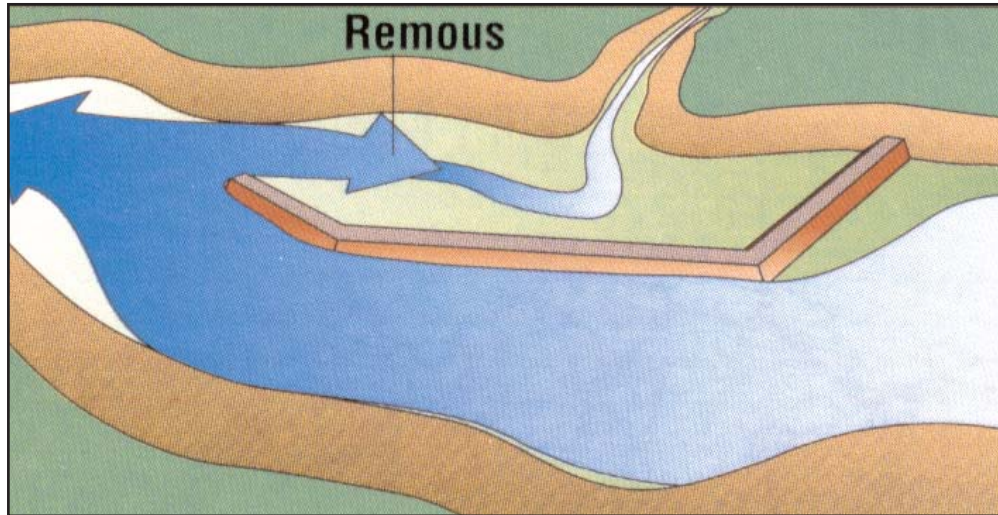
Les mécanismes d'inondation simulés par le modèle

Grâce à ces éléments numériques, plusieurs mécanismes d'inondation sont simulés par le modèle Loire moyenne. Ils correspondent à différentes configurations Loire - levées - système de protection :

- inondation par expansion dans le lit majeur



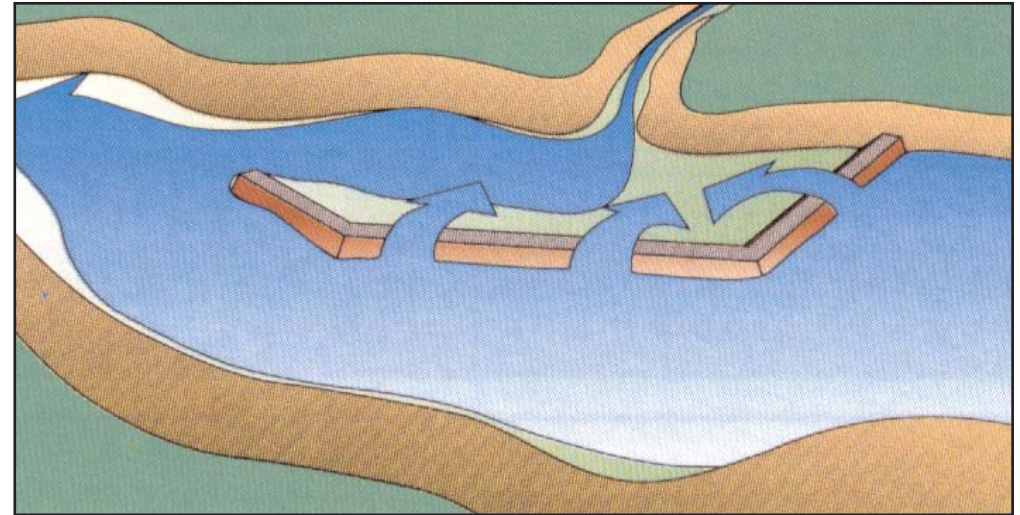
■ inondation du val par remous dans l'affluent,



Tous les vals non fermés à l'aval subissent ce type d'inondation. Le niveau d'eau dans le val est alors égal au niveau en Loire à l'extrémité aval de la levée. La présence de la levée permet de maintenir une différence de niveau entre la Loire et le val et protège donc ce dernier.

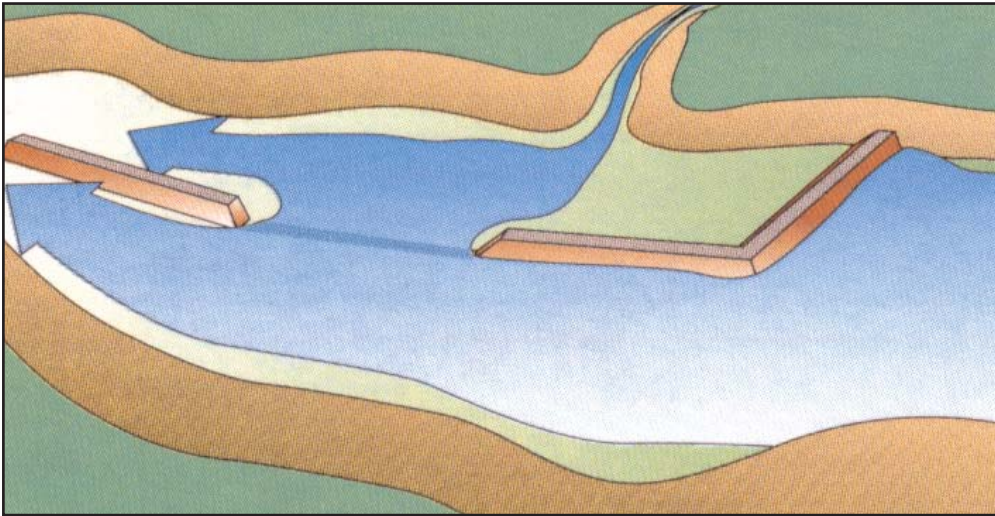
Dans les zones de confluence de deux filaires, l'écoulement change de sens lors des crues, lorsque la montée d'eau en Loire inonde les vals de l'aval vers l'amont. L'inondation par remous est ainsi simulée grâce aux équations de propagation dans les filaires et aux liaisons filaire - casiers à l'intérieur du val.

■ Inondation du val par surverse par-dessus la levée,



Ce type d'inondation a été simulé pour des vals déjà inondés par remous lorsque la Loire atteint le sommet de la levée. La présence d'eau des deux côtés de l'ouvrage limite alors les risques de déstabilisation, c'est pourquoi on a simulé des surverses et non pas des brèches.

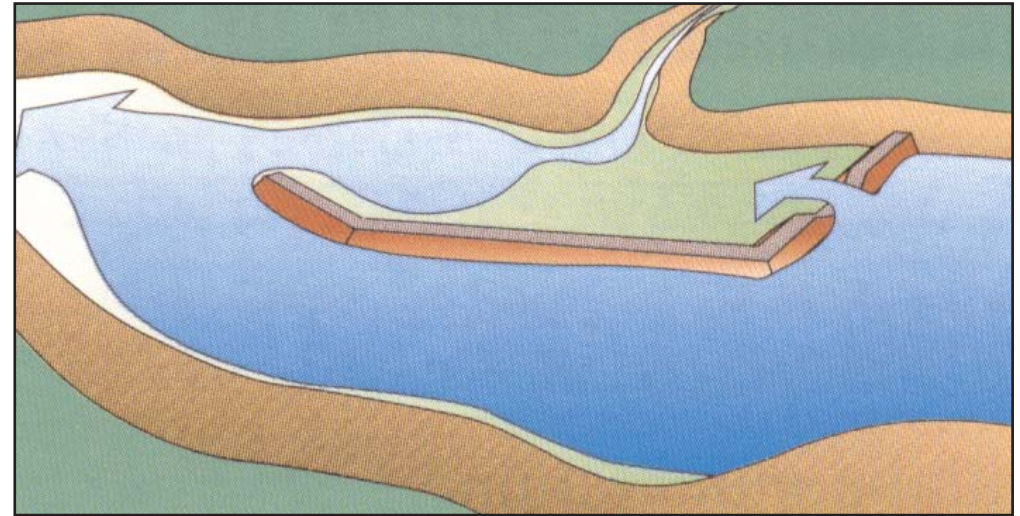
■ inondation du val par fonctionnement d'un déversoir au terrain naturel



Il y a trois déversoirs de ce type : le déversoir de Passy dans le val de La Charité, le déversoir de la Madeleine dans le val de Léré et le déversoir de Gohier.

Ce type de déversoir est représenté par des liaisons Loire - val définies par une loi de surverse dont la cote est celle du terrain naturel.

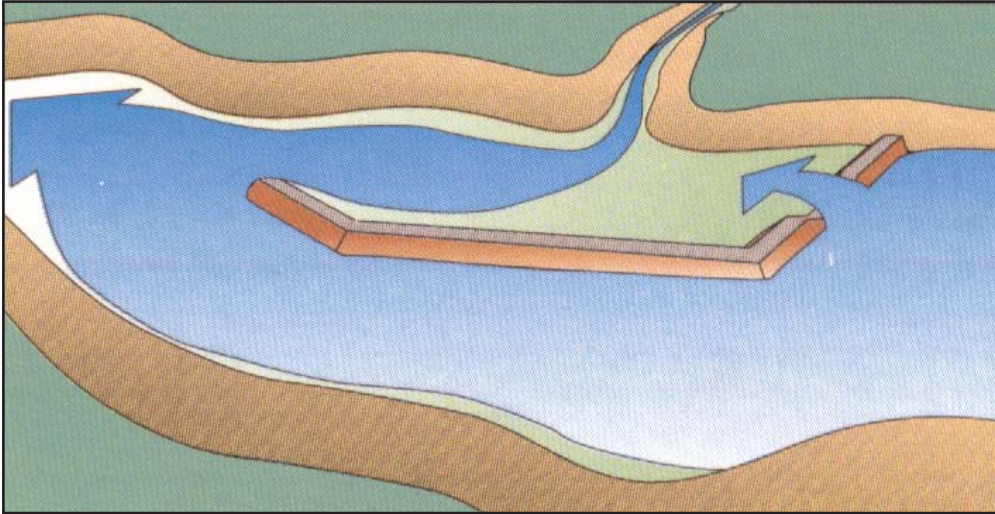
■ inondation du val par fonctionnement d'un déversoir simple, plus haut que le terrain naturel, sans fusible



Il y a cinq déversoirs de ce type : le déversoir du Bec d'Allier dans le val du même nom, le déversoir de Saint-Martin-sur-Ocre dans le val de Gien, le déversoir de Dampierre dans le val du même nom, le déversoir de Mazan dans le val d'Ardoux et le déversoir de La Bouillie dans le val de Blois.

