

RAPPORTS

Direction Générale de la
Prévention des Risques

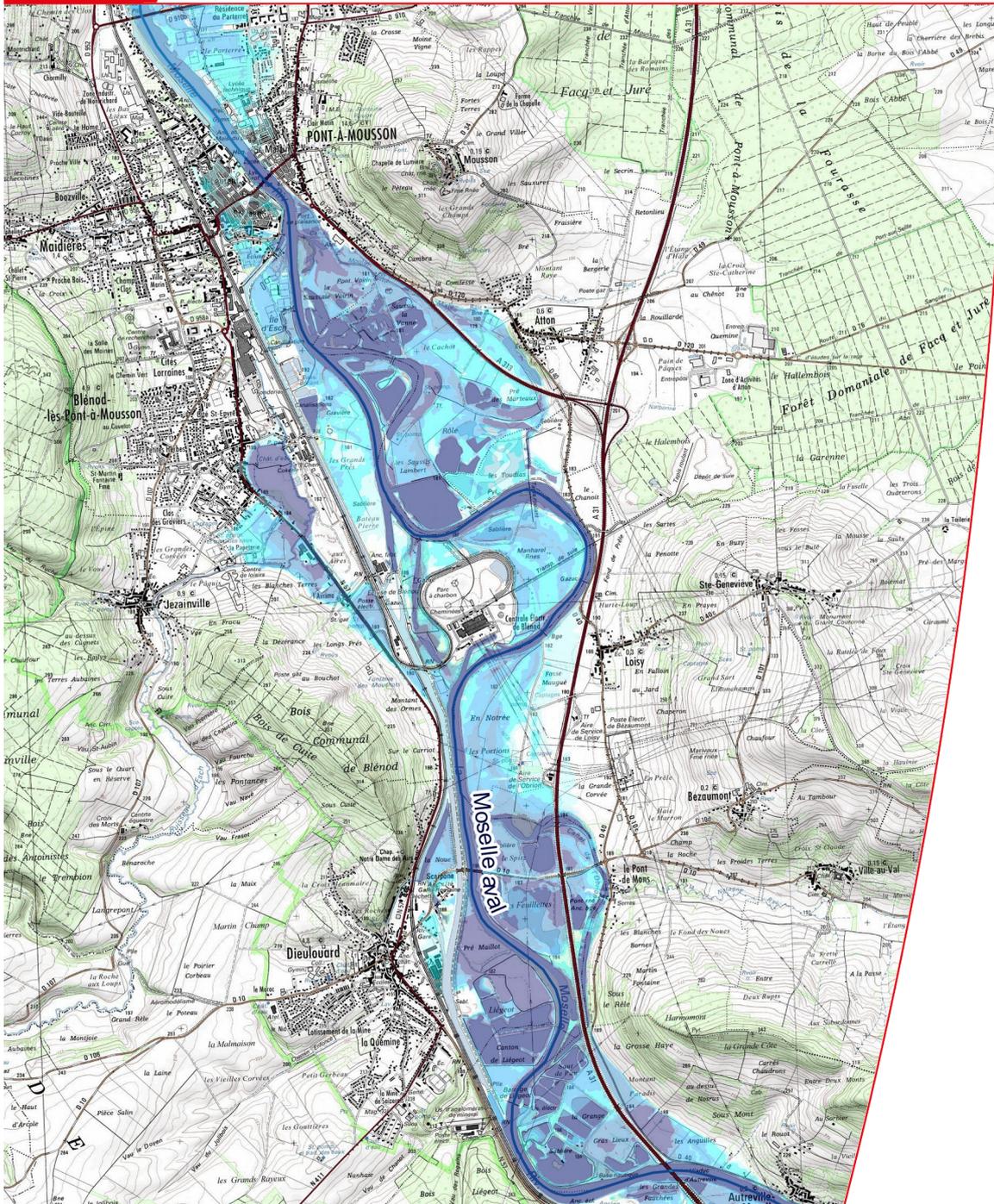
Service des Risques
Naturels et Hydraulique

Service Central
Hydrométéorologique
d'Appui à la Prévision
Inondations

Janvier 2017

Prévision des Inondations

Principes de production des scénarios d'inondation



Ministère
de l'Environnement,
de l'Énergie
et de la Mer

Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

www.developpement-durable.gouv.fr

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
0	25/09/2015	Version de base SCHAPI
1	22/04/2016	Version consolidée SCHAPI
2	06/11/2016	Intégration relecteurs ; compléments PPRi et endiguements
3	09/01/2017	Illustrations et compléments relecteurs
3.1	26/01/2017	Validation

Affaire suivie par

Aurélié ESCUDIER - AC/DGPR/SRNH/SCHAPI/MHO
Tél. : 05.34.63.78.83 / Fax : 05.34.63.85.78
Courriel : Aurelie.Escudier@developpement-durable.gouv.fr

Rédacteurs

Jean-Luc SOULDADIÉ – DGPR/SRNH/SCHAPI/MHO
Aurélié ESCUDIER – DGPR/SRNH/SCHAPI/MHO

Pilotes des groupes de travail méthodologiques

Jean-Nicolas AUDOUY – DREAL Auvergne – Rhône-Alpes / SPC Allier
Philippe FAURÉ – DGPR/SRNH/SCHAPI/MHO
Fabien PASQUET – DREAL Centre Val de Loire / SPC Loire Cher Indre

Relecteurs

Jean-Nicolas AUDOUY – DREAL Auvergne – Rhône-Alpes / SPC Allier
Pascal BILLY - DREAL Auvergne – Rhône-Alpes / Service Risques
Bruno JANET – DGPR/SRNH/SCHAPI/MHO
Fabien PASQUET – DREAL Centre Val de Loire / SPC Loire Cher Indre
Pierre PATRICE - DREAL Auvergne – Rhône-Alpes / SPC Rhône amont - Saône

Référence Extranet du réseau de la prévision des crues et de l'hydrométrie

<http://pch.metier.e2.rie.gouv.fr/prevision-des-inondations-r481.html>

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	5
Contexte général.....	5
La prévision des inondations et Vigicrues.....	6
Objectifs et destinataires du guide.....	7
PRINCIPES DE PRODUCTION DES ZONES INONDÉES POTENTIELLES.....	8
La Prévision des Inondations à travers VIGInond.....	8
1 - La base de données nationale – VIGInond.....	8
2 - Le rattachement des zones inondées à une station hydrométrique.....	9
3 - Le lien entre les scénarios produits et les communes concernées.....	10
Cartographie temps réel ou catalogue de cartes ?.....	11
Cartographie du maximum de la crue ou instantané de la zone inondable ?.....	12
1 - Enveloppe du maximum.....	12
2 - Enveloppe d'un instantané.....	13
Zones d'influence autour des stations.....	14
1 - Densité des stations de prévision.....	14
2 - Définition d'une zone d'influence.....	14
3 - La détermination des zones d'influence, un travail itératif à améliorer au fil du temps.....	16
4 - Paramètres pour définir une zone d'influence.....	16
5 - Quantification de certains paramètres influant sur la zone d'influence.....	19
6 - Critique des zones d'influence.....	19
LES SCÉNARIOS DE CRUES À PRODUIRE ET CAPITALISER.....	23
Distinction entre production et capitalisation.....	23
Des données existantes à exploiter.....	23
1 - Les Atlas de Zones Inondables.....	25
2 - Les PPRI.....	26
3 - La Directive inondation.....	29
4 - Exploitation des résultats d'études hydrauliques.....	30
5 - Emprises inondées de crues passées.....	30
6 - Conclusion.....	32
Principes de base pour le choix des scénarios à cartographier.....	33
QUELLES MÉTHODES DE PRODUCTION ?.....	34
MÉTHODOLOGIE DES CAS PARTICULIERS.....	35
Les confluences.....	35
1 - Les paramètres d'influence pour les confluences.....	35
2 - La caractérisation des confluences.....	36
Les zones estuariennes.....	38
1 - Généralités.....	38
2 - Phénomène maritime seul.....	39

Les basses plaines méditerranéennes.....	40
1 - Présentation de la problématique.....	40
2 - Pistes de solution.....	41
Les cours d'eau endigués.....	41
1 - Les études de dangers.....	41
2 - La production des données de zones inondées derrière un système d'endiguement.....	42
3 - L'exploitation d'une étude de dangers pour VIGInond.....	42
4 - Cas des endiguements du lit mineur.....	43
5 - Cas des endiguements avec un ségonal.....	44
ET EN DEHORS DU RÉSEAU SURVEILLÉ ?.....	44
Les zones littorales.....	44
Les linéaires de cours d'eau non surveillés.....	44

Index des illustrations

Illustration 1: Éléments d'une zone inondée potentielle rattachée à la station de Cormery (37), sur l'Indre (fond de plan scan25® de l'IGN).....	9
Illustration 2: Correspondance entre la hauteur d'eau prévue à une station et une zone inondée potentielle.....	10
Illustration 3: Résultat du croisement géographique des communes et d'une ZIP - Station de Pessac (Dordogne).....	11
Illustration 4: Propagation d'une crue sur un linéaire donné (par exemple, la zone d'influence d'une station).....	14
Illustration 5: Linéaire moyen couvert par une station sur un tronçon.....	15
Illustration 6: Cas de positionnement des zones d'influence.....	16
Illustration 7: Rivière Allier - première délimitation des zones d'influence (Zinf) basée uniquement sur le contexte hydrologique.....	19
Illustration 8: Exemple de délimitation finale des zones d'influence sur une partie de l'axe Allier : (0) = zones d'influence se recoupant: délimitation arbitraire - (1) et (2): confluences Sioule et Dore - zones d'incertitude - (3) amont d'Issoire: éloignement important par rapport à la station de Coudes (laminage, apports diffus) + confluence Alagnon: zone d'incertitudes/moindre représentativité des stations de Pont d'Auzon (amont de la confluence) et Coudes (aval).....	23
Illustration 9: Les différents cas de production de scénarios d'inondation pour la Prévision des Inondations.....	25
Illustration 10: Extrait de la cartographie des zones inondables en Midi-Pyrénées réalisée au début des années 2000 - Source : http://www.haute-garonne.gouv.fr/	26
Illustration 11: Carte des PPRi approuvés sur les communes informées par Vigicrues. (Janvier 2017).....	28
Illustration 12: PPRi du Grand-Lyon (Secteur Saône) - Carte des aléas n°1 - Décembre 2006 - Source : http://www.rhone.gouv.fr/	29
Illustration 13: Extrait de la cartographie réalisée sur le TRI d'Ile-de-France pour la crue moyenne - Décembre 2015 - Source : http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/directive-inondation-r556.html	31
Illustration 14: Zone inondée et ses classes de hauteurs d'eau créée à partir de laisses de crues observées sur une prise de vue aérienne, d'un MNT LIDAR et du plugin QGIS CartoZI - Source : poster "De l'observation de la crue à la représentation de l'inondation : les apports de la cartographie numérique- ANRN - Mars 2016".....	33
Illustration 15: Logigramme des actions à mener pour rattacher une cartographie TRI à une station de prévision.....	34
Illustration 16: Schématisation de l'apport de 2 affluents - Source CETMEF.....	37
Illustration 17: Tableau de synthèse des concomitances Oise/Aisne pour 26 crues marquantes du bassin de l'Oise - Source : étude hydrologique globale du bassin versant de l'Oise.....	39
Illustration 18: Fréquence des coefficients de marées de 2011 à 2016.....	40
Illustration 19: Exemple de tableau à double entrée intégrant les paramètres de surcote et coefficient de marée.....	42

Introduction

Contexte général

Le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), tête du réseau de la prévision des crues et de l'hydrométrie (PC&H), diffuse deux fois par jour à minima (10h et 16h) la vigilance crue sur un site web dédié – www.vigicrues.gouv.fr. Cette vigilance crue se traduit par une couleur (vert, jaune, orange ou rouge) sur 287 tronçons de 232 cours d'eau, représentant environ 22 000 km de longueur¹. L'hydrologie de ces tronçons, appelés linéaire ou réseau surveillé [par l'Etat], est suivie par 19 Services de Prévision des Crues (SPC). À partir du niveau jaune de vigilance sur au moins un de leurs tronçons de cours d'eau, les SPC élaborent un bulletin d'information avec le cas échéant, des prévisions de hauteurs et/ou débits aux stations hydrométriques dites de prévision et indiquées comme telles dans le Règlement d'Information sur les Crues (RIC) de chaque SPC.

La difficulté, autant pour les gestionnaires de crise et les autorités (services de l'État, SDIS, maires, etc.) que pour le citoyen, est d'associer la prévision en un point donné - une hauteur à une station, le plus souvent en valeur relative par rapport au zéro de l'échelle de mesure – à un aléa spatialisé – une emprise inondée – à proximité de cette station et, enfin aux conséquences terrain à l'échelle de ce territoire :

- quels seront les enjeux touchés pour la hauteur prévue à la station ?
- mon lieu de vie et mes activités seront-ils impactés ?

Des réponses à ces questions découlent des actions à engager : pré-positionnement de moyens d'intervention, évacuation d'établissements sensibles, mise en place d'actions collectives et individuelles.

Le réseau PC&H a l'ambition de fournir petit à petit une information de prévision sur les zones inondées le long du réseau surveillé. Depuis fin 2008, le SCHAPI a engagé avec l'appui de quelques SPC, une vaste opération visant à compléter à moyen terme la prévision des crues par la prévision des inondations. Cette opération s'est vue confortée par la mise en œuvre de la Directive Inondation² (DI) et par la mise en place de la mission de Référent Départemental Inondation (RDI)³ au sein des DDT(M), dont la montée en puissance est en cours.