Ce type de déversoir est représenté par des liaisons Loire - val définies par une loi de surverse dont la cote de déclenchement est calée au niveau du point bas du seuil déversant.

■ inondation du val par fonctionnement d'un déversoir plus haut que le terrain naturel, équipé d'un fusible

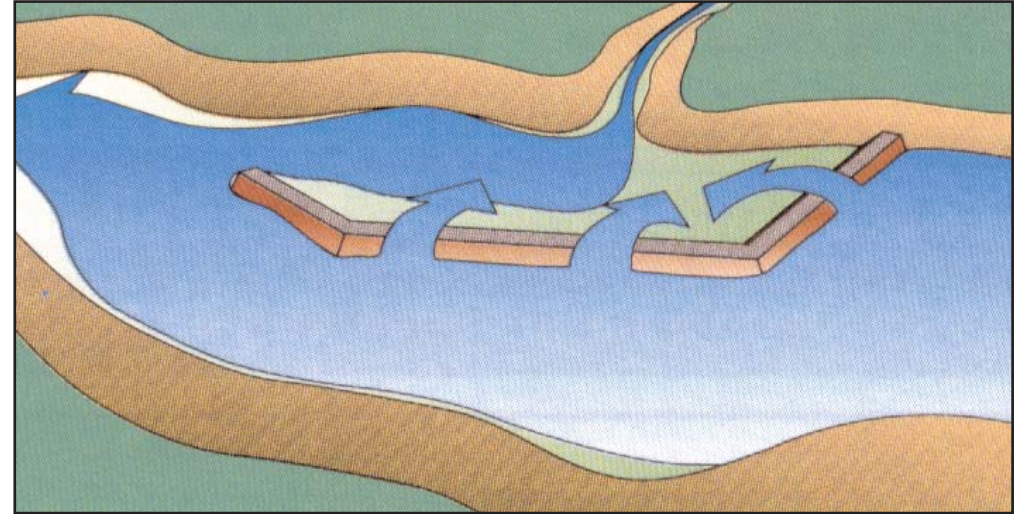


Il y a cinq déversoirs de ce type : le déversoir d'Ouzouer dans le val du même nom, le déversoir de Jargeau dans le val d'Orléans, le déversoir d'Avaray dans le val du même nom, le déversoir de Montlivault dans le val de Blois, les déversoirs du Vieux Cher et de La Chapelle-aux-Naux dans le val de Bréhémont.

La cote de déclenchement de la liaison de type fusible est calée au niveau du point bas du fusible. Lorsque la Loire atteint ce niveau de déclenchement, le fusible s'efface progressivement en 10 heures, jusqu'au niveau du seuil fixe et le débit entrant est défini par une loi de surverse sur ce niveau de seuil.

Lorsqu'un déversoir équipé de fusible est représenté par une série de liaisons de ce type, le déclenchement d'une des liaisons entraîne le déclenchement de toutes les autres.

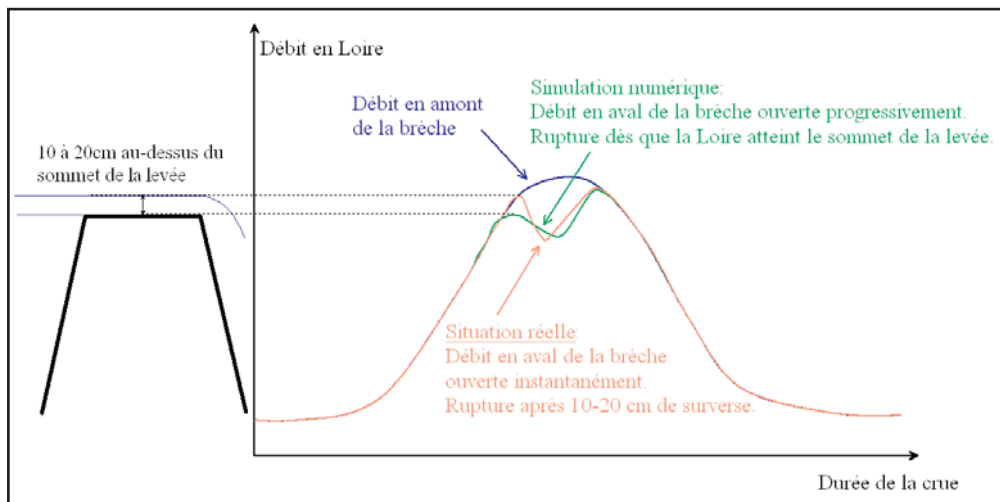
■ Inondation du val par ouverture d'une brèche dans la levée suite à une surverse,



Ce type de brèche apparaît lorsque le niveau d'eau dépasse la cote de crête de la digue. La lame d'eau déversante peut alors attaquer le talus par érosion régressive, et engendrer une brèche dans la levée. Il s'agit de la première cause identifiée de rupture en Loire lors des trois crues du XIX^{ème} siècle.

Les brèches par surverse sont modélisées par des liaisons qui se déclenchent lorsque le niveau d'eau en Loire dépasse le sommet de la banquette de la levée. Une fois la surverse détectée, le modèle ouvre une brèche en fixant le niveau de la liaison Loire-val au pied de la levée et en augmentant progressivement la largeur de la liaison jusqu'à atteindre 200 m de large, longueur moyenne calculée des brèches causées par le passage des crues de 1856 et 1866 en Loire moyenne. Cette longueur moyenne est le fruit d'un travail sur les Archives réalisé préalablement par l'Equipe.

Les principaux vals inondés suite à la surverse généralisée de la levée ou à l'apparition de brèches sont ceux de Cours-les-Barres, La Charité amont, Léré, Briare, Sully, Langeais et Authion. Dans le val d'Orléans, le modèle détecte une brèche suite à une surverse au niveau d'un point bas de la levée avant le déclenchement du déversoir de Jargeau.



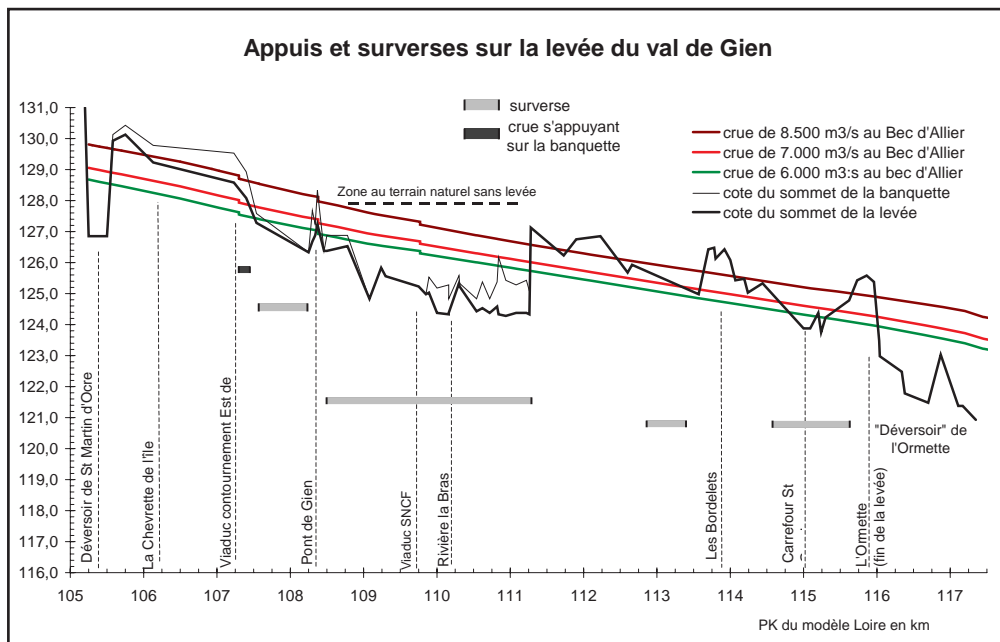
L'ouverture progressive des brèches et des fusibles

Dans la réalité, il est probable que les brèches dans la levée de protection s'ouvriront dans un délai court, inférieur à l'heure. Il en est de même pour l'ouverture des fusibles des déversoirs. Pour des raisons de stabilité numérique du modèle, il n'est pas possible de simuler une ouverture si rapide de ces ouvrages. C'est pourquoi l'ouverture des brèches a été simulée de manière progressive sur 12 heures, et l'effacement des fusibles des déversoirs sur 10 heures.

Ce choix de simulation a pour conséquence de diminuer, au début de l'effacement de l'ouvrage, le débit instantané qui entre dans le val, soit par la brèche, soit par le déversoir équipé d'un fusible durant leur ouverture. Après 6 à 10 heures, le modèle introduit dans le val autant d'eau que dans la réalité.

D'autre part, le modèle déclenche l'ouverture d'une brèche ou l'effacement d'un fusible dès que la Loire atteint le point bas du sommet du tronçon de levée ou de banquette considéré. Or dans la réalité, il est plus que vraisemblable que la rupture totale n'ait lieu que lorsque 10 à 20 cm d'eau verseront sur le flanc de la levée ou du fusible, et qu'elle survienne donc plus tard que ce qu'indique le modèle. De ce point de vue, il est donc possible que dans certains cas, le modèle surestime légèrement le volume d'eau entrant dans le val.

Devant la difficulté de prévoir avec précision le comportement des levées face à la submersion, qui diffère d'une levée à l'autre et selon que la levée est équipée ou non d'une banquette, le type de modélisation retenu pour l'étude est donc un bon compromis : il traduit nettement l'effet de la brèche ou de l'effacement du fusible sur la propagation de la crue en Loire.



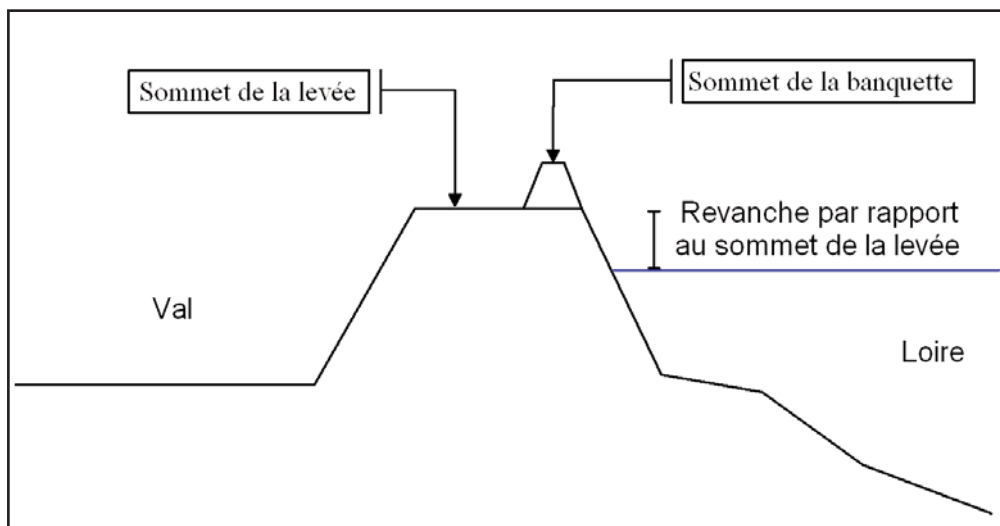
Les résultats fournis par le modèle sur le niveau de sollicitation des levées

Le modèle fournit également des résultats essentiels sur la sollicitation hydraulique des levées sous la forme de profils en long.

La comparaison entre le profil en long des lignes d'eau des différentes crues simulées et du profil en long de la levée et de la banquette permet de calculer :

- la revanche le long des vals. Cette hauteur correspond à la différence de niveau entre le sommet de la levée et la Loire.
- Les hauteurs d'appuis sur banquette et la longueur des tronçons concernés pour chaque crue.
- Les hauteurs de surverses et la longueur des tronçons concernés pour chaque crue.

Pour chaque val, un bilan de ces résultats a été réalisé ainsi qu'une cartographie des secteurs exposés aux appuis sur banquette et aux surverses. (Renvoi à la partie 2)



Ce que le modèle ne simule pas : les brèches accidentelles

Le modèle ne prend en compte que les brèches par surverse. Dans la réalité, d'autres facteurs sont susceptibles de déclencher l'ouverture de brèches accidentelles dans la levée :

- Brèche par rupture des banquettes : La banquette, d'une hauteur variable de 0,3 mètres à plus d'un mètre, surélève la digue au moyen d'une levée de terre étroite ou d'un mur en maçonnerie. Elle peut se rompre pour deux raisons principales : la liaison digue - banquette n'est pas assez structurée pour résister à des sous-pressions ou la banquette présente une instabilité d'ensemble vu sa constitution fragile ou à cause des désordres subis au cours des décennies. Sa destruction peut entraîner la rupture de la levée par surverse. Le modèle ne simule pas ce type de rupture. Il pourrait techniquement le faire mais il est difficile de décider où et au nom de quoi déclencher une rupture avant la surverse sur une banquette. L'étude a néanmoins permis de détecter les zones d'appuis sur banquette où ce risque existe.
- Brèche suite à des érosions de talus et à des affouillements : Les talus des levées, surtout lorsqu'elles sont au contact du lit actif du fleuve, subissent des courants hydrauliques puissants qui peuvent provoquer des érosions à la base des talus. Ces dernières sont capables d'entraîner des glissements en masse du corps de digue coté fleuve jusqu'à l'ouverture d'une brèche. Ce mécanisme a été mis en évidence de façon formelle pour les crues du XIX^{ème} siècle.

- Brèche consécutive à la formation de renards hydrauliques : Lorsqu'une crue impose un niveau d'eau élevé sur la digue coté fleuve, l'hétérogénéité de perméabilité du corps de digue peut y provoquer des cheminements d'eau préférentiels. Ils sont susceptibles de chasser des matériaux du corps de digue coté val, en formant une galerie à travers la levée : le renard hydraulique. Son développement peut induire l'effondrement de la levée. Ce mécanisme a également été mis en évidence pour les crues du XIX^{ème} siècle.
- Brèche suite à l'instabilité d'ensemble de la levée : Le risque d'instabilité d'ensemble concerne principalement des levées étroites avec des talus raides, non drainés, de compacité faible. La brèche traduit le fait que l'ouvrage n'est finalement pas capable de résister au passage d'une crue forte.
- Brèche suite à un embâcle végétal : Certaines levées portent suffisamment de végétation sur leur parement ou à leur pied pour bloquer des corps flottants à la dérive et provoquer un embâcle végétal qui pourrait éventuellement endommager gravement la levée et provoquer des brèches.
- Brèche suite à un embâcle au niveau d'un pont : Un embâcle au niveau d'un pont ancien présentant un fort taux d'obstruction aux écoulements peut entraîner une surélévation de la ligne d'eau en amont du pont susceptible de générer des risques de surverses et de brèches.

Pour ces quatre dernières causes de brèches accidentelles, la modélisation se heurte non seulement à des difficultés techniques si on souhaite représenter numériquement les phénomènes en jeu, mais aussi à la difficulté de décider en quels sites et selon quels critères il est le plus pertinent d'ouvrir des brèches accidentelles.

Le nombre de facteurs pouvant entraîner l'apparition de brèches, et le caractère imprévisible de la plupart d'entre eux montrent que, même si certains secteurs sont plus sensibles que d'autres, des brèches accidentelles sont susceptibles de s'ouvrir sur la plus grande partie du linéaire de la Loire endiguée.

La prise en compte du comportement géotechnique des levées pour la détection des brèches aurait nécessité, d'une part, la réalisation d'une campagne de mesure très lourde sur les 600 km de levée représentés dans le modèle, et d'autre part, une modélisation très fine de l'ensemble de ces levées. Il faut savoir qu'à l'heure actuelle, un outil spécialisé dans ce type de modélisation nécessite 12 heures de calculs pour un tronçon de levée long de 20 km.

Il n'était donc pas envisageable d'intégrer un volet géotechnique à la simulation des écoulements des crues fortes et très fortes de la Loire. Pour simuler une brèche plutôt qu'une autre, il aurait fallu élaborer un outil pour justifier la cohérence du choix de telles situations, ce qui n'est pas envisageable aujourd'hui au vu de la multiplicité des facteurs en présence.

Dans ces conditions, il a fallu faire le choix de se limiter à la simulation des risques prévisibles, c'est-à-dire des phénomènes qui peuvent apparaître physiquement, dont on peut savoir où ils vont apparaître, et dont on peut modéliser les conséquences de manière fiable, cohérente et reproductible sur tout le cours de la Loire. C'est pourquoi seules les brèches par surverse ont été modélisées.

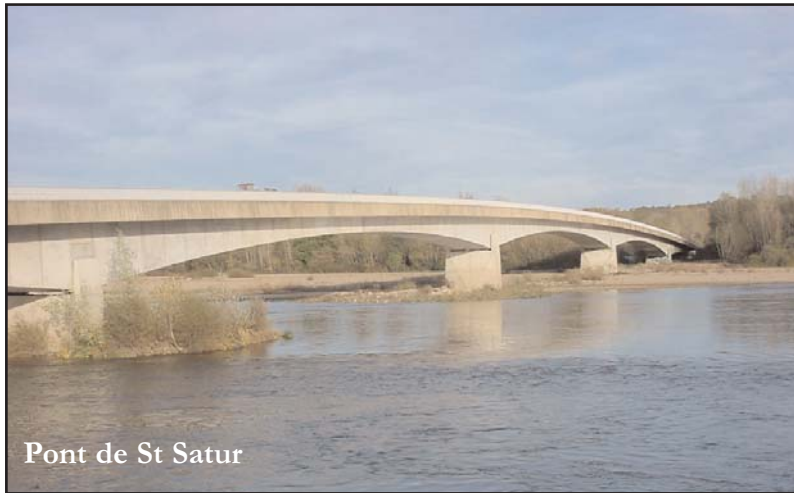
Cependant, parallèlement à la modélisation, les zones les plus sensibles au risque de brèche accidentelle ont été répertoriées. Il s'agit des zones de contact entre le lit mineur de la Loire et le pied de la levée, qui sont des zones d'érosion préférentielle, des sites de brèches historiques, des tronçons de levées les plus vétustes, ou encore ceux où le lit de la Loire s'est beaucoup enfoncé.

La modélisation donne donc volontairement une image de l'inondation prévisible, et l'exploitation des résultats n'a de sens que si on considère qu'un certain nombre de facteurs aggravants sont susceptibles de se produire.