Dans ce cadre et dans celui plus large de la prévention des inondations – notamment l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Inondation (PPRI), des Atlas des Zones Inondables (AZI), des Plans Communaux de Sauvegarde (PCS) – les services de l'État, les établissements publics territoriaux de bassin (EPTB) et les collectivités produisent de nombreuses données géographiques en lien avec les inondations.

Pour la prévision des inondations et en prenant exemple des travaux pour la DI, le réseau PC&H a souhaité uniformiser les pratiques grâce à :

- la mise en place d'un référentiel commun de zones inondées

1 État des lieux à début 2017

2 Directive 2007/60/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation

3 Circulaire interministérielle du 28 avril 2011 relative à la définition et à l'organisation au sein de la direction départementale des territoires (et de la mer) de la mission de référent départemental pour l'appui technique à la préparation et à la gestion des crises d'inondation dans les départements couverts par un service de prévision des crues

- la création d'une base de données nationale permettant le stockage et la gestion de ce référentiel au niveau national et des fonctionnalités d'import sur un même environnement – VIGInond.
- la mise en place de flux de données interopérables et d'outils de diffusion permettant une mise à disposition des données de VIGInond.

Les données produites peuvent servir, en lien avec la mission RDI, dans deux contextes :

- la préparation de la crise « inondation » en partageant et s'appropriant la connaissance de ces données entre gestionnaires de crise ;
- la gestion de la crise où l'utilisation des données en opérationnel doit servir à l'anticipation de l'inondation de certaines parties du territoire, en s'appuyant sur la prévision. Le constat de l'inondation a bien moins d'intérêt.

La prévision des inondations et Vigicrues

Le site www.vigicrues.gouv.fr a été mis en service en juillet 2006, moins de 3 ans après la création du SCHAPI. S'il n'a guère évolué depuis cette date, sa robustesse et sa simplicité d'utilisation sont mises en avant par les utilisateurs⁴.

En 2017, une nouvelle version de Vigicrues verra le jour et concernera essentiellement l'affichage graphique des prévisions de crue aux stations.

Jusqu'à l'ouverture du nouveau portail Vigicrues en version 2.0, les données de zones inondées correspondantes aux prévisions de hauteur d'eau réalisées aux stations hydrométriques sont accessibles par le biais d'applications logicielles (notamment SIG) exploitant les services web de VIGInond. Cet accès est donc déconnecté de Vigicrues. En 2016, seuls les services de l'État ont accès à VIGInond. A partir de 2017, ces données seront progressivement accessibles à d'autres gestionnaires de crise (collectivités et grands opérateurs nationaux de transport et d'énergie).

Avec l'ouverture de la version 2.0 du portail Vigicrues (à l'horizon 2019), les données de zones inondées seront affichées directement dans le portail Vigicrues, en lien avec la prévision aux stations. Dans un premier temps, il est envisagé de conserver un accès restreint aux gestionnaires de crise. Dans un second temps, le grand public pourra bénéficier de ces informations.

⁴ Impressions livrées lors des enquêtes auprès d'un panel d'utilisateurs dans le cadre de l'AMO Vigicrues 2 portée par le Schapi

Objectifs et destinataires du guide

Ce guide s'adresse aux services qui ont réalisé, réalisent ou font réaliser des emprises de zones inondées dans le cadre de la prévision des inondations :

- services de l'État : DREAL, DDT(M), CEREMA, etc.
- organismes publics : collectivités, EPTB, syndicats de rivière, etc.
- prestataires privés dans le cadre direct ou indirect de la prévision des inondations.

Le présent guide a pour objectifs de donner les clefs aux producteurs de scénarios d'inondation pour :

- choisir les scénarios les plus pertinents en matière de risque (et pas seulement d'aléa) ;
- déterminer le linéaire de cours d'eau autour d'une station de prévision où ces enveloppes d'inondation seront cohérentes ;
- avoir conscience de cas plus complexes comme les confluences, les estuaires ou les zones endiguées, abordés succinctement mais qui restent à approfondir.

Le guide n'a pas vocation à détailler techniquement :

- la production d'emprises inondées et les différentes méthodes pour y parvenir ;
- le traitement des données hydrauliques, qui relève d'outils géomatiques.

Principes de production des zones inondées potentielles

La Prévision des Inondations à travers VIGInond

1 - La base de données nationale – VIGInond

VIGInond sert au stockage des couches cartographiques vectorielles de zones inondées correspondant à une hauteur à une ou plusieurs stations du référentiel hydrométrique national. Ces informations doivent répondre à un format de données spécifique défini par le SCHAPI.

Trois types de données sont recensées dans la base de données :

- la Zone Inondée Potentielle (ZIP) qui représente l'emprise surfacique de l'inondation ;
- les Zones Inondées par Classes de Hauteurs d'eau (ZICH) qui représentent les hauteurs de submersion par rapport au niveau du terrain naturel ;
- les Lignes Iso-Cotes (LIC) qui sont les courbes de niveaux d'eau ou altitudes dans un repère absolu et unique (NGF IGN69) atteints par les eaux lors d'une inondation. Les effets dynamiques (terme d'inertie) ne sont pas intégrés. À l'instar des courbes de niveau altimétriques, la ligne isocote a pour géométrie l'ensemble des points où la surface de l'inondation atteint la même altitude.

Un scénario d'inondation est caractérisé par une ZIP, des ZICH et des LIC (cf. Illustration 1 ci-dessous) . Pour chaque scénario et quelle que soit la méthode de production employée, il sera nécessaire de produire au minimum l'enveloppe de la zone inondée (ZIP). Les classes de hauteurs d'eau (ZICH) et les lignes isocote (LIC), associées à la ZIP sont des données qui ne sont pas obligatoires. Elles restent néanmoins utiles.

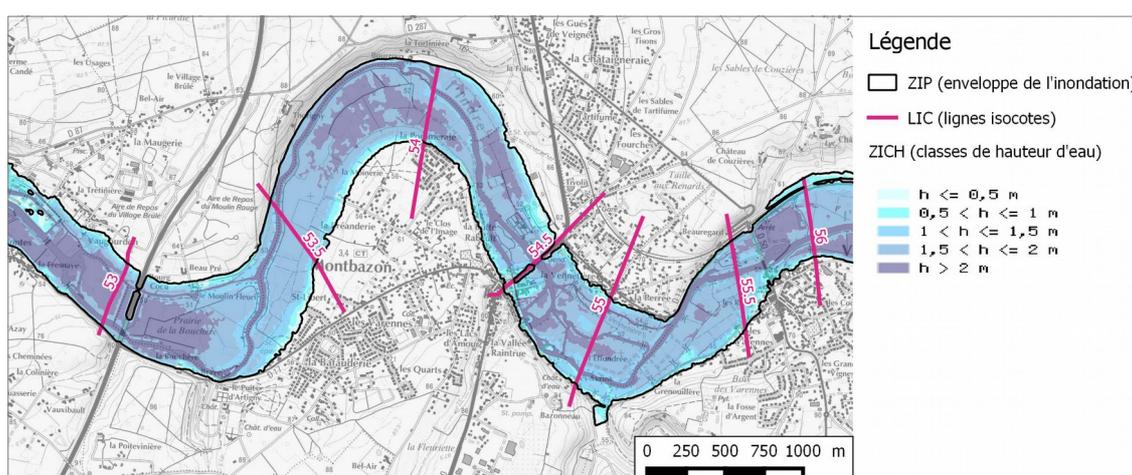


Illustration 1: Éléments d'une zone inondée potentielle rattachée à la station de Cormery (37), sur l'Indre (fond de plan scan25® de l'IGN)

2 - Le rattachement des zones inondées à une station hydrométrique

Chaque scénario est rattaché à une hauteur d'eau à l'échelle d'une station hydrométrique. La hauteur d'eau est une donnée relative par rapport au zéro de l'échelle, sauf pour les quelques échelles cotées en NGF. Dans certains cas particuliers, le scénario peut être rattaché à plusieurs stations hydrométriques, notamment à proximité de confluences ou de zones estuariennes, où l'extension des zones inondées peut dépendre des apports différents des affluents ou être influencée par la marée ou une surcote marine.

Les stations délivrant une information de hauteur ou débit en temps-réel sur Vigicrues se classent en deux grandes catégories, la seconde étant un sous-ensemble de la première :

- les stations d'observation du niveau d'eau en temps réel, au nombre d'environ 1600 ;
- les stations de prévision (675), indiquées comme telles dans le RIC de chaque SPC : on distinguera les stations où la prévision est chiffrée (hauteur/débit à une ou plusieurs échéances, au nombre de 590⁵) de celles (environ 85) où la prévision n'est que qualitative (baisse, étale, hausse).

La version 1.6 de Vigicrues (2016) ne permet pas aux utilisateurs de distinguer ces deux catégories de stations. La version 1.7 de Vigicrues ne permettra pas plus cette distinction mais donnera accès à un affichage graphique des prévisions. Ce n'est qu'avec la version 2 du portail Vigicrues, prévue à l'horizon 2018-2019 que cette distinction apparaîtra. Elle permettra à l'utilisateur de cibler les stations où est faite

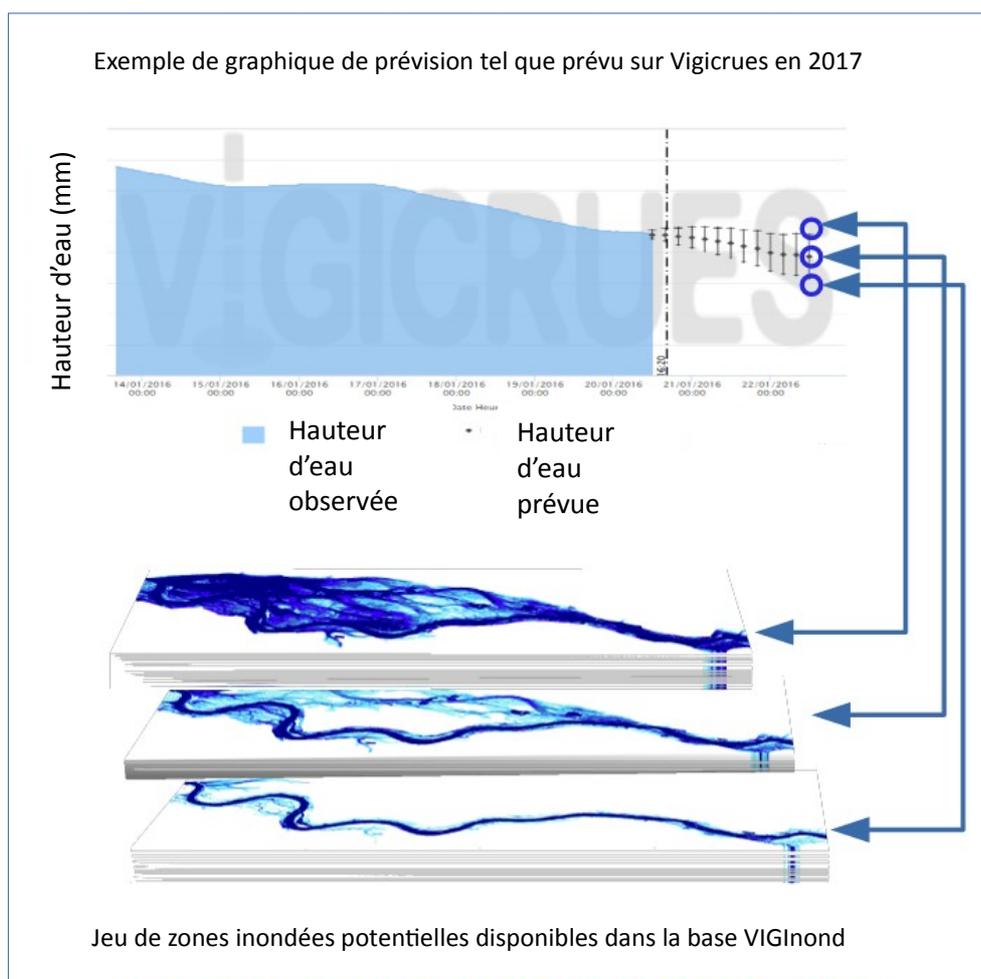


Illustration 2: Correspondance entre la hauteur d'eau prévue à une station et une zone inondée potentielle

de la prévision, autant en hauteur à la station qu'en emprise inondée.

Pour diffuser de la Prévision des Inondations, la station hydrométrique de rattachement d'un scénario d'inondation doit être une station de prévision chiffrée (cf. Illustration 2 ci-dessus). Cette station de prévision peut-être sur le réseau réglementaire ou en dehors et la notion de station hydrométrique intègre les marégraphes, permettant aussi de faire de la prévision de submersion sur le littoral.

Les services de prévision des crues se concentreront sur le réseau surveillé par Vigicrues, la prévision d'inondation ou de submersion⁶ en dehors du réseau surveillé n'étant pas à ce jour cadré (2 groupes de travail traitent de ces problématiques dans le cadre du chantier d'intérêt commun RDI, associant entre autres, le Schapi, les SPC et les DDT(M)).

Néanmoins, il n'est pas obligatoire que toutes les stations de prévision soient couvertes par des scénarios de ZIP (le cas échéant, ZICH et LIC). En effet, des situations hydrographiques ou hydrologiques particulières peuvent amener à définir un scénario sur un linéaire intégrant plusieurs stations de prévision. Ces cas restent néanmoins limités (15 % des stations de prévision couvrent moins de 20 km de linéaire).