Modèle Hydra 1998 Loire moyenne

Comportement des ponts en crue

On distingue plusieurs types de ponts. Les ponts modernes tel que le pont de St Satur. Ces ponts possèdent de larges travées, peu de piles et présentent un faible coefficient d'obstruction. On en dénombre 47 en Loire moyenne.



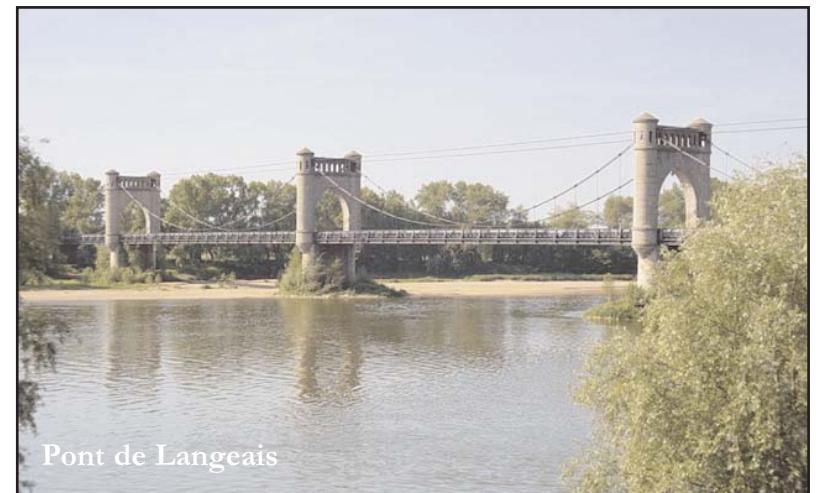
Pont de St Satur



Pont de l'Europe à Orléans



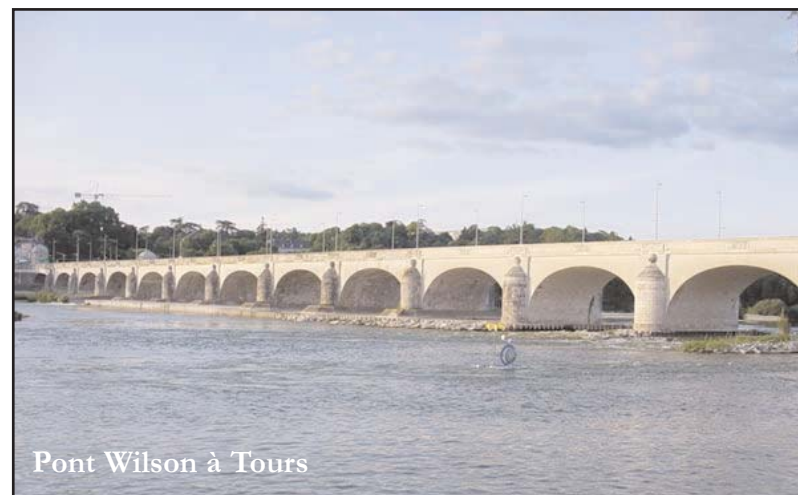
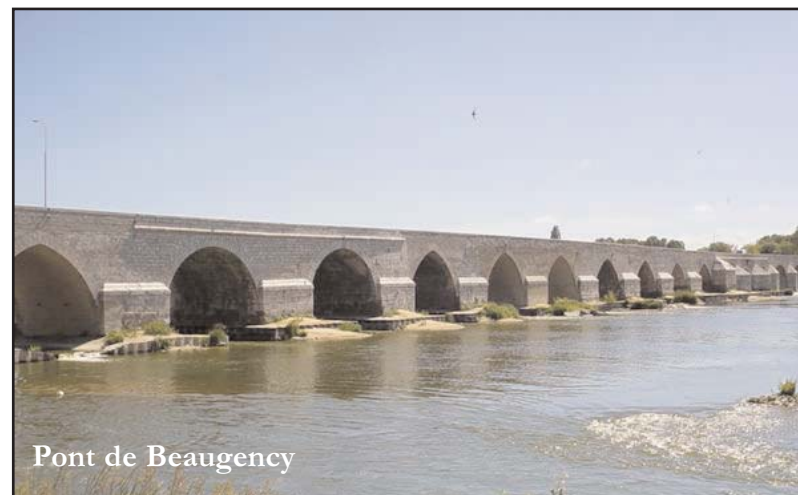
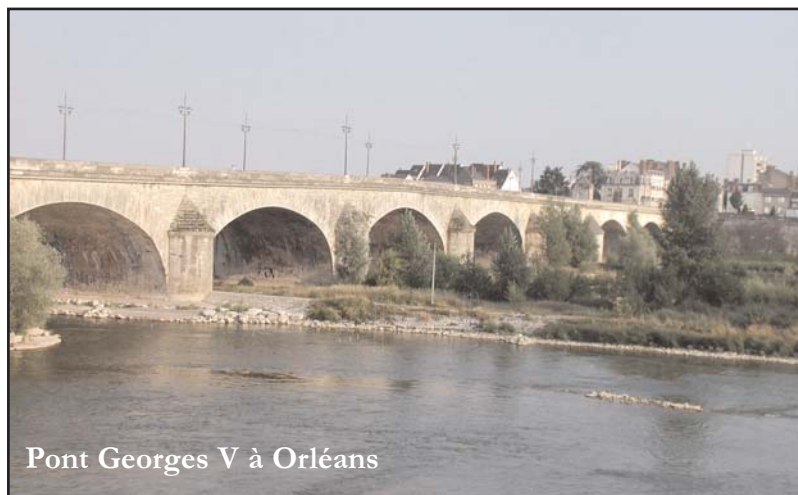
Pont de Fourchambault



Pont de Langeais

Les ponts anciens tels que le pont Georges V à Orléans ou le pont de Beaugency. Ces ponts possèdent de nombreuses piles et présentent un coefficient d'obstruction important en crue. On dénombre 15 ponts anciens.

Au total, 62 ponts franchissent la Loire moyenne entre le Bec d'Allier et Montjean.



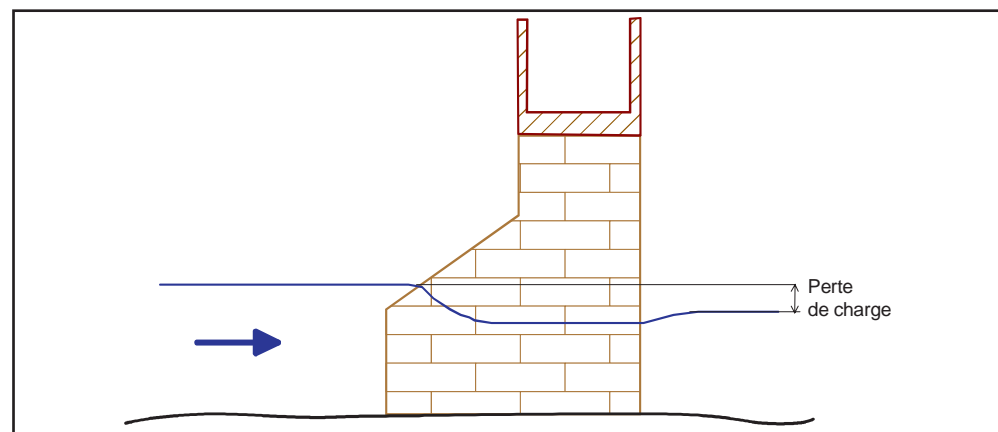
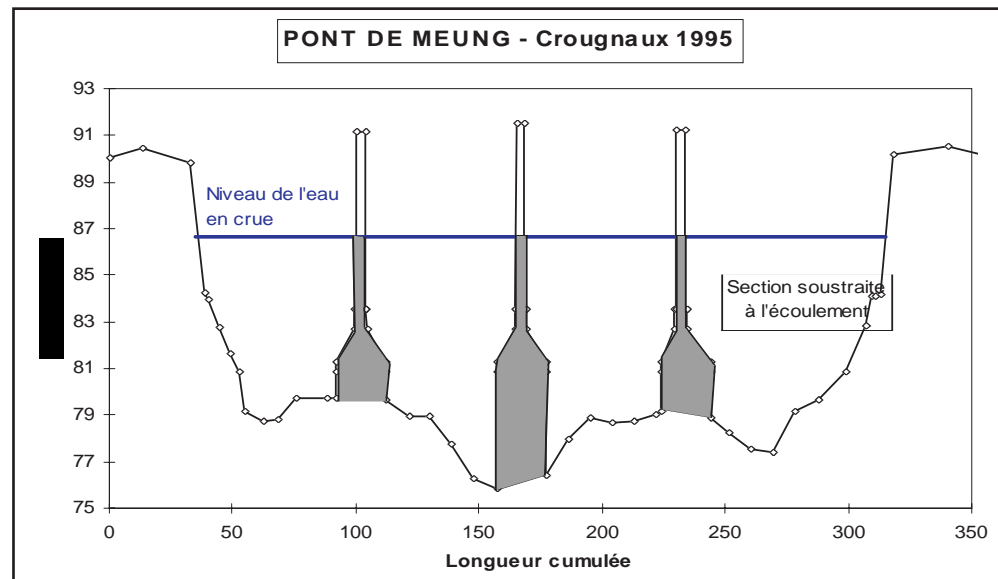
Les 15 ponts anciens de la Loire moyenne sont listés dans le tableau ci-dessous :

Ponts	PK (km)	Cote sous poutre	
		mini (m)	maxi (m)
La Charité	35.15	161.50	163.25
Pont Canal	98.34		133.95
Gien Centre	108.38	127.50	131.45
Orléans SNCF	179.65	99.65	99.80
Orléans Georges V	180.94	98.80	100.55
Beaugency	206.50	83.40	86.20
Blois Centre	240.40	71.60	76.55
Amboise	274.87	59.55	61.85
Tours Pont Wilson	298.34	52.60	52.75
Saint Cyr Sur Loire	301.31	51.60	52.80
Cinq Mars La Pile	315.50	46.20	47.50
Port Boulet	343.58	37.70	
Saumur Pont Cessart	363.50	32.50	33.10
Ponts de Cé	404.50	22.90	24.50
Possonières SNCF	422.25	19.90	21.56

Comportement des ponts

Les piles de ponts, et les culées d'accès au pont forment un obstacle à l'écoulement de la Loire et un rétrécissement de la section. Ils provoquent une surélévation de la ligne d'eau à l'amont.