3 - Le lien entre les scénarios produits et les communes concernées

Pour chaque scénario d'inondation, il est nécessaire de définir les communes impactées. Cette information, définie par croisement entre deux couches géographiques (la ZIP et le contour des communes) peut être spécifique à chaque scénario d'inondation. Dans l'exemple ci-dessous (Illustration

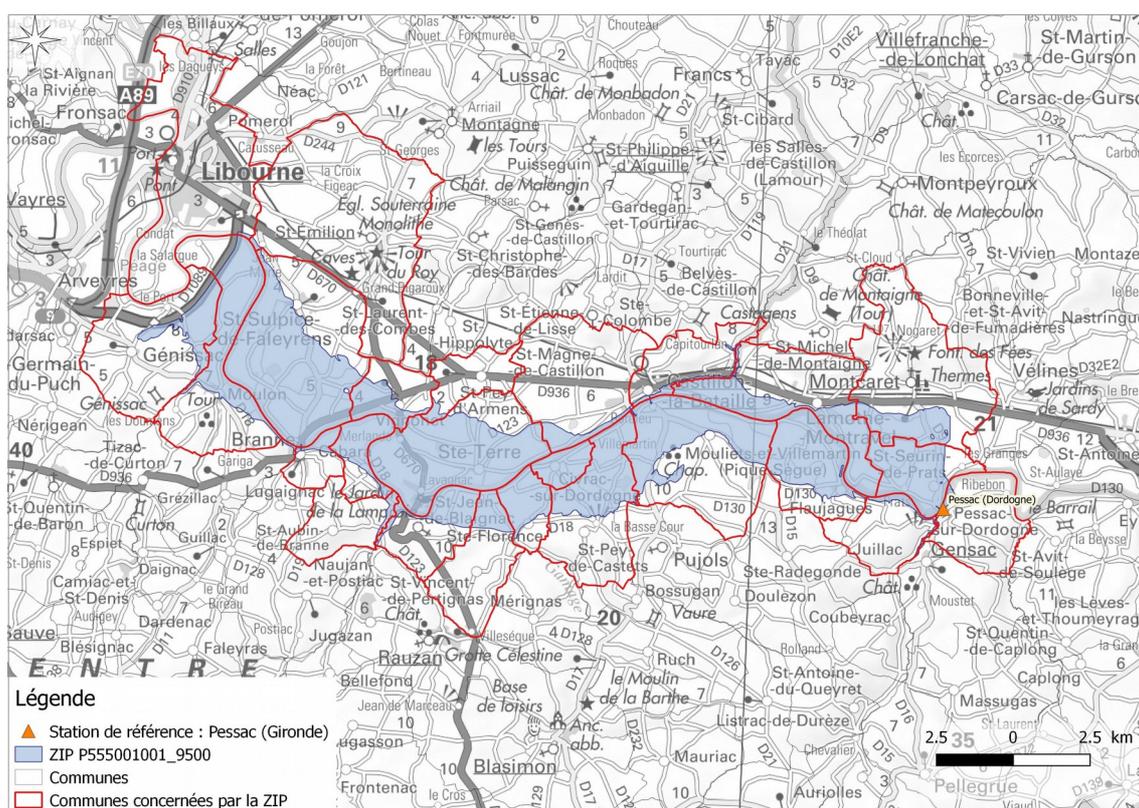


Illustration 3: Résultat du croisement géographique des communes et d'une ZIP - Station de Pessac (Dordogne)

6 L'État a pris l'habitude de distinguer inondation et submersion : le premier terme concerne les débordements des cours d'eau, le second, les débordements de la mer sur le littoral. Cette nuance n'est que sémantique car les conséquences des phénomènes débordants sont très proches, que l'origine soit fluviale ou maritime.

), le croisement géographique de la ZIP à 9, 5 m à la station de Pessac et de la couche des communes⁷ sur ce même secteur montre que plusieurs communes sont impactées à la marge par la zone inondée (secteur de Libourne au Nord-Ouest de la zone d'étude et à l'amont le secteur de Pessac sur Dordogne au sud-est de la zone d'étude). Le SPC, après concertation éventuelle avec la DDT (Mission RDI), a en charge de définir la liste des communes les plus pertinentes à rattacher à la ZIP au regard de l'analyse des croisements géographiques ZIP-communes.

Cette liste sera le plus souvent la même pour tous les scénarios de ZIP à une même station. Les fiches de documentation des ZIP intègrent cette information.

Cartographie temps réel ou catalogue de cartes ?

Une expérimentation a été réalisée en 2009 et 2010 par le SPC Oise-Aisne, visant à tester la cartographie de l'inondation pour un épisode de crue fictif en utilisant la plateforme MP-Oise qui intègre des modules hydrologiques, des modules hydrauliques et un module cartographique.

L'expérimentation a montré la faisabilité technique de la cartographie temps-réel sous réserve du respect d'au moins trois pré-requis :

- posséder un modèle de prévision en temps-réel s'appuyant sur un modèle hydrodynamique du cours d'eau,
- avoir un modèle qui donne des résultats (crue et inondation) dans des délais courts et compatibles avec la production des SPC
- pouvoir exploiter facilement et rapidement les sorties de ce modèle pour réaliser la cartographie des zones inondées.

En résumé, il faut avoir une chaîne de calculs opérationnelle et rapide.

Au-delà de la faisabilité technique, se posent les questions de la faisabilité opérationnelle :

- avec des effectifs contraints en astreintes et en suivi d'événements, a-t-on le temps de gérer la prévision des inondations en plus de la prévision des crues ?
- l'absence d'expertise des sorties cartographiques est-elle préjudiciable ?

Face à ces pré-requis loin d'être à disposition de tous dans le réseau de la PC&H et face à ces questions importantes, il a été décidé fin 2011 (à partir du bilan des expérimentations pilotes lancées entre 2009 et 2011⁸) que la prévision des inondations s'appuierait dans un premier temps sur un catalogue d'emprises de zones inondées pré-établies. Lors des crues, il s'agira de se référer à ce catalogue pour trouver les scénarios d'inondation les plus proches de la crue en cours, en affichant un scénario bas ou minorant et un scénario haut ou majorant.

De plus, les scénarios pré-établis sont indispensables en préparation de crise pour la caractérisation des enjeux impactés et pour affiner les seuils de vigilance.

À un horizon plus lointain, dans des cas bien particulier et sous réserve du respect des pré-requis, l'utilisation de cartographies de l'événement en cours – appelée cartographie temps-réel – pourra être envisagée.

7 Couche issue du produit ADMIN EXPRESS : <http://professionnels.ign.fr/adminexpress>

8 Rapport disponible sur l'extranet Prévision des Crues et Hydrométrie : <http://pch.metier.e2.rie.gouv.fr/rapport-bilan-mars-2012-a994.html>

Cartographie du maximum de la crue ou instantané de la zone inondable ?

Trois possibilités existent en matière de cartographie d'une inondation en cours :

- la première consiste à produire une enveloppe du maximum d'inondation en tout point du linéaire cartographié ;
- la deuxième consiste à produire une enveloppe correspondant à un instantané (ou une photo) de l'inondation à un instant t , celui pour lequel la hauteur d'eau du scénario est atteinte à la station ;
- d'autres méthodes mixtes tentant de remédier aux inconvénients des deux premières existent. Elles nécessitent l'utilisation d'un modèle hydrodynamique. (cf. stage P. Patrice au SPC Allier, 2014⁹ ; stage P.A. Hans au SCHAPI, 2012¹⁰).

Nous préconisons d'utiliser la première, celle du maximum d'inondation en tout point, sans considération de temporalité, car c'est la méthode la plus universelle.

1 - Enveloppe du maximum

Ce résultat est typique de l'exploitation de repères de crue à travers la ligne d'eau d'une crue. En chaque point de la zone cartographiée, ce sont les plus hautes eaux atteintes au fil de la propagation de la crue qui servent à délimiter l'emprise inondée. La notion de temporalité n'apparaît pas sur la carte puisqu'en chaque point, le maximum de l'inondation n'a pas lieu au même moment. L'emprise inondée ne correspond donc pas à une réalité observée, sauf pour les crues très lentes écoulant de gros volumes.

L'enveloppe du maximum peut également être issue de l'exploitation d'un modèle hydraulique :

- soit c'est le résultat d'un calcul en régime permanent : il est à privilégier quand les volumes de stockage sont faibles en lit majeur (gorges et vallées encaissées) ou quand les crues sont très lentes (gradient de montée de qq cm/jour) avec un stockage simple en lit majeur (le régime permanent est à proscrire avec des lits majeurs intégrant des zones de rétention dynamique ; dans les autres cas, le calcul en régime permanent sera majorant sur les emprises inondées ;
- soit c'est l'extraction du maximum d'un calcul en régime transitoire en tout point du domaine modélisé.

Les principaux avantages de l'enveloppe du maximum tiennent à :

- la facilité de mise en œuvre quand on ne possède pas de modèle hydraulique, tout du moins quand le lit majeur n'est pas trop complexe (absence de casiers notamment) ;
- l'homogénéité des rendus quelle que soit la méthode de production de la zone inondée.

9 [« Détermination et mise en place d'une méthodologie pour la réalisation d'une cartographie de l'aléa inondation utilisable en gestion de crise – Application au cas de l'axe Allier »](#), Pierre Patrice, stage de fin d'étude Ingénieur Montpellier SupAgro, Septembre 2014

10 [« De la prévision des crues à la prévision des inondations : Réflexion sur les méthodes et les outils pour la cartographie des zones inondables »](#), Pierre-Adrien Hans, stage de fin d'étude d'Ingénieur, Mastère Spécialisé en hydraulique, ENSEEIHT, Septembre 2012.

Néanmoins, cette méthode possède deux inconvénients méthodologiques, qui se nuancent dans le cadre de la prévision des inondations :

- l'emprise inondée ne sera pas observée à un instant donné : elle représente implicitement l'évolution de l'inondation en fonction de la propagation de l'onde de crue ; cela va donc dans le bon sens puisqu'une ZIP (et même un couple de ZIP) est valable sur une période de quelques heures ;
- en montée de crue, on est pessimiste sur l'aval avec une sur-inondation (l'onde de crue arrive au mieux au droit de la station à l'échéance de la prévision) et optimiste sur l'amont avec une sous-inondation (la crue est plus forte car elle monte encore). En décrue, c'est l'inverse, même si à ce jour, les prévisions en décrue sont très rares.

2 - Enveloppe d'un instantané

La production de l'enveloppe d'un instantané de la crue est typique de l'exploitation d'un modèle hydraulique dont les calculs ont été réalisés en régime transitoire : la propagation de la crue est prise en compte sur tout le domaine de calculs. Cette production peut aussi être issue de l'exploitation de prises de vue aérienne ou satellite, qui sont aussi des instantanés de la crue.

L'illustration 4 ci-dessous en montre le principe, avec le limnigramme amont en vert, celui de la station en bleu et le limnigramme aval en rouge.

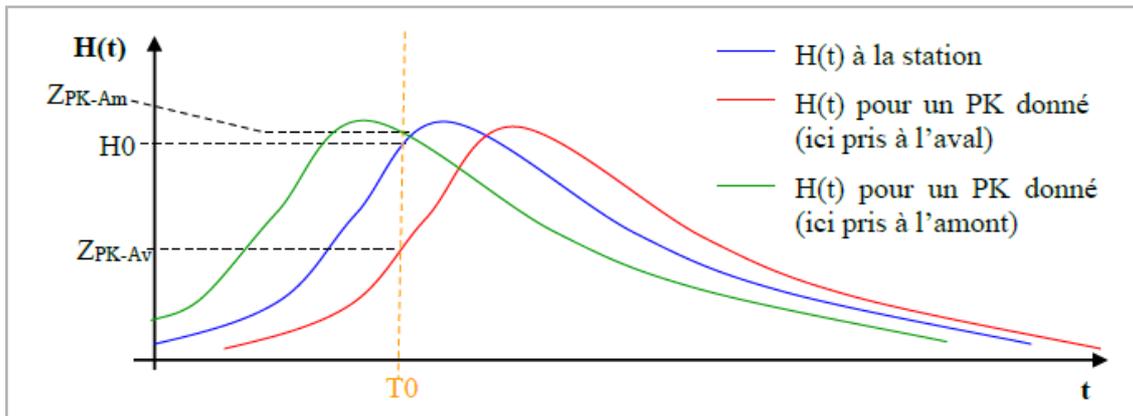


Illustration 4: Propagation d'une crue sur un linéaire donné (par exemple, la zone d'influence d'une station)

Le principal avantage de cette production est de présenter une enveloppe inondée que l'on observera à un instant donné – celui de l'échéance de la prévision de crue. Elle a donc un caractère plus réaliste dans la chronologie d'une crue. D'un autre côté, la situation à un instant t en tout point d'un cours d'eau n'est pas forcément recherchée en gestion de crise. Et cette production possède quelques inconvénients :

- l'obligation de construire et exploiter un modèle hydrodynamique, ce qui peut être fastidieux et coûteux quand on part de zéro. Si un modèle existe déjà, sa ré-exploitation est bien plus simple ;
- en montée de crue, tant que l'échéance de prévision n'est pas atteinte (et que la prévision est correcte), l'emprise inondée est pessimiste (ce qui va dans le sens de la sécurité), que ce soit en

amont ou en aval de la station ;

- en lien avec l'item précédent, une nouvelle prévision sera théoriquement publiée au plus tard à l'échéance de la précédente prévision : on risque donc de courir en permanence après le futur présenté sur les cartes sans jamais pouvoir comparer ce futur proche avec la réalité.

Zones d'influence autour des stations

1 - Densité des stations de prévision

À l'échelle nationale, le linéaire moyen¹¹ couvert par une station de prévision sur un tronçon est inférieur à 50 km dans 75 % des cas et à 35 km dans 50 % des cas (cf. Illustration 5 ci-dessous).

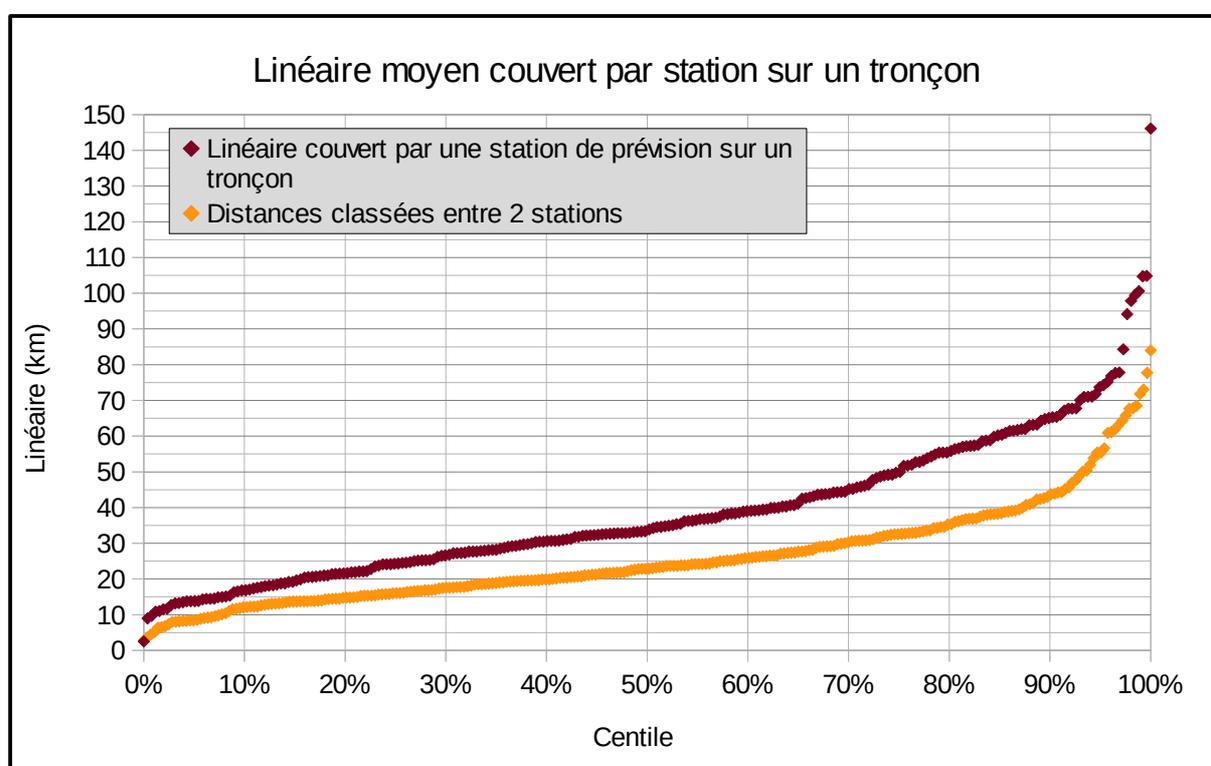


Illustration 5: Linéaire moyen couvert par une station sur un tronçon

Mais dans ces intervalles, se cache une grande variété de situations en fonction du contexte hydrologique et hydraulique (confluences, ouvrages hydrauliques...) et des enjeux en présence, que le seul paramètre de linéaire moyen couvert par une station ne peut apprécier. De plus, il serait trop simple d'assimiler ce linéaire moyen au linéaire de la zone d'influence de la station.

2 - Définition d'une zone d'influence

La zone d'influence autour d'une station est le secteur géographique, plus ou moins étendu vers l'amont

11 La notion de « linéaire moyen » renvoie ici au calcul du paramètre qui est le rapport entre le linéaire d'un tronçon et le nombre de stations de prévision sur ce même tronçon

et/ou vers l'aval le long du cours d'eau concerné, pour lequel la hauteur (ou le débit) mesurée à la station est représentative du phénomène d'inondation (cote ou hauteur d'eau, emprise, vitesse d'écoulement) constaté sur le terrain. Quelle que soit la crue, l'emprise inondée restera similaire sur toute la zone d'influence pour la même hauteur (ou le même débit) mesurée à ladite station.

Ce qui revient à avoir une corrélation univoque (ou encore une bijection) entre une hauteur à une station et l'inondation dans la zone d'influence. Pour que cette corrélation entre hauteur à la station et caractéristiques de l'inondation sur le terrain - emprise en premier lieu mais aussi hauteurs de submersion - soit la meilleure possible, elle ne doit donc pas être perturbée, ou tout du moins ne l'être que dans des limites raisonnables, par la diversité des situations de crue que l'on peut rencontrer sur le cours d'eau concerné.

Au-delà de cette définition, se cache l'objectif de couvrir le maximum du linéaire des cours d'eau en fonction des zones d'influence aux stations de prévision, puisque le postulat de départ est toujours de se concentrer sur la prévision de crue et d'inondation. Dans l'idéal, la fin vers l'aval de la zone d'influence d'une station doit correspondre (au mieux se chevaucher) avec le début de la zone d'influence de la station de prévision située juste en aval. Pour la station la plus en amont sur un tronçon amont, la zone d'influence doit remonter au moins jusqu'au début du tronçon. Pour la station la plus en aval sur un tronçon aval, la zone d'influence doit atteindre la fin du tronçon.

L' Illustration 6 ci-dessous schématise deux cas de position de zones d'influence. Les trois tronçons en trait épais et nuances de bleu possèdent chacun une station de prévision (carré de couleur) et une zone d'influence associée (trait fin au-dessus de la même couleur que la station).

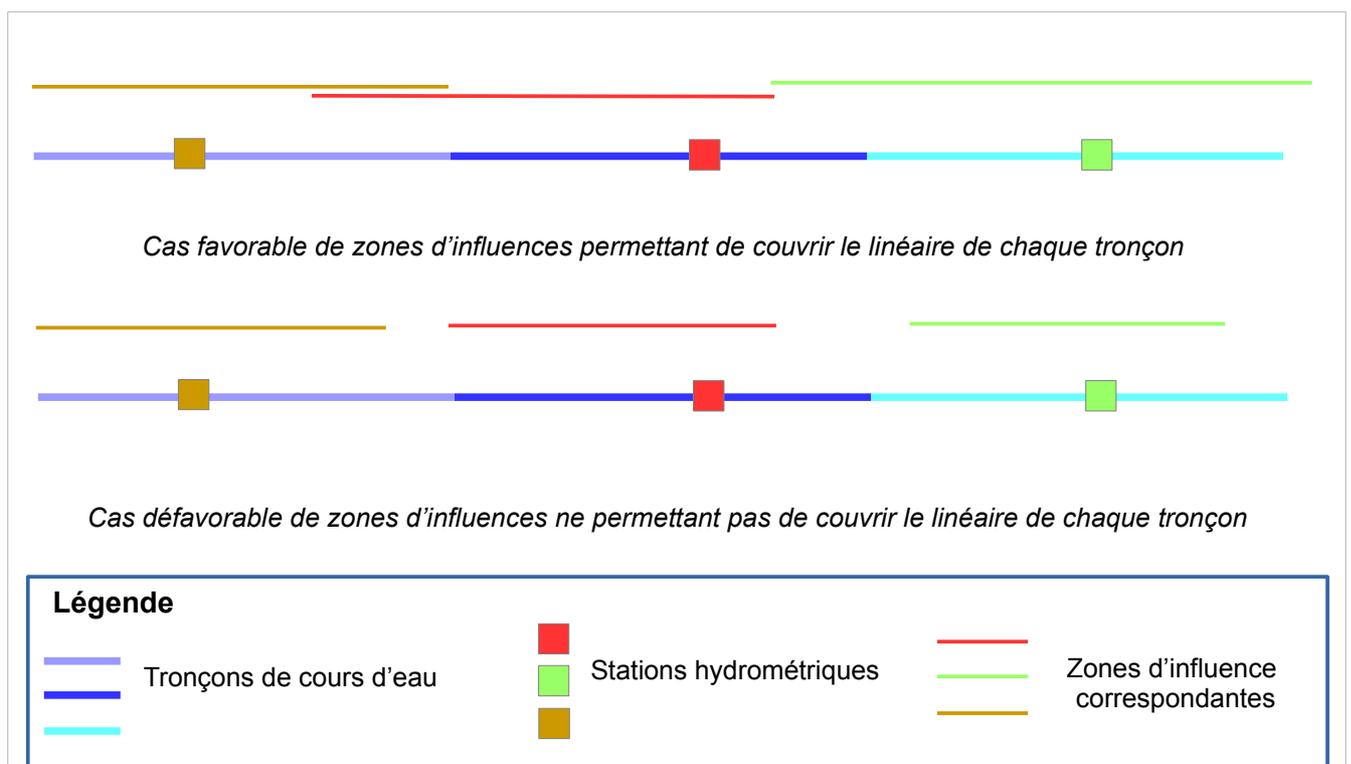


Illustration 6: Cas de positionnement des zones d'influence

Lorsqu'on se trouve dans un cas défavorable ne permettant pas de couvrir un linéaire entier de tronçon, trois cas se présentent :

- modifier le statut d'une station d'observation « bien située » qui deviendrait une station de prévision, sous réserve de mettre en place les modèles nécessaires pour faire de la prévision chiffrée ;
- accepter de prolonger les zones d'influence pour les faire se rejoindre, en acceptant une dégradation de la fiabilité du scénario sur la partie prolongée de la zone d'influence ;
- avoir des « zones blanches » où l'inondation d'un secteur géographique ne pourra pas être rattachée à une station de prévision.

Cette éventuelle présence de zones blanches ne doit pas être vue comme un échec. D'une part, le réseau Vigicrues n'est pas homogène avec deux tronçons sans station et un dixième des tronçons sans station de prévision. D'autre part, certaines zones sans enjeux ou presque, peuvent s'affranchir de scénario d'inondation. On pourra donc accepter de ne pas faire de prévision des inondations sur tout le réseau, mais seulement si on est dans l'impossibilité technique de le faire.

3 - La détermination des zones d'influence, un travail itératif à améliorer au fil du temps

La détermination des zones d'influence est fortement tributaire de la connaissance du cours d'eau et de la densité du réseau de stations disponibles pour la prévision au moment où on détermine les zones d'influence.

Dans la mesure où ces deux aspects peuvent évoluer au cours du temps (nouvelles études ou crues, densification du réseau de mesure), la délimitation des zones d'influence n'est pas figée mais au contraire, au même titre que les cartographies associées, c'est un travail qui peut être amélioré au fil du temps pour disposer à tout moment du niveau de précision maximal autorisé par le contexte en termes de prévision des inondations.

En ce sens, du moment que des points délicats ont été bien identifiés et que l'on met progressivement tout en œuvre pour y remédier, il n'est pas gênant en soi qu'il y ait des incertitudes et/ou zones blanches au début, d'autant que tous les SPC seront inévitablement concernés par ce type de situation lors de la réalisation des premières cartographies de zones inondables pour la prévision des inondations.

4 - Paramètres pour définir une zone d'influence

Sauf évidence manifeste, les zones d'influence seront déterminées pour toutes les stations de prévision. D'autres paramètres étudiés par la suite pourront amener à supprimer certaines stations de prévision pour le rattachement de ZIP pour cause de proximité géographique et/ou d'hydrologie similaire.

Des paramètres hydrologiques, hydrographiques et hydrauliques vont servir à déterminer les zones d'influence et leurs limites. La caractérisation de ces paramètres s'appuiera sur la connaissance *a priori* du territoire par le SPC et sur l'analyse cartographique, de base de données et de retours d'expérience :

- la position des confluences (cf. chapitre sur Les confluences page 35) et des embouchures sur le chevelu hydrographique par rapport à la position des stations de prévision et l'importance des apports des affluents :
 - le plus souvent, la zone d'influence d'une station pourra remonter jusqu'à la précédente confluence marquante du point de vue hydrologique ; en effet, une fois la confluence passée, la même valeur de débit à l'aval peut être obtenue par différentes combinaisons d'hydrogrammes sur les deux cours d'eau qui confluent ; les cas où cette situation ne se vérifie

pas forcément concernent ceux où le linéaire entre la confluence et la station en aval est important et propice au laminage de la crue ;

- dans la mesure où l'affluent possède un régime de crue différent de celui du cours d'eau principal étudié : faible corrélation entre le débit à la station considérée et le débit concomitant de l'affluent, entraînant une rupture du lien avec le niveau à la station vers l'amont (pour une confluence située en amont de la station) ou en aval (pour une confluence située en aval de la station) ;
 - la présence d'un remous en amont d'une confluence importante dans l'une, l'autre ou les deux branches. Dans ce cas-là, on peut envisager de rattacher la zone d'influence (et donc la ZIP) non plus à une seule station mais à un couple de stations, contrôlant chacune une influence. Cette situation se rencontre également sur les linéaires à influence marine.
- la présence d'ouvrages hydrauliques que l'on peut classer en trois types :
 - les barrages : en cassant la continuité hydraulique d'un cours d'eau, ils sont « naturellement » à la fois une fin (pour l'amont) et un début (pour l'aval) de zones d'influence des écoulements. L'enchaînement de barrages en l'absence de station est une source de zones blanches pour les ZIP ;
 - les ouvrages hydrauliques en rivière (seuil, ouvrage mobile de navigation) : ce sont des sections de contrôle de l'écoulement, au moins jusqu'à un certain débit, et qui influencent la ligne d'eau ;
 - les ouvrages de protection (une digue) : en mettant de côté les questions de rupture, leur niveau de protection conditionne le débordement en lit majeur dans la zone endiguée ;
 - une faible importance de l'atténuation de la crue par laminage, voire tout simplement l'absence de zone d'expansion de crue (cas typique de gorges ou de longs linéaires endigués) ;
 - le positionnement des principaux enjeux le long du réseau hydrographique et notamment par rapport aux stations de prévision : en acceptant une incertitude plus grande dans la cartographie des ZIP dans des secteurs ne présentant pas d'enjeux importants, on peut étirer la zone d'influence. À travers l'Évaluation Préliminaire des Risques d'Inondation (EPRI) de la Directive Inondation, la détermination d'indicateurs d'enjeux (populations, bâtiments, hôpitaux, etc.) à l'échelle communale a été réalisée : cette source d'information peut-être utile pour qualifier les enjeux. Un lien rapide avec les DDT (mission RDI) peut également être utile pour avoir une confirmation des enjeux présents dans une zone donnée et de leur vulnérabilité.