L'incidence du pont sur la ligne d'eau dépend de l'encombrement des piles et de la culée et de la vitesse de l'écoulement.



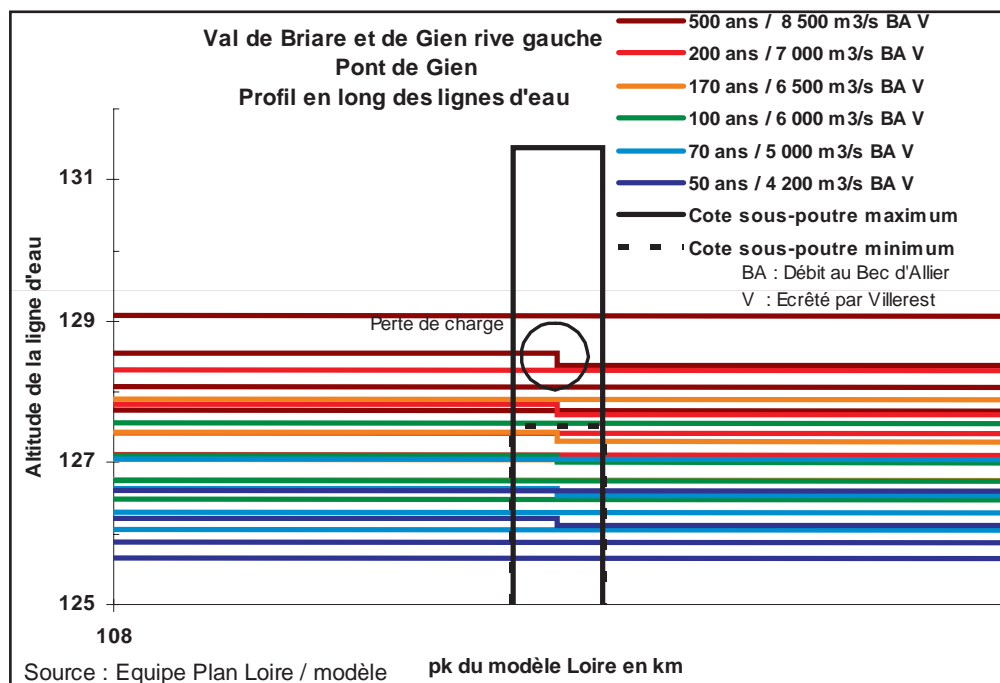
Modélisation des ponts

Les ponts ont été représentés par une loi débit- perte de charge.

Cette loi de perte de charge a été calculée :

- Par la méthode de Bradley de l'US Geological Survey pour les ponts modernes.
- Par la formule de Rehbock pour les ponts anciens. Cette formule prend en compte le taux de réduction des sections, les caractéristiques des piles et de la vitesse d'écoulement.

Les effets d'un pont sont visibles sur un profil en long des lignes d'eau.



Ce que le modèle ne prend pas en compte,

Le modèle ne représente pas les effets locaux que peut avoir le pont sur l'écoulement : ressaut, tourbillon, ni les effets d'affouillement autour des piles. L'augmentation de section pendant la crue due à la remobilisation des sédiments n'est pas représentée dans le modèle ; au droit des ponts ce phénomène est peu probable à cause de l'absence de sédiments sous les ponts.

Un embâcle au niveau d'un pont ancien de la Loire pourrait créer une perte de charge locale importante avec pour conséquences une hausse du niveau en Loire en amont du pont et un risque de débordement accru par rapport à la levée adjacente si la revanche n'était pas suffisante. Les sites les plus exposés à ce risque sont le pont de Beaugency, le pont George V, le pont de Gien, le pont Wilson...

Le tablier du pont de Fourchambault est atteint, sans embâcle végétal, par la crue centennale. Toutes les crues plus fortes submergeront le pont et risquent de déstabiliser le tablier.

Sensibilité du modèle Hydra 1998 dans le fleuve et les vals

Evaluer les choix retenus par les ingénieurs lors de la construction du modèle

Les écoulements dans la partie filaire sont régis par la forme naturelle de la rivière (géométrie) et par la présence d'une végétation plus ou moins importante (coefficient de rugosité). Les coefficients de rugosité permettent de caractériser la nature du fond du lit et des berges, la densité de végétation présente dans le lit majeur

Le calage du modèle s'effectue dans la partie filaire en ajustant les coefficients de rugosité dans le lit mineur et le lit majeur de la Loire endiguée, pour que les lignes d'eau calculées soient égales aux lignes d'eau observées.

Les ingénieurs ont comblé le manque de donnée de calage concernant les conditions d'écoulement dans les vals inondés par de fortes hauteurs d'eau en introduisant dans le modèle les coefficients de rugosité leur semblant les plus pertinents pour traduire la rugosité globale de l'occupation du sol.

L'impact de ces choix sur la propagation des crues simulées, a été évalué au moyen de tests de sensibilité.

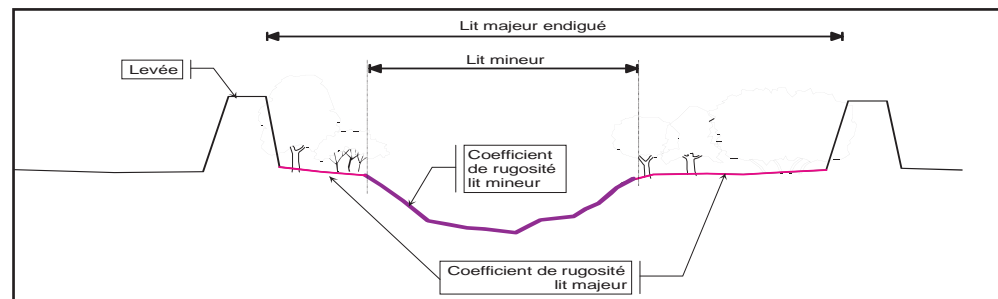
La sensibilité du modèle dans le lit endigué de la Loire

L'écoulement dans les biefs de Loire est caractérisé par deux coefficients de rugosité spécifique : un pour le lit mineur et un pour le lit majeur. Les tests ont consisté à augmenter ou à diminuer de façon homogène une de ces deux rugosités. Les crues de calage, ainsi que la crue de 1982 et la crue de temps de retour 50 ans au Bec d'Allier sont simulées. Ces crues ont pour caractéristique de ne pas solliciter les vals, à l'exception de certaines petites parties des vals de la Loire moyenne amont.

L'analyse des résultats montrent que le modèle est peu sensible dans le lit mineur : l'augmentation du coefficient de rugosité (ce qui est équivalent à diminuer la végétation et améliorer les conditions d'écoulement) entraîne l'abaissement de la ligne d'eau et l'augmentation des débits de pointe. Il en résulte une accélération de la propagation du débit de pointe.

Pour une augmentation du coefficient de rugosité de cinq unités en lit mineur, l'abaissement de la ligne d'eau est de l'ordre de 35 cm; l'impact sur les débits n'est que de l'ordre de quelques m^3/s . Le lit majeur est moins sensible. Pour une augmentation du coefficient de rugosité de cinq unités en lit majeur, l'abaissement de la ligne d'eau est inférieur à 10 cm.

Cela montre que, à l'échelle globale de la Loire moyenne, les résultats du modèle sont peu sensibles aux variations des coefficients de rugosités.

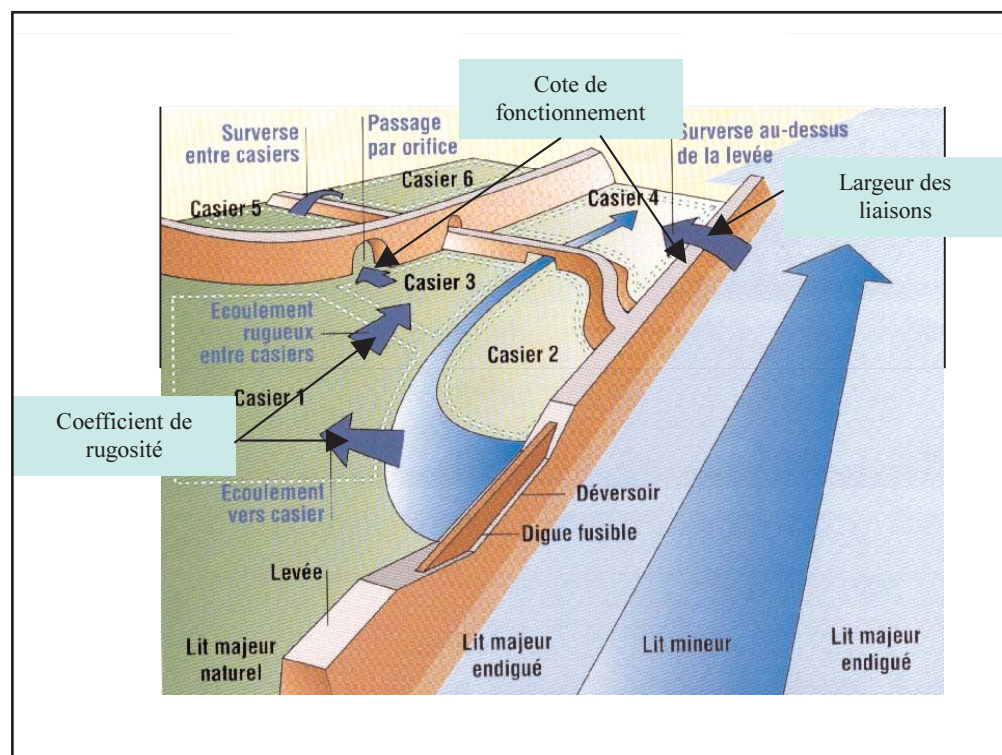


La sensibilité du modèle dans les vals

Dans les vals, les échanges de débits sont contrôlés par des liaisons de différentes natures. Toutes ces liaisons ont comme paramètres communs une largeur et des cotes de fonctionnement.