Ce premier travail de recensement des paramètres peut aboutir à fixer dans les cas les plus triviaux (grandes confluences et barrages par exemple) quelques limites de zones d'influence, qui resteront figées même en intégrant d'autres paramètres. Pour les cas moins évidents, il faudra pousser l'analyse plus loin en quantifiant les effets des différents paramètres.

La carte de la page suivante illustre, sur l'exemple de l'Allier, le résultat d'un tel premier découpage reposant uniquement sur des paramètres triviaux (position des principales confluences...) et sur la connaissance empirique du SPC Allier quant à la propagation et à la formation des crues de la rivière, et permettant également de cibler les secteurs pour lesquels la délimitation des zones d'influences devra être approfondie pour aboutir à un résultat acceptable et cohérent.

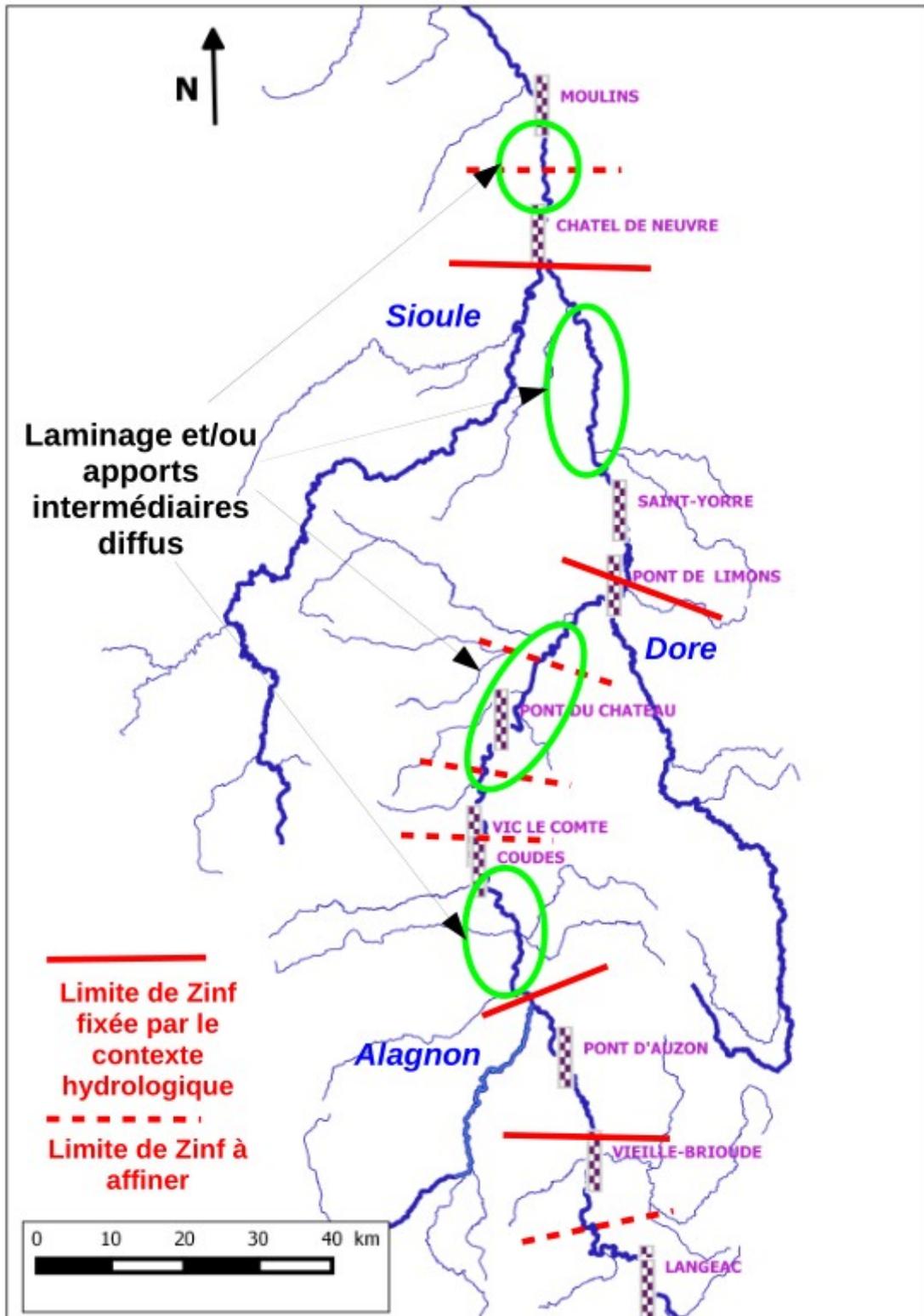


Illustration 7: Rivière Allier - première délimitation des zones d'influence (Zinf) basée uniquement sur le contexte hydrologique

5 - Quantification de certains paramètres influant sur la zone d'influence

L'ensemble des éléments de connaissance écrite et chiffrée des crues historiques ou théorique peut être mobilisé pour quantifier l'influence de tel ou tel facteur, notamment en termes de dispersion des hauteurs de submersion à un endroit donné d'une crue à l'autre pour un même niveau (H ou Q) à la station considérée. Parmi ces éléments, on peut citer entre autres, sans être exhaustif, et par ordre croissant de difficulté :

- Le rapport Q_i/Q_j à la station : plus il est faible, plus le laminage qu'il soit amont ou aval, sera limité et la zone d'influence potentiellement étendue ; à noter que la fonction crucial¹² donne la fourchette de ce rapport pour les crues recensées dans la Banque Hydro ;
- En complément du point précédent, la forme des hydrogrammes de crues passées : en pic, arrondi, en plateau, ... ;
- La comparaison de résultats de modélisation hydraulique en régime transitoire (ou permanent au Q_{maxi} en prenant en compte les confluences) de plusieurs crues réelles ou fictives, représentatives de la diversité des dynamiques et configurations hydrologiques → inventaire, critique et limite des méthodes employées dans chaque cas ;
- Les repères de crues historiques (emprise de la zone inondée, comparaison des lignes d'eau, nouvelle simulation éventuelle ?), reliés entre eux pour comparer les pentes des lignes d'eau de différentes crues.

Des méthodes plus ou moins complexes, qui peuvent être reprises et adaptées au contexte en fonction des données disponibles, ont déjà pu être développées par certains SPC pour quantifier, à l'aide de tout ou partie des données précédentes, les limites techniquement acceptables d'une zone d'influence. Le terme de « techniquement acceptable » s'entend en s'étant fixé par ailleurs un seuil de tolérance quant à la dispersion des hauteurs de submersion pour un même niveau à la station (cf. stage de P. Patrice au SPC Allier en 2014, présentant une méthode basée sur l'analyse du rejeu par un modèle hydraulique de plusieurs crues représentatives de la diversité des situations sur le bassin versant de l'Allier¹³).

6 - Critique des zones d'influence

Les étapes précédentes réalisées, on dispose en principe d'une délimitation technique « objective » des zones d'influence. Cette délimitation doit être critiquée, notamment pour lever certains problèmes ou incohérences :

- zone d'influence d'une station qui s'étend en partie en dehors du tronçon de rattachement de la station ;
- présence de zone(s) de recouvrement entre les zones d'influence de deux stations successives ;
- présence de zone(s) blanche(s) « incompressibles ».

Nous allons voir comment régler ces problèmes et quel parti adopter dans ces cas-là.

¹² <http://www.hydro.eaufrance.fr/presentation/procedure.php>

¹³ « Détermination et mise en place d'une méthodologie pour la réalisation d'une cartographie de l'aléa inondation utilisable en gestion de crise – Application au cas de l'axe Allier », Pierre Patrice, stage de fin d'étude Ingénieur Montpellier SupAgro, Septembre 2014

a) Cas d'une station dont la zone d'influence s'étend au-delà de son tronçon de rattachement

La zone d'influence d'une station peut s'étendre en amont ou en aval au-delà de son tronçon de rattachement. La zone d'influence peut concerner aussi le tronçon contigu, voire un linéaire non réglementaire (amont d'un premier tronçon ou aval d'un dernier), en particulier si la station est positionnée très proche de l'extrémité amont ou aval du tronçon.

En soi, cette situation n'est pas gênante pour l'utilisateur.

Avec les outils actuels de recherche et d'affichage des ZIP, l'utilisateur peut, sur la base du choix d'une commune, accéder aux ZIP existantes rattachées à une station, sans lien direct avec le tronçon de vigilance.

Dans l'application mobile prévue pour 2017 et dans le futur portail Vigicrues 2, une fonctionnalité similaire permettra de chercher une commune. Le résultat de la recherche indiquera le(s) tronçon(s) concernant cette commune, les stations les plus proches et, le cas échéant, la station à laquelle sont rattachées les ZIP.

Si vraiment, l'extension de la zone d'influence au-delà du tronçon d'appartenance posait un problème, il faudra arrêter la zone d'influence à la limite du tronçon. Ce qui implique d'utiliser une autre station immédiatement en amont ou en aval sur le tronçon contigu pour couvrir la zone d'influence supprimée. Trois cas se présentent alors :

- a) la station amont ou aval est aussi pertinente pour couvrir par une ZIP la zone supprimée ;
- b) la station amont ou aval est moins pertinente, mais elle reste représentative sans trop dégrader le lien entre hauteur à la station et zone inondée ;
- c) la station n'est pas du tout pertinente et on se retrouverait avec une zone blanche.

Les cas b) et c) montrent bien l'intérêt de conserver la zone d'influence initiale, quitte à déborder sur un autre tronçon. Le cas a) est traité ci-après.

b) Cas d'une zone de recouvrement entre les zones d'influences de deux stations

Ce cas n'est pas problématique, bien au contraire, dans la mesure où on dispose alors de toute latitude pour effectuer le découpage entre les deux stations :

- une limite de tronçon et/ou de département sont de bons choix pour une limite de zone d'influence ;
- si les deux stations sont sur le même tronçon, on peut considérer les usages locaux habituels qui font que l'une des deux stations est en général plus utilisée que l'autre et fixer la limite en conséquence : la zone d'influence de la station la plus utilisée sera conservée en intégralité et celle de l'autre station réduite ;
- en l'absence de toute autre considération, il est préférable de privilégier au maximum la station la plus en amont pour gagner en anticipation de crue.

c) Cas des zones blanches

Les étapes précédentes de délimitation des zones d'influence peuvent faire apparaître des zones dans lesquelles il est très difficile voire impossible de rattacher l'inondation à une hauteur d'une station de prévision, même en acceptant une incertitude plus grande à certains endroits (notamment en l'absence

d'enjeux importants) et en l'indiquant dans le champ « commentaires » des ZIP produites.

Deux choix se présentent alors : accepter la zone blanche ou tenter de la réduire voire de la supprimer, quitte à perdre en précision.

Accepter une zone blanche est dans l'absolu une solution de facilité. De plus, il faut garder à l'esprit que le réseau hydrographique est déjà hétérogène : tous les cours d'eau n'ont pas de tronçons de vigilance, tous les tronçons n'ont pas de station de prévision, toutes les stations ne délivrent pas de prévision. **Il n'y a rien de choquant à ce que le linéaire de tous les tronçons ne soit pas intégralement couvert pas des ZIP.** Et on se confronte à d'autres problématiques comme l'hydrométrie. (cf. ci-après).

Néanmoins, tenter de **réduire voire supprimer une zone blanche est opportun**. Les zones blanches peuvent concerner :

- des secteurs à enjeux modérés à fort : dans ce cas, il sera préférable de combler la zone blanche. Dans ces zones, le besoin d'une précision dans la relation [hauteur à une station – ZIP] nécessite d'utiliser une autre station pour le rattachement des ZIP : station temps-réel existante ne délivrant pas de prévision, station non temps-réel à transformer en station temps-réel et de prévision, mise en place d'une nouvelle station. Dans l'audit du réseau hydrométrique de l'État prévue de 2016 à 2018, ce besoin en station nouvelles devra être remonté.
- des secteurs à enjeux faibles à modérés : on pourra accepter d'avoir une information plus dégradée en prolongeant la zone d'influence vers l'amont ou vers l'aval pour disposer de ZIP couvrant un linéaire plus long.
- en cohérence avec les deux cas précédents, des secteurs où le rattachement des ZIP à une seule station est insuffisant : confluences, zones estuariennes, basses vallées, amont de certains ouvrages hydrauliques mobiles. L'emprise inondée ne pouvant être corrélée à une seule station, il faudra rattacher la ZIP à un couple de stations.

La carte de la page suivante (Illustration 8), à comparer à celle de l'illustration 7, page 18, présente le résultat final obtenu sur une partie de l'axe Allier après traitement des points délicats conformément aux principes énoncés dans cette partie.

Cette carte montre également les limites et marges d'incertitudes qui peuvent subsister même après avoir mené l'ensemble de la démarche, et qu'il est toujours important d'avoir en mémoire lors de la production et de l'utilisation opérationnelle des cartes de zones d'inondation potentielle.

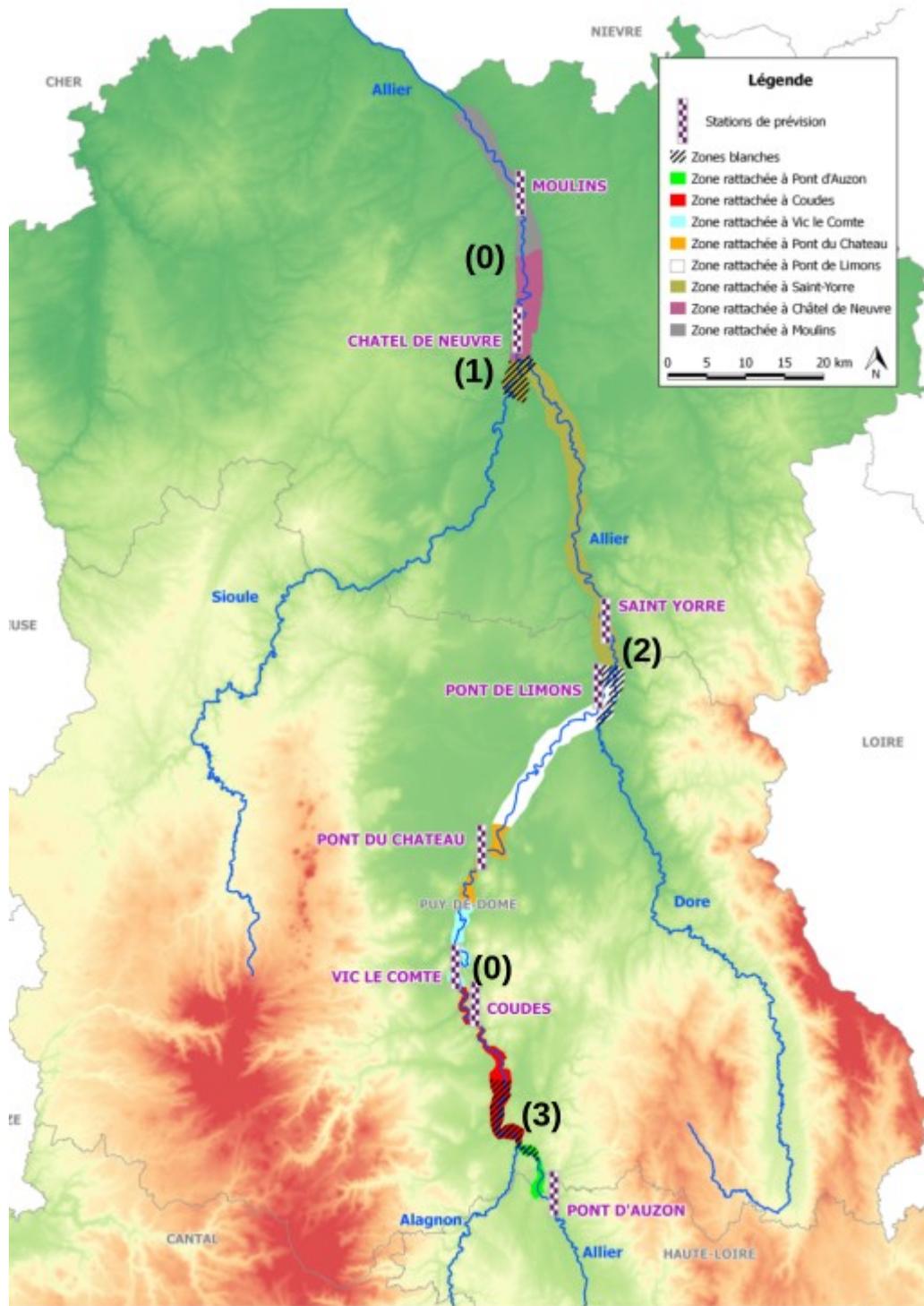


Illustration 8: Exemple de délimitation finale des zones d'influence sur une partie de l'axe Allier : (0) = zones d'influence se recoupant: délimitation arbitraire - (1) et (2): confluences Sioule et Dore - zones d'incertitude - (3) amont d'Issoire: éloignement important par rapport à la station de Coudes (laminage, apports diffus) + confluence Alagnon: zone d'incertitudes/moindre représentativité des stations de Pont d'Auzon (amont de la confluence) et Coudes (aval)

Les scénarios de crues à produire et capitaliser

Distinction entre production et capitalisation

La production consiste à créer une couche cartographique d'inondation sur un linéaire de cours d'eau pour un scénario de crue donné, à savoir une hauteur d'eau à une station. Partant de ce principe, on produira un certain nombre de couches d'inondation correspondant chacune à un scénario de crue. On se retrouve donc avec X scénarios produits.

La capitalisation consiste à choisir parmi les X scénarios précédemment produits, ceux qui méritent d'être insérés dans VIGInond après leur mise préalable au bon format.

Cette distinction dans les deux termes - production et capitalisation – tient à plusieurs facteurs :

- sans contrainte (financière ou technique), il n'y a pas d'intérêt à se restreindre sur le nombre de scénarios à produire (dans la limite du raisonnable tout de même) : plus on a de scénarios sous la main, plus il sera aisé de choisir les plus pertinents à intégrer en base ;
- à moins d'avoir une très bonne connaissance de la progressivité de l'inondation avec l'évolution de la hauteur d'eau à une station, il est difficile a priori de savoir quelles hauteurs à la station seront les plus pertinentes pour présenter des scénarios d'inondation vraiment différenciés ;
- de la même manière, à moins d'avoir une très bonne connaissance de l'atteinte progressive des enjeux ou de l'origine du calage des différents niveaux de vigilance, il est délicat de savoir a priori quelles hauteurs à la station seront les plus pertinentes comme référence de scénarios d'inondation à cartographier.

Il est donc concevable que le nombre de scénarios d'inondation produits soit supérieur au nombre de scénarios capitalisés.

L'illustration 9 ci-après synthétise les différents cas de production de données de zones inondables, et les sujets sous-jacents, qui seront abordés dans les paragraphes suivants.

Des données existantes à exploiter

Les services de l'État et d'autres organismes compétents en matière de prévention du risque d'inondation possèdent des données cartographiques sur les inondations. Ces données sont à exploiter autant que possible avant d'en produire de nouvelles. Parmi les scénarios existants les plus représentés, on retrouve :

- la crue du PPRi cartographiée dans les démarches réglementaires associées ;
- des crues passées, relevant de démarches informatives tels les atlas des zones inondables (AZI), crues observées dans un passé plus ou moins récent, en lien ou non avec les AZI ;
- trois scénarios de crue sur les territoires à risque important d'inondation (TRI) retenus dans le cadre de la Directive Inondation ;
- des crues « statistiques » correspondant le plus souvent à des débits de périodes de retour

données, en général 5, 10, 20, 30, 50 voire 100 ans (encore en lien avec les PPRi ou d'autres études d'aménagement ou de connaissance de l'aléa).

Au-delà des éléments déjà formalisés, ces mêmes services et organismes peuvent aussi posséder des données sur les crues historiques des repères de crue nivelés, des lignes d'eau - dont l'exploitation permettrait d'aboutir à de la cartographie d'inondation.

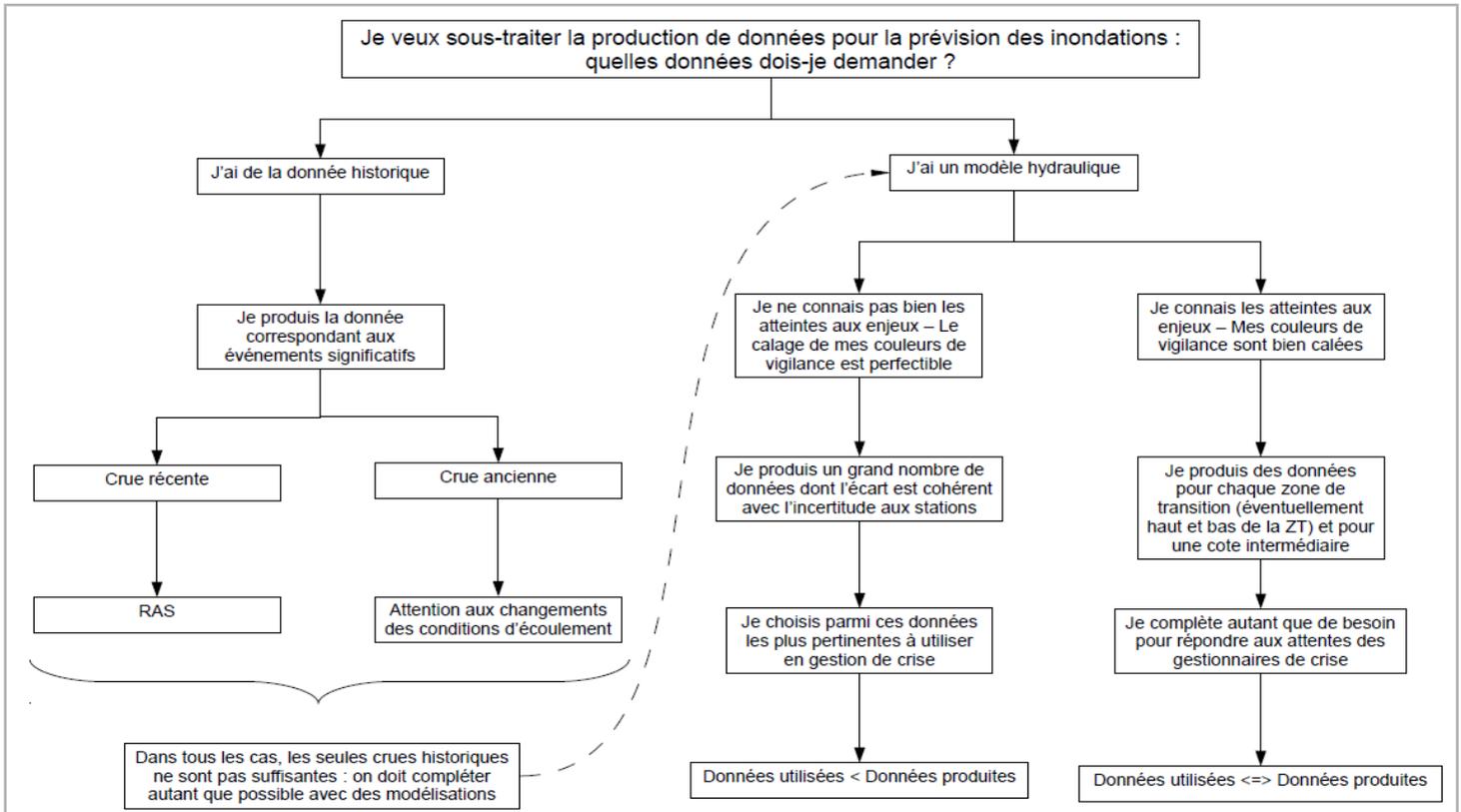


Illustration 9: Les différents cas de production de scénarios d'inondation pour la Prévision des Inondations

1 - Les Atlas de Zones Inondables

Les Atlas de Zones Inondables (AZI) sont issus de la circulaire du 24 janvier 1994 relative à la prévention des inondations et à la gestion des zones inondables. Ils ont été confortés par la lettre circulaire du 1er février 2002 et la circulaire aux préfets de région du 4 novembre 2003. Ils sont élaborés au niveau de bassin hydrographique. Ils ont pour objet de rappeler l'existence et les conséquences des événements historiques et de montrer les caractéristiques des aléas pour plusieurs crues, dont la crue de référence choisie, qui est la plus forte crue connue, ou la crue centennale si celle-ci est supérieure.