Afin de modéliser le fonctionnement du système de protection par levée et déversoir et l'écoulement dans les vals, des choix ont du être réalisés :

- une largeur des brèches identiques à celles observées durant les crues du 19^e siècle,
- l'ouverture des brèches dès que l'eau atteint le sommet de la levée,
- l'introduction d'un coefficient de rugosité traduisant l'écoulement dans les vals.



Afin d'évaluer la sensibilité des liaisons, une série de scénarios a été élaborée avec les hypothèses suivantes :

- Les largeurs de toutes les liaisons sont réduites de 10 %, 25 % et 50 %,
- Les cotes de fonctionnement sont augmentées de 20 cm puis de 40 cm,
- Tous les coefficients de Manning-Strickler introduits dans le modèle sont augmentés de 130 % lorsqu'ils simulent des liaisons rugueuses entre les casiers.

La crue synthétique de temps de retour 500 ans au Bec d'Allier qui déclenche la plupart des liaisons et la crue de temps de retour 100 ans au Bec d'Allier qui est la première crue avec apparition de brèches sont simulés.

L'analyse synthétique des résultats montre que la réduction de la largeur des liaisons ou l'augmentation des cotes de fonctionnements modifie peu la propagation de la crue à l'échelle de la Loire moyenne et les niveaux d'eau. Les écarts de cotes et de débits importants sont localisés sur les sites où les brèches sont en limite de fonctionnement (ouverture d'une brèche supplémentaire).

Il est ainsi démontré que les choix de modélisation représentent correctement les mécanismes d'inondation et de propagation des crues à l'échelle de la Loire Moyenne.

L'augmentation des coefficients de rugosité de plus de 100 % accroît les débits de 1 à 3 % seulement.

Il est ainsi démontré, pour les écrêtements des crues, c'est d'avantage le volume de stockage qui intervient dans les vals que ce qui influence la propagation dans le val (haies, obstacles, etc.).

Le modèle construit répond donc bien à la problématique posée.

Précision et sensibilité

La précision d'un modèle numérique dépend de la qualité de son calage.

Les incertitudes sur la connaissance topographique de la rivière et des ouvrages, sur le moment de la lecture et sur la lecture des échelles de crue, sur la connaissance des débits de crue écoulés font que le calage n'est jamais parfait.

La précision du modèle Loire moyenne, dans sa partie filaire, est de 25 cm environ. Cela signifie qu'une crue réelle identique à celle simulée par le modèle, qui en calcule la cote de 40,5 m en un point précis, devrait dans la réalité apparaître entre 40,25 m et 40,75 m.

Les tests de sensibilité permettent d'examiner dans quelle mesure la propagation des débits de la Loire dépend des paramètres utilisés pour représenter les mécanismes d'inondation.

Les tests de sensibilité montrent que, à l'échelle globale de la Loire moyenne, les résultats du modèle sont peu sensibles aux variations d'une des grandeurs utilisées et que le modèle est donc très robuste.

Apparition et détection du maximum

La détection du maximum est difficile et importante

Le service d'annonce de crue confié à la DIREN Centre a pour mission, entre autres, de surveiller les variations de débit de la Loire et de ses affluents (système CRISTAL), et de prévoir les crues et les étiages (avec annonce de crue sur une partie du bassin et consigne de gestion de deux barrages).

Il s'agit de recueillir et de traiter les données pluviométriques et de niveaux d'eau dans le bassin versant de la Loire pour prévoir, par exemple, les niveaux d'eau qui seront atteints en aval à 24 et 48 heures.

Lorsque certains niveaux seuil sont atteints et dépassés, le service se met en état de vigilance. Il assure une prévision plus soutenue et informe les services de la préfecture qui décident d'alerter les maires. Une information régulière est ensuite mise à disposition des maires tout au long de l'événement.

La prévision et la détection du maximum de la crue en Loire sont utiles pour préciser les moyens de protection (fermetures de routes, protections locales, voire évacuations de personnes) et les dispositifs de secours à mettre en place et pour informer sur le déroulement de l'événement.

Pour la Loire moyenne, le modèle a mis en évidence un fonctionnement par paliers avec des mécanismes d'inondation différents selon la nature de la crue mais dans une fourchette de débit relativement étroite.

La mesure du débit de la Loire

L'évaluation du débit est réalisée sur des sites spécifiques le long de la Loire ayant fait l'objet d'un jaugeage.

Les jaugeages, réalisés par la DIREN, sont des mesures de débit du fleuve corrélées à la lecture du niveau d'eau à l'échelle hydrologique. Ils permettent de réaliser une courbe donnant le débit en Loire en fonction de la hauteur mesurée à l'échelle. Cette courbe est appelée " courbe de tarage ".

Pour obtenir une courbe de tarage fiable, il est nécessaire d'obtenir le plus possible de couples de points [débit ; hauteur]. Il est donc important de réaliser des jaugeages pendant les crues. Dans ces conditions, les sites les plus adaptés aux jaugeages sont bien sûr les ponts qui enjambent la Loire.

Le long de la Loire moyenne, les échelles d'annonce de crue, où sont faites ces mesures, se situent à Givry, Gien, Orléans, Blois, Tours, Langeais, Saumur et aux Ponts-de-Cé.

Les sites adaptés à la détection du maximum

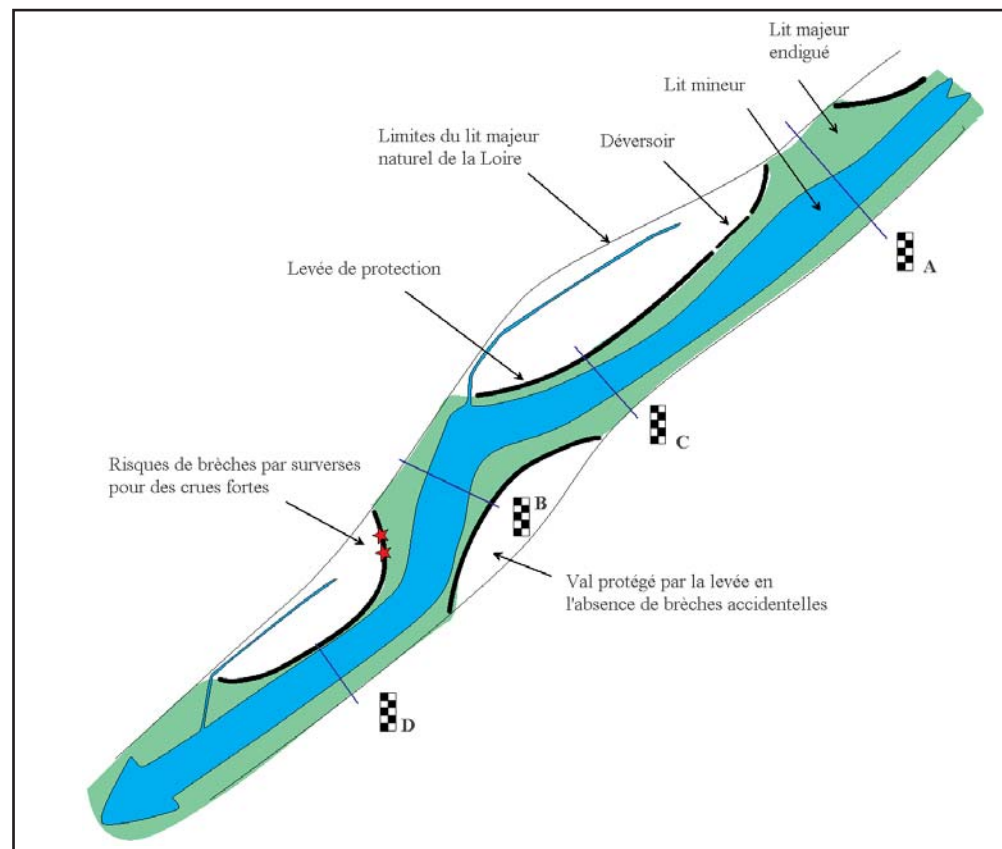
Lors des crues fortes et très fortes de la Loire, le fleuve sort de son lit endigué et inonde les vals, soit suite au fonctionnement de déversoirs, soit suite à des surverses par-dessus la levée de protection ou à l'ouverture de brèches dans la levée.

Dans ce cas, une partie du débit ne passe plus dans le lit endigué au droit des échelles hydrologiques mais dans les vals. Le suivi de la crue aux échelles ne permet alors pas d'estimer la totalité du débit de la crue, ni de détecter le passage du maximum puisqu'il peut passer à deux moments différents dans la Loire et dans le val.

Le modèle Loire moyenne a permis de mieux comprendre les mécanismes d'inondation des différents vals et de mettre en avant les tronçons du lit majeur endigué de la Loire où passe tout le débit lors des crues.