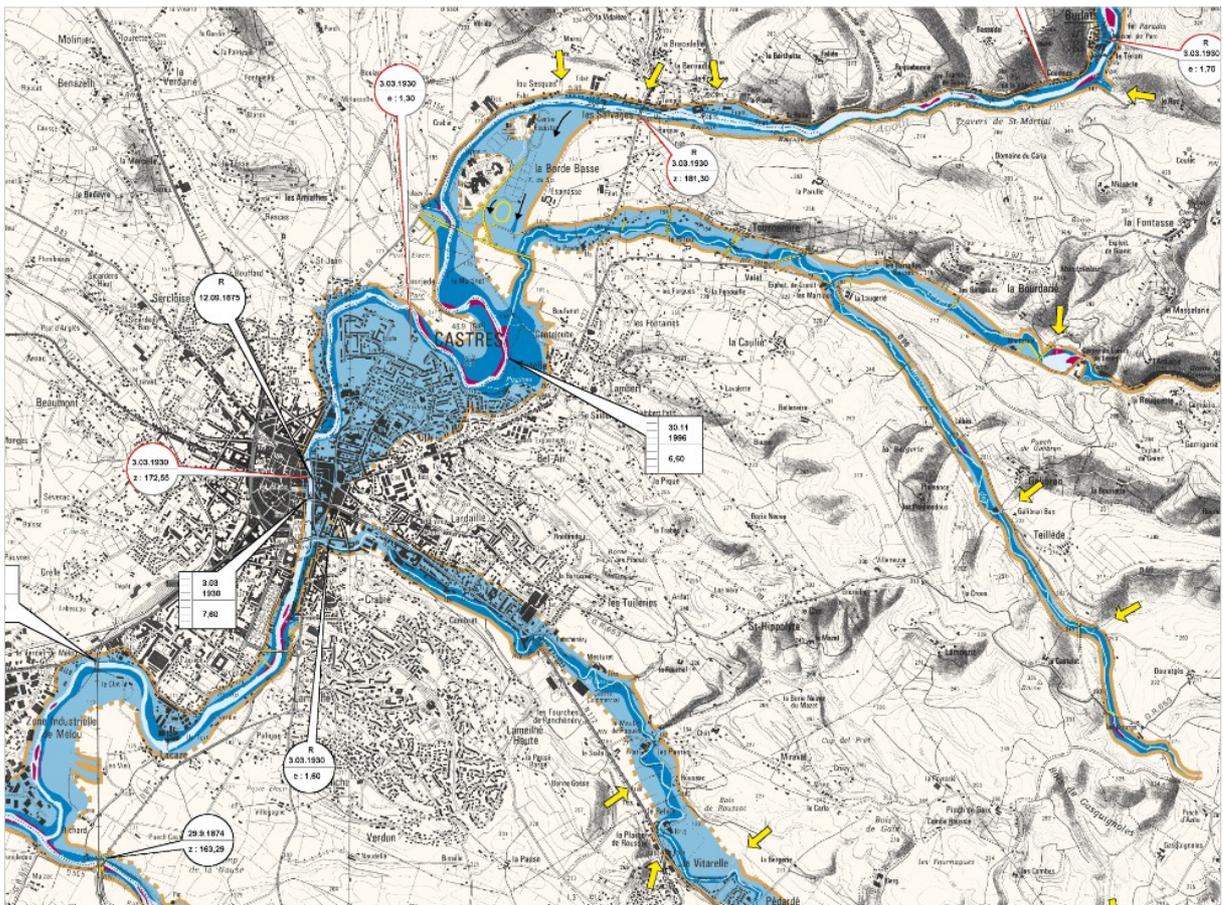


Illustration 10: Extrait de la cartographie des zones inondables en Midi-Pyrénées réalisée au début des années 2000 - Source : <http://www.haute-garonne.gouv.fr/>

L'AZI n'a pas de caractère réglementaire.

La production des données des atlas de zones inondables se sont appuyées généralement sur des approches qualitatives (méthode hydromorphologique) ou quantitative (exploitation de laisses de crue, modélisation hydraulique), que les notices d'accompagnement précisent. Suivant les méthodes de production, l'intégration des données dans la base de données VIGInond n'est pas donc toujours possible. En tout état de cause, les scénarios à intégrer sont en nombre limité et correspondent plutôt à des événements assez forts (crue centennale ou historique si supérieure, éventuellement crue décennale). On y trouvera au minimum des enveloppes d'inondations (pouvant être assimilées aux ZIP) et éventuellement des classes de hauteurs d'eau relatives à cette même enveloppe (pouvant être assimilées aux ZICH). Par ailleurs, ces éléments s'appuient généralement sur une topographie dont la précision a été largement

améliorée ces dernières années (acquisition de données LIDAR) : on veillera à être bien conscient de l'incertitude associée à ces données issues des AZI.

2 - Les PPRI

D'après les données de la base GASPAR¹⁴ qui recense notamment l'existence de PPRI sur les communes, environ 75 % des communes informées par Vigicrues sont couvertes par un PPRI approuvé. Au-delà du chiffre exact, ce pourcentage indique l'intérêt de l'exploitation des données issues de PPRI pour alimenter la base VIGInond.

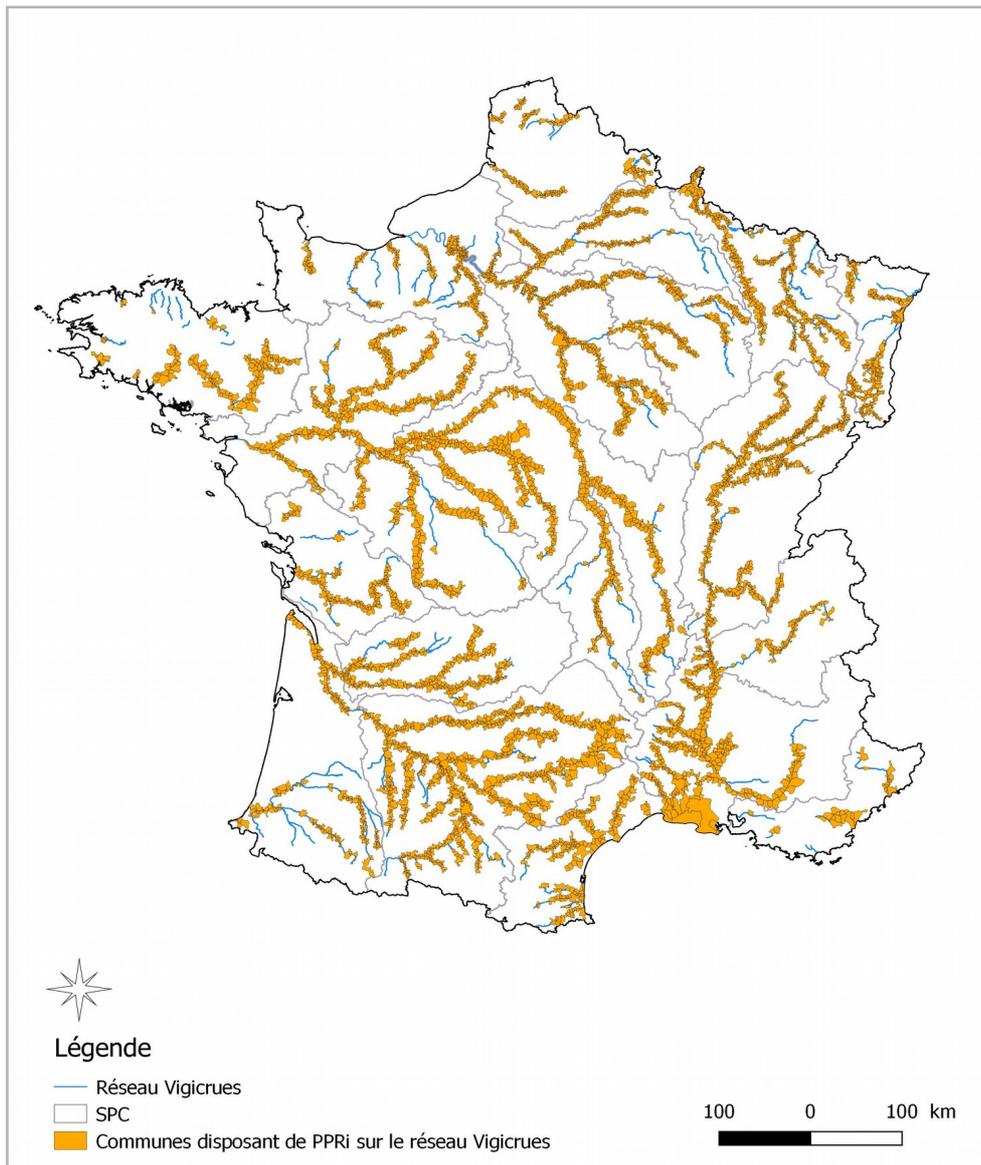


Illustration 11: Carte des PPRI approuvés sur les communes informées par Vigicrues. (Janvier 2017)

Les Plans de Prévention des Risques d'inondation (PPRI) sont issus de la loi n°95-101 du 2 février 1995

14 Gestion ASsistée des Procédures Administratives relatives aux Risques naturels et technologiques

relative au renforcement de la protection de l'environnement, aujourd'hui intégrée dans le code de l'environnement.

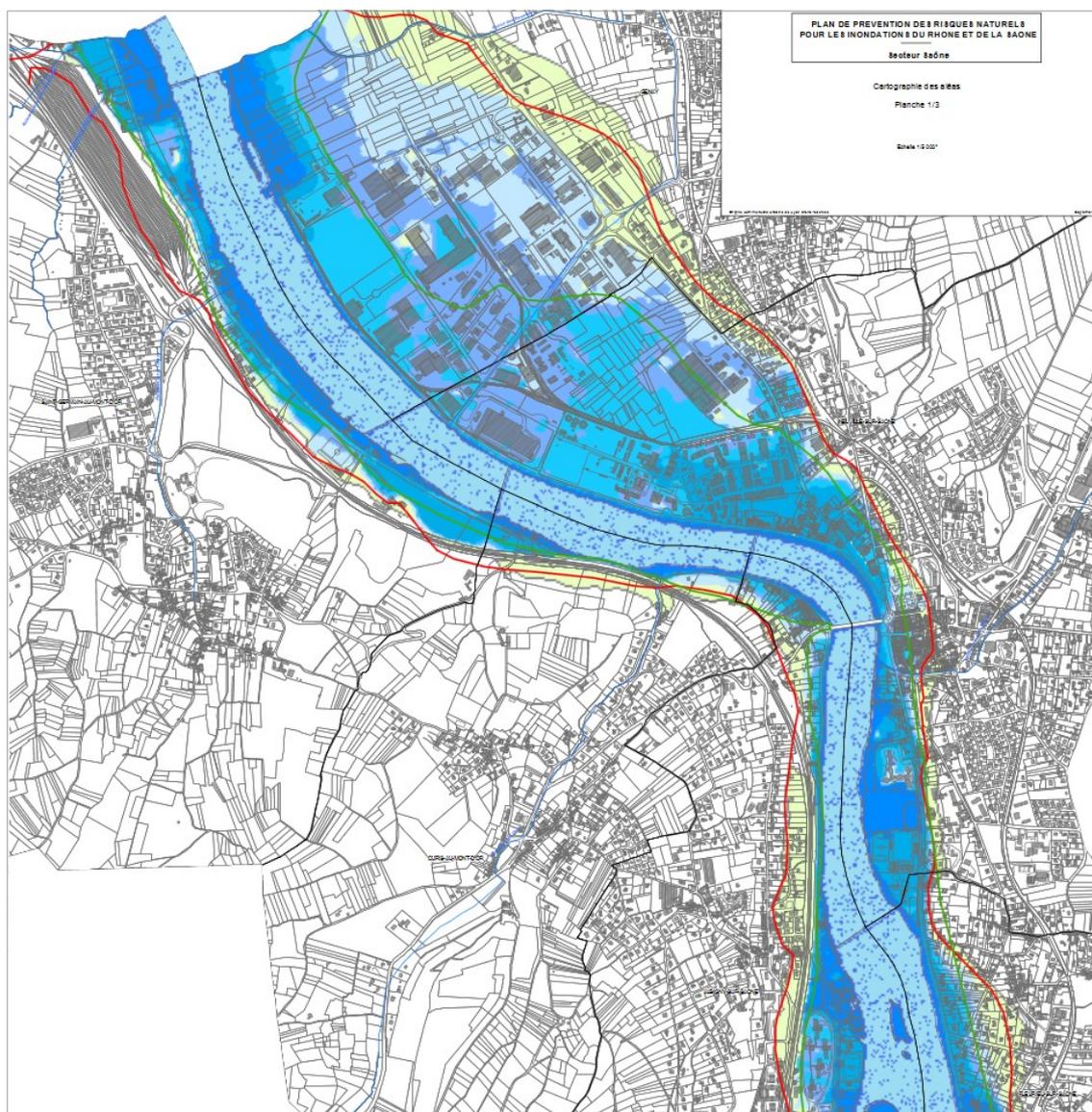


Illustration 12: PPRi du Grand-Lyon (Secteur Saône) - Carte des aléas n°1 - Décembre 2006 - Source : <http://www.rhone.gouv.fr>

Les PPRi sont des documents réglementaires, composés d'un zonage, d'un règlement et parfois d'une note explicative, approuvés par le préfet, opposables au tiers, à intégrer dans les documents d'urbanisme (PLU) et de planification (SCOT).

Le zonage du PPRi représente le risque, issu d'un croisement entre la vulnérabilité du territoire et l'aléa inondation. Ce dernier est issu d'un croisement entre la hauteur d'eau (paramètre intéressant les ZICH) et la vitesse d'écoulement en champ majeur, ces deux paramètres hydrauliques valant pour l'événement de référence choisi, à savoir la plus forte crue connue, ou la crue centennale si celle-ci est plus forte que la première.

De manière générale, deux limites apparaissent :

- des considérations politiques peuvent venir parfois modifier la cartographie purement technique, modification dont il faut rester conscient pour la réutilisation de la donnée ;
- la réalisation des PPRi sur un même cours d'eau peut présenter des discontinuités, suivant l'avancement des procédures : si la reprise de ces données est intéressante, elle devra probablement être complétée.

Les données des PPRi peuvent être reprises de manières différentes :

- telle quelle, l'emprise de la crue de référence peut être reprise en rapport à une échelle de vigilance. Ceci étant dit, cette emprise étant établie généralement sur une topographie ancienne moins précise que les données généralement mobilisables actuellement, il faut rester conscient de l'incertitude de ses limites ;
- la reprise des zonages est quant à elle à envisager avec prudence, ces zonages correspondant normalement à un croisement hauteur de submersion x vitesse. Ce croisement nécessite un retraitement pour identifier les zones où la vitesse ne vient pas modifier l'aléa hauteur ou pour retrouver cet aléa hauteur ;
- la transposition des cotes de la crue de référence sur de la topographie récente détaillée permet d'actualiser la connaissance des hauteurs de submersion. Ceci étant dit, cette approche montre deux limites :
 - les cotes initiales sont généralement issues de calcul hydraulique sur une topographie moins précise : l'amélioration de cette topographie pourrait justifier une reprise des calculs dans l'absolu. Néanmoins, si la modélisation a été correctement réalisée, la plupart des obstacles aux écoulements ont été pris en compte et les cotes peuvent être reprises telles quelles en première approche ;
 - l'amélioration de la topographie est susceptible de créer des différences dans le calcul de l'emprise et des hauteurs de submersion. Il est donc envisageable d'obtenir des emprises différentes entre le PPRi dans sa première version et la reprise des données du PPRi sur une nouvelle topographie. Le bord de la zone inondable est en particulier susceptible de changer ;
- le débit centennal ou historique (si supérieur) peut être réutilisé dans une modélisation hydraulique : si celui-ci a été actualisé depuis la première production du PPRi, le zonage de l'inondation et les hauteurs de submersion associées recalculés sur le modèle divergeront de la première version.

Ces éléments montrent que la reprise d'une cartographie existante peut amener à identifier la nécessité de la révision d'un PPRi. Une concertation avec la DDT est donc nécessaire pour que ces problèmes soient identifiés et que la pédagogie nécessaire soit déployée pour différencier cartographie réglementaire et cartographie de gestion de crise, potentiellement basées sur des données hydrauliques d'apparence identique mais différentes en réalité.

Cet échange entre producteur des ZIP / ZICH et la DDT pourra amener, le cas échéant et pour des raisons non techniques, à abandonner l'utilisation des emprises nouvellement calculées, différentes de la cartographie réglementaires. Il est délicat de juger a priori de la pertinence d'un tel choix. On gardera cependant en tête que malgré ces différences qui peuvent rendre délicate l'application réglementaire du PPRi, sont malgré tout la preuve d'une amélioration ou d'une mise à jour de la connaissance, présentant un intérêt certain pour la gestion de crise.

3 - La Directive inondation

Réalisées sur les territoires à risque important des bassins hydrographiques (dont la liste est progressivement élargie), les cartographies de l'aléa inondation issue de la transposition de la directive inondation intéressent la prévision des inondations, moyennant quelques ajustements décrits au chapitre 5. Emprises inondées de crues passées, page 30). Cette cartographie doit couvrir les scénarios suivants : fréquent (10 à 30 ans de période de retour), moyen (100 à 300 ans), extrême (~ 1000 ans).

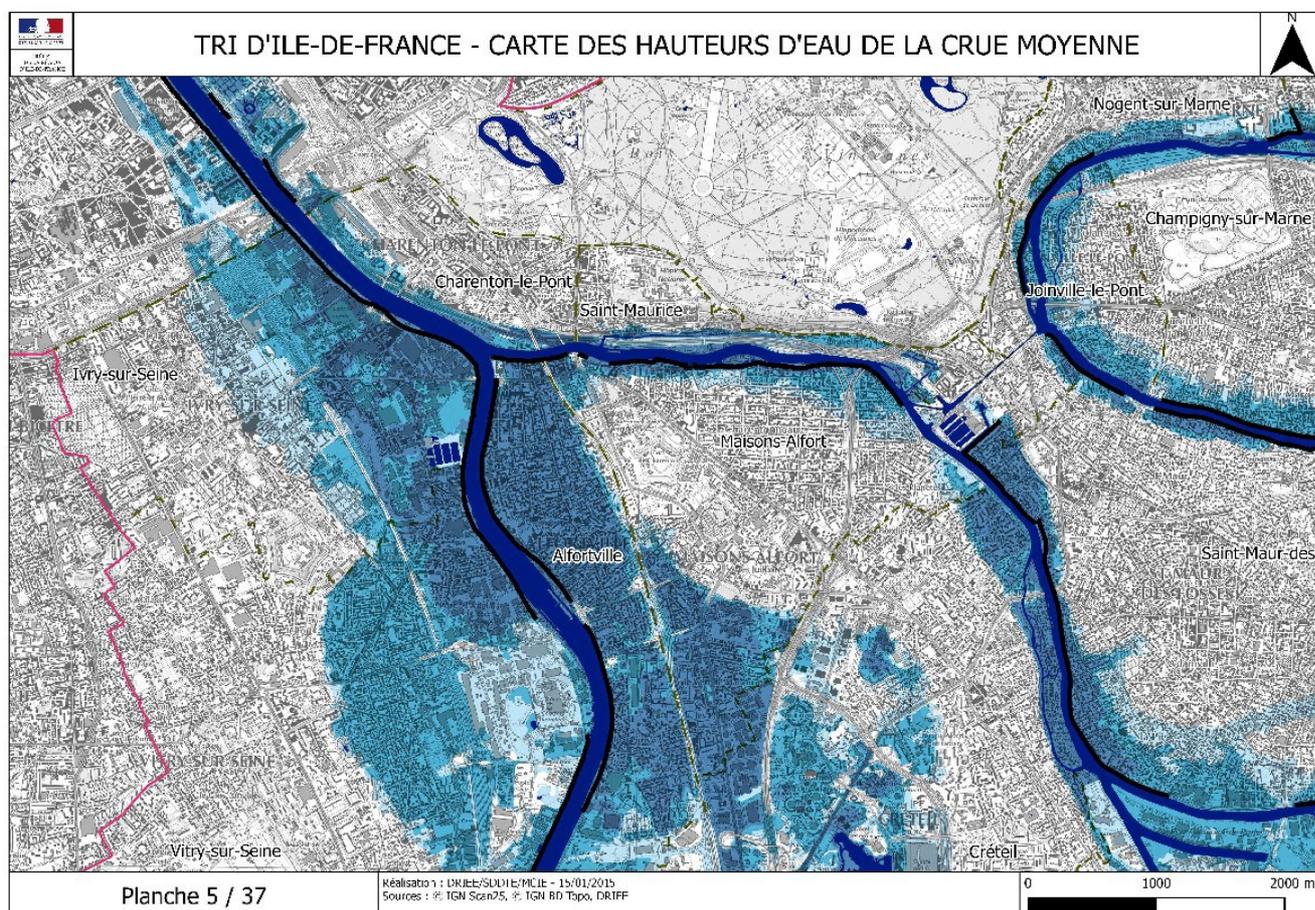


Illustration 13: Extrait de la cartographie réalisée sur le TRI d'Ile-de-France pour la crue moyenne - Décembre 2015 - Source : <http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/directive-inondation-r556.html>

Le scénario fréquent est un scénario qui a été le plus souvent étudié et cartographié. Il était optionnel principalement dans les secteurs endigués où les protections sont encore opérationnelles pour les débits de ce scénario (jusqu'à la crue trentennale). Sa réutilisation est intéressante car il s'agit d'une fréquence suffisamment forte pour avoir du sens en opérationnel.

Le scénario moyen a repris dans la grande majorité des cas le scénario PPRi (cf. Chapitre 2. Les PPRi, Page 26)

Pour le scénario extrême, il est préconisé de ne pas intégrer ce scénario, au moins dans un premier temps. En effet, l'occurrence millénale choisie pour le scénario extrême de la Directive Inondation souffre d'incertitudes fortes en hydrologie, hydrométrie et hydraulique. La traduction en hauteur d'un débit à une station nécessite l'extrapolation des courbes de tarage dans les domaines (très) éloignés des plus forts jaugeages. Il est donc complexe d'en déduire une hauteur fiable à une station. Qui plus est, certaines hypothèses, notamment la ruine de tous les ouvrages transversaux ou longitudinaux pour le scénario

extrême de la Directive Inondation n'ont pas été traités de manière homogène selon les régions (malgré la doctrine ministérielle).

C'est donc une fois qu'un catalogue de scénarios mis en place à toutes les stations de prévision du territoire SPC jusqu'à la crue PPRi, que l'on pourra éventuellement s'attaquer à des crues plus fortes avec le scénario extrême de la Directive Inondation comme limite haute.

4 - Exploitation des résultats d'études hydrauliques

En complément d'études de PPRi ou lors des études PAPI, il arrive que des scénarios de crues dites statistiques soient étudiés et cartographiés : il s'agit le plus souvent de crues de période de retour moindre que la centennale (2, 5, 10, 20, 30 et/ou 50 ans).

Ces crues statistiques méritent une attention particulière avant leur insertion dans VIGInond, notamment vis-à-vis de la corrélation entre un débit statistique du cours d'eau à la station et la hauteur correspondante. Deux points sont à regarder :

- la valeur du débit statistique et pas seulement sa période de retour. En effet, au fil des crues, les valeurs statistiques des débits évoluent, d'autant plus que la période de retour augmente et/ou que la chronique de mesure était courte au moment de l'estimation des débits statistiques. Le débit Q20 estimé 10 ans auparavant peut avoir notablement évolué si des crues importantes se sont produites entre temps. Il faut donc travailler avec la valeur brute du débit (en m³/s) modélisé ;
- une fois cette valeur du débit connue, il faut la traduire en hauteur à une station. Pour cela, l'usage est d'utiliser une courbe de tarage. Celle-ci peut aussi avoir évolué dans le temps : amélioration au fil du temps ou rectification suite à une modification naturelle ou artificielle du lit. La visée opérationnelle des données cartographiques de VIGInond impose de faire référence à la courbe de tarage en vigueur (ce qui sous-entend qu'il est nécessaire de mettre à jour cette référence lors d'un changement notable de courbe de tarage).

5 - Emprises inondées de crues passées

Les crues passées ont généralement été observées. Deux étapes sont nécessaires pour envisager une intégration de ces événements dans la base VIGInond : la reconstitution de la ligne d'eau et de l'emprise de l'inondation associée, d'une part, et, le rattachement de ces données à une cote à la station de référence d'autre part.

La reproduction de l'inondation passée s'appuie généralement sur l'exploitation de laisses de crue, appelées à être capitalisées dans la base nationale des repères de crue (www.reperesdecruces.developpement-durable.gouv.fr). L'exploitation de prises de vue aériennes peut également fournir un contour de l'inondation, voire des cotes atteintes (cf. Illustration). On veillera cependant dans ce cas à la concordance de l'image et du maximum de la crue.

Dans ces deux cas, on se reportera à la documentation issue des travaux SPC-SCHAPI et relative à la cartographie de zones inondées observées¹⁵.

15 Documentation accessible sur l'extranet de la Prévisions des Crues et Hydrométrie : <http://pch.metier.e2.rie.gouv.fr/la-production-de-zones-inondees-r591.html>

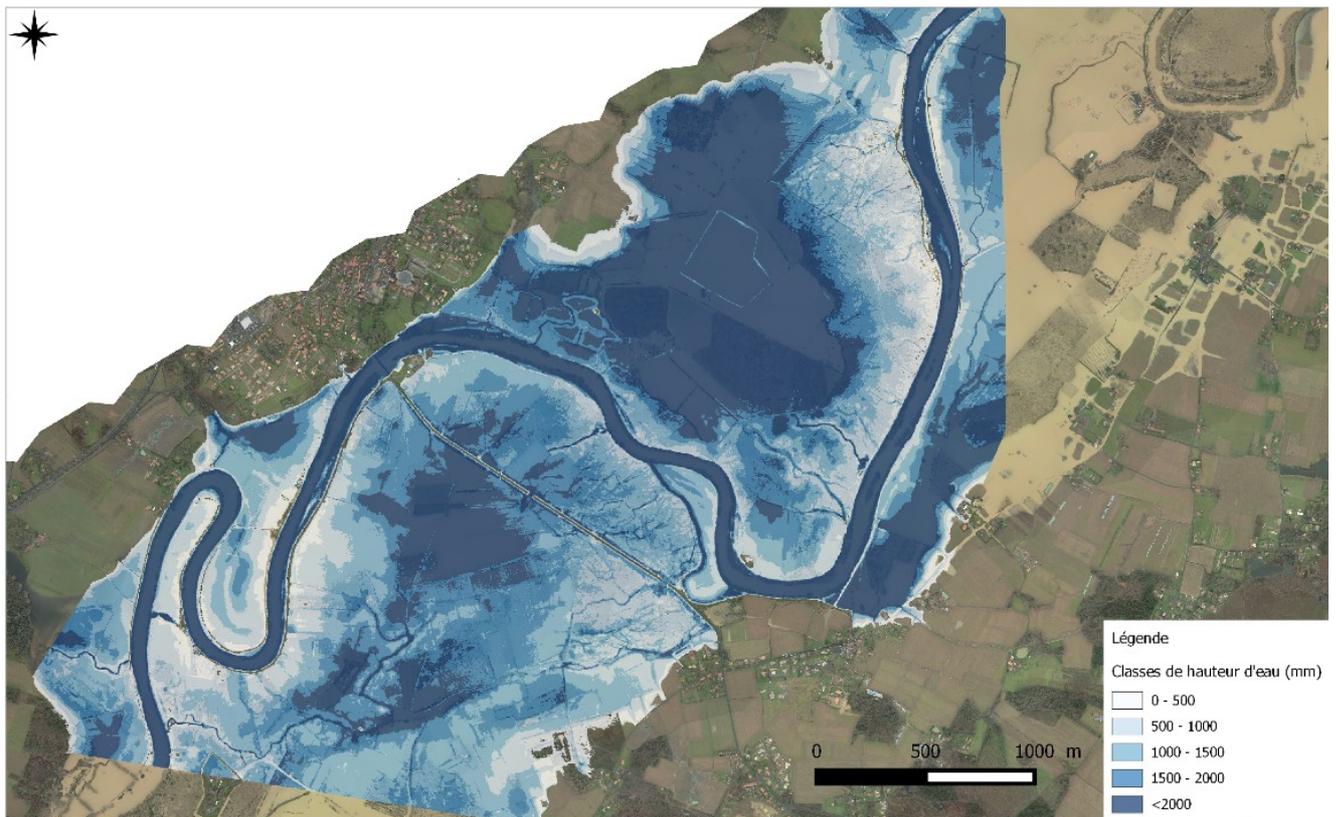