Les échelles de crue de la Loire peuvent être classées en quatre catégories :

- Type A : L'échelle est située sur un tronçon non endigué de la Loire. Quelle que soit la crue, tout le débit passe dans la section jaugée au droit de l'échelle.
- Type B : L'échelle est située au droit d'un val pour lequel le modèle ne détecte pas de surverses y compris pour la crue cinq-centennale au Bec d'Allier. En l'absence de brèches accidentelles dans la levée, tout le débit passe donc dans le lit endigué même pour des crues très fortes.
- Type C : L'échelle est située en aval d'un déversoir. Lorsque le déversoir fonctionne, une partie du débit s'écoule dans le val.
- Type D : L'échelle est située au droit d'un val pour lequel le modèle détecte des surverses donnant lieu à l'ouverture de brèches. Ces zones de surverse ont été identifiées grâce à la modélisation.



Les échelles de catégorie A (sur des tronçons de lit majeur naturel) et B (au droit de val réputés " insubmersibles ") sont les plus adaptées au suivi de la crue et à la détection du maximum.

Les échelles de type C (au droit d'un val équipé d'un déversoir) sont fiables à condition de pouvoir estimer le débit qui passe sur le seuil du déversoir. Pour cela, il est nécessaire que les déversoirs soient équipés d'échelles permettant de mesurer la hauteur d'eau sur le seuil et d'en déduire, à partir des caractéristiques géométriques de l'ouvrage, le débit déversé.

Les échelles de type D deviennent ininterprétables dès lors que des surverses ou des brèches apparaissent dans la levée du val en amont de l'échelle. La forme des brèches étant aléatoire, il est difficile, voire impossible, de détecter le passage du maximum.

Echelle d'annonce de crue	Type	Événement "perturbateur" prévisible	Période de retour au Bec d'Allier
Givry	D	Apparition de brèches	200 ans
Gien	C	Déclenchement du déversoir de Saint-Martin-sur-Ocre	- de 50 ans
	D	Apparition de surverses	100 ans
Orléans	D	Apparition de brèches	200 ans
	C	Déversoir de Jargeau	500 ans
Blois	C	Déclenchement du déversoir de La Bouillie	70 ans
	C	Déclenchement du déversoir de Montlivault	170 ans
Tours	B	-	-
Langeais	C	Déclenchement du déversoir du Vieux Cher	70 ans *
	C	Déversoir de La Chapelle-aux-Naux	500 ans*
Saumur	D	Apparition de brèches dans la levée du val d'Authion	500 ans*
Les Ponts-de-Cé	D	Apparition de surverses par-dessus la levée du val de Gohier	100 ans*
<p>* A partir de la confluence du Cher, les événements hydrauliques dépendent non seulement de la crue de la Loire mais aussi des apports des affluents (Cher, Indre, Vienne, Thouet et Maine) qui pourraient être différents de ceux modélisés, correspondant à une crue de type 1856.</p>			

Les échelles d'annonce de crue de la Loire moyenne

Les échelles qui servent à la lecture et à la mesure du débit par courbes de tarage sont listées ci-dessous avec la catégorie à laquelle elles appartiennent et la période de retour de la crue jusqu'à laquelle elles fournissent directement une bonne estimation du débit.

A l'exception de l'échelle de Tours, toutes les échelles d'annonce de crue sont donc soumises à des événements prévisibles de type fonctionnement de déversoir, apparition de surverse ou de brèches qui rendent difficile, voire impossible la mesure d'un niveau corrélé à l'estimation d'un débit.

Echelle d'annonce de crue	Type	Événement "perturbateur" prévisible	Période de retour au Bec d'Allier jusqu'à laquelle l'échelle fournit directement le débit de la Loire
Corcelles	A	-	+ de 500 ans
Poids-de-Fer	A	-	+ de 500 ans
Saint-Satur	A	-	+ de 500 ans
Les Loups	A	-	+ de 500 ans
Dampierre amont	B	-	+ de 500 ans
Châteauneuf	B	-	+ de 500 ans
Mareau	B	-	+ de 500 ans
Le Cavereau	B	-	+ de 500 ans
Cour-sur-Loire	B	-	+ de 500 ans
Onzain	B	-	+ de 500 ans
Montlouis	B	-	+ de 500 ans
Cinq-Mars-la-Pile	B	-	+ de 500 ans
Port-Boulet	B	-	+ de 500 ans*

* A partir de la confluence du Cher, les événements hydrauliques dépendent non seulement de la crue de la Loire mais aussi des apports des affluents (Cher, Indre, Vienne, Thouet et Maine) qui pourraient être différents de ceux modélisés, correspondant à une crue de type 1856.

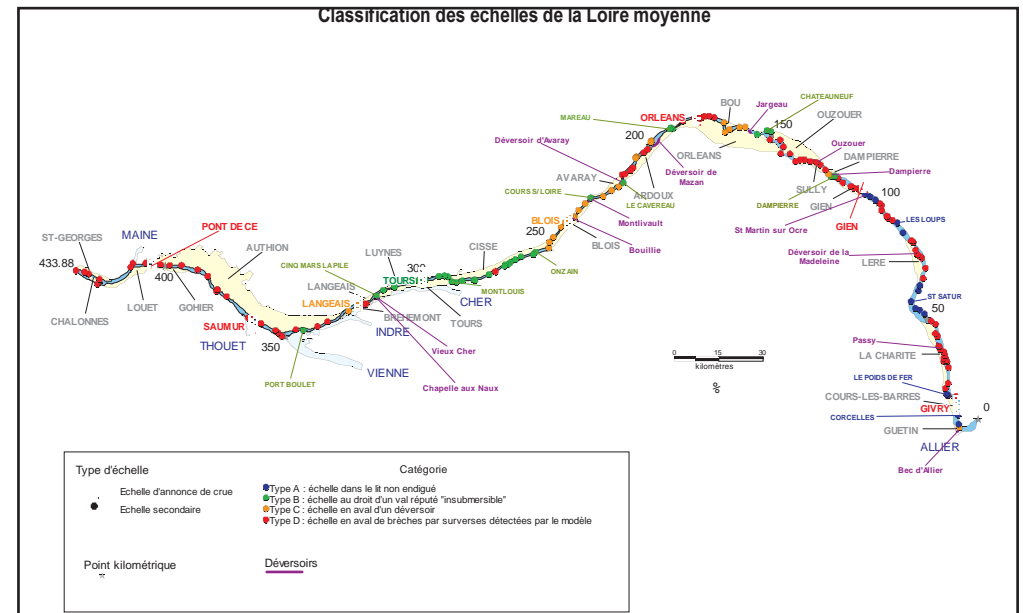
Des sites plus adaptés à la détection du maximum

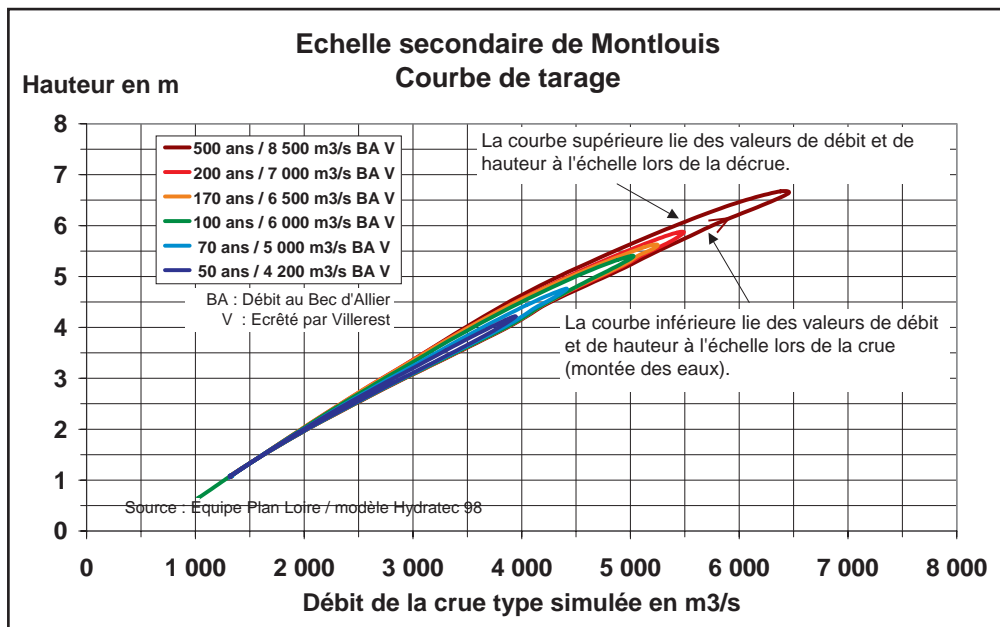
L'étude Loire moyenne a permis de mettre en avant un certain nombre de sites de type A et B où il serait possible de suivre l'évolution de la crue et de détecter le passage du maximum.

Malheureusement, pour la plupart de ces sites, il est impossible pour des raisons pratiques, de réaliser des jaugeages et donc de mesurer le débit de la Loire.

Sur l'ensemble de ces sites, la lecture de l'échelle, même si elle n'est pas corrélée à un débit, permet de rendre compte qualitativement de l'évolution de la crue lorsque les échelles d'annonce de crue, perturbées par l'ouverture d'une brèche ou le fonctionnement d'un déversoir, ne le permettent plus.

Il est donc intéressant, lors des crues fortes de la Loire, de s'appuyer à la fois sur les observations aux échelles d'annonce de crue et aux échelles secondaires répertoriées ici.





La difficulté de détecter le maximum

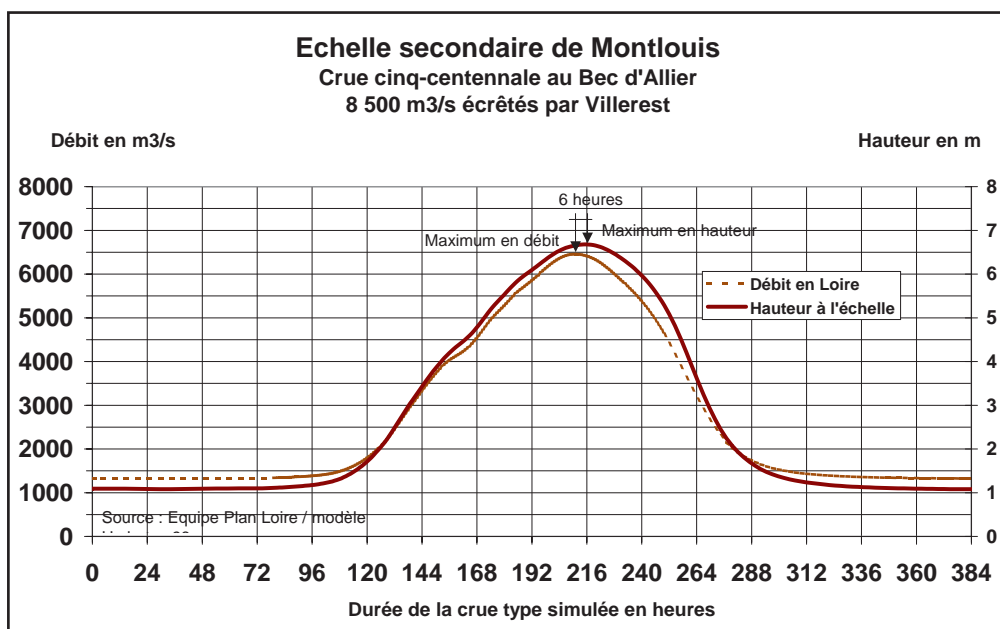
Quel que soit le site de mesure, la détection et la mesure du maximum de la crue présentent des difficultés liées au fait que le maximum en hauteur ne correspond pas toujours au maximum en débit.

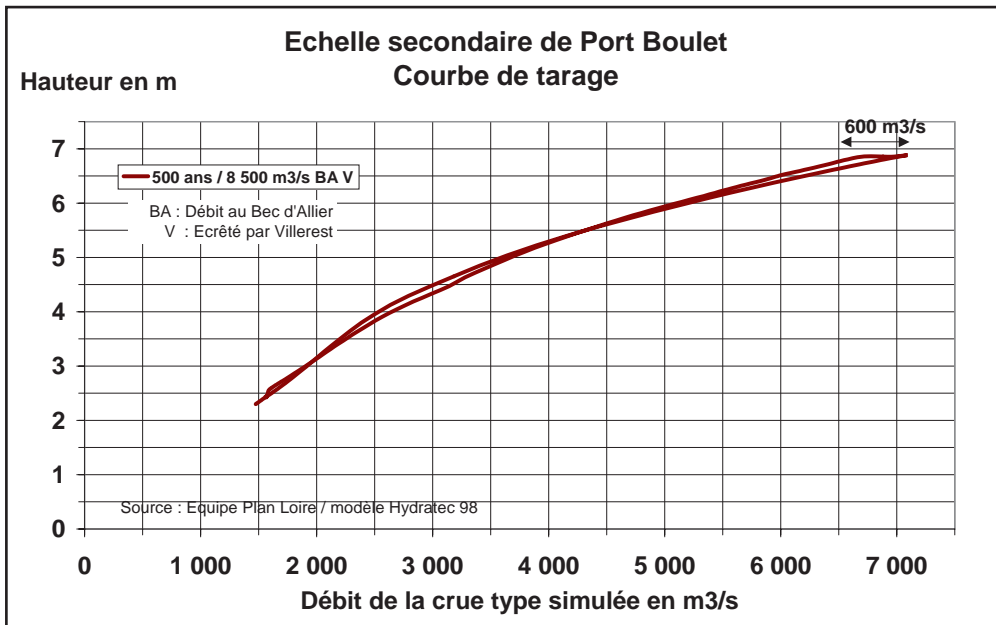
En effet, la relation entre la hauteur d'eau et le débit n'est pas univoque sur un fleuve de l'importance de la Loire. On observe bien ce phénomène dit d'hystérésis sur les courbes de tarage obtenues grâce au modèle : pour un même débit en Loire, la hauteur d'eau est plus forte à la décrue qu'à la montée des eaux.

Ce phénomène lié à des effets dynamiques, est particulièrement sensible dans les zones de remous, en particulier en amont des ponts, sous l'effet du stockage et du déstockage du volume de la crue. Il est d'autant plus prononcé que la montée des eaux est rapide.

La courbe de tarage à l'échelle de Montlouis présente par exemple une hystérésis bien nette pour les six crues simulées :

La forme arrondie de la courbe de tarage au moment du maximum implique que le maximum de débit passe avant le maximum en hauteur à l'échelle. Lorsqu'on constate une baisse de niveau à l'échelle, la décrue est donc déjà amorcée depuis quelques heures.



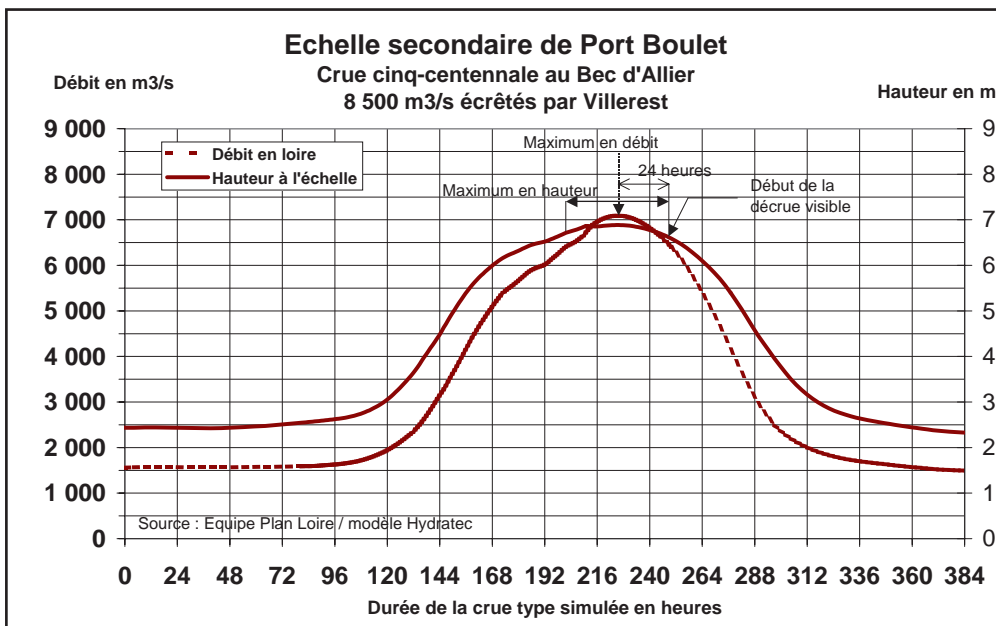


La déformation de la courbe de tarage peut également provenir d'un événement hydraulique influençant la ligne d'eau. Par exemple, si un déversoir se met à fonctionner, ou si une brèche s'ouvre dans la levée légèrement en aval de l'échelle, la hauteur d'eau cesse d'augmenter au droit de l'échelle alors que le débit continue à augmenter. Bien que tout le débit passe au droit de l'échelle, l'évolution de la crue n'est plus visible.

Un exemple concret est celui de l'échelle de Port-Boulet pour une crue cinq-centennale au Bec d'Allier. Le modèle détecte une surverse et ouvre une brèche dans le val d'Authion, à La Chapelle-sur-Loire, quelques kilomètres en aval de Port-Boulet. Le débit continue à augmenter à l'échelle alors que la hauteur se maintient à un niveau pratiquement constant pendant presque deux jours à cause de la brèche.

Lorsque la décrue devient nettement visible à l'échelle, la décrue est déjà amorcée depuis 24 heures en débit. Le maximum de la crue ne peut donc pas être détecté et sera sans doute sous-évalué. La courbe de tarage correspondante montre que pour une même hauteur de 6,8 m environ à l'échelle, le débit peut varier de 600 m³/s entre la montée et la descente de la crue.

La lecture à l'échelle fournira donc, au moment du maximum, un débit en Loire à 600 m³/s près et ne permettra pas de savoir si le débit continue à augmenter ou non.



Conclusion

La prévision et la détection du maximum de la crue en Loire sont utiles pour préciser les moyens de protection (fermetures de routes, protections locales, voire évacuations de personnes) et les dispositifs de secours à mettre en place et pour informer sur le déroulement de l'événement.

Les échelles d'annonce de crue qui se trouvent tout au long de la Loire moyenne permettent de mesurer la crue et d'en déduire des prévisions pour l'aval lors des crues moyennes à fortes de la Loire. Cependant pour des crues très fortes, le fonctionnement des déversoirs et l'ouverture de brèches suite à des surverses par-dessus la levée rendent difficile, voire impossible l'interprétation des mesures de hauteurs d'eau sur la plupart de ces échelles.

Le modèle a permis de mettre en avant les sites où passe tout le débit de la Loire jusqu'à une crue cinq-centennale au Bec d'Allier (en l'absence de brèches accidentelles), et où il est donc possible de suivre qualitativement l'évolution de la crue et de détecter le passage du maximum. Le suivi de ces échelles, en plus de celui des échelles d'annonce de crue, fournit une meilleure compréhension de l'évolution de la crue.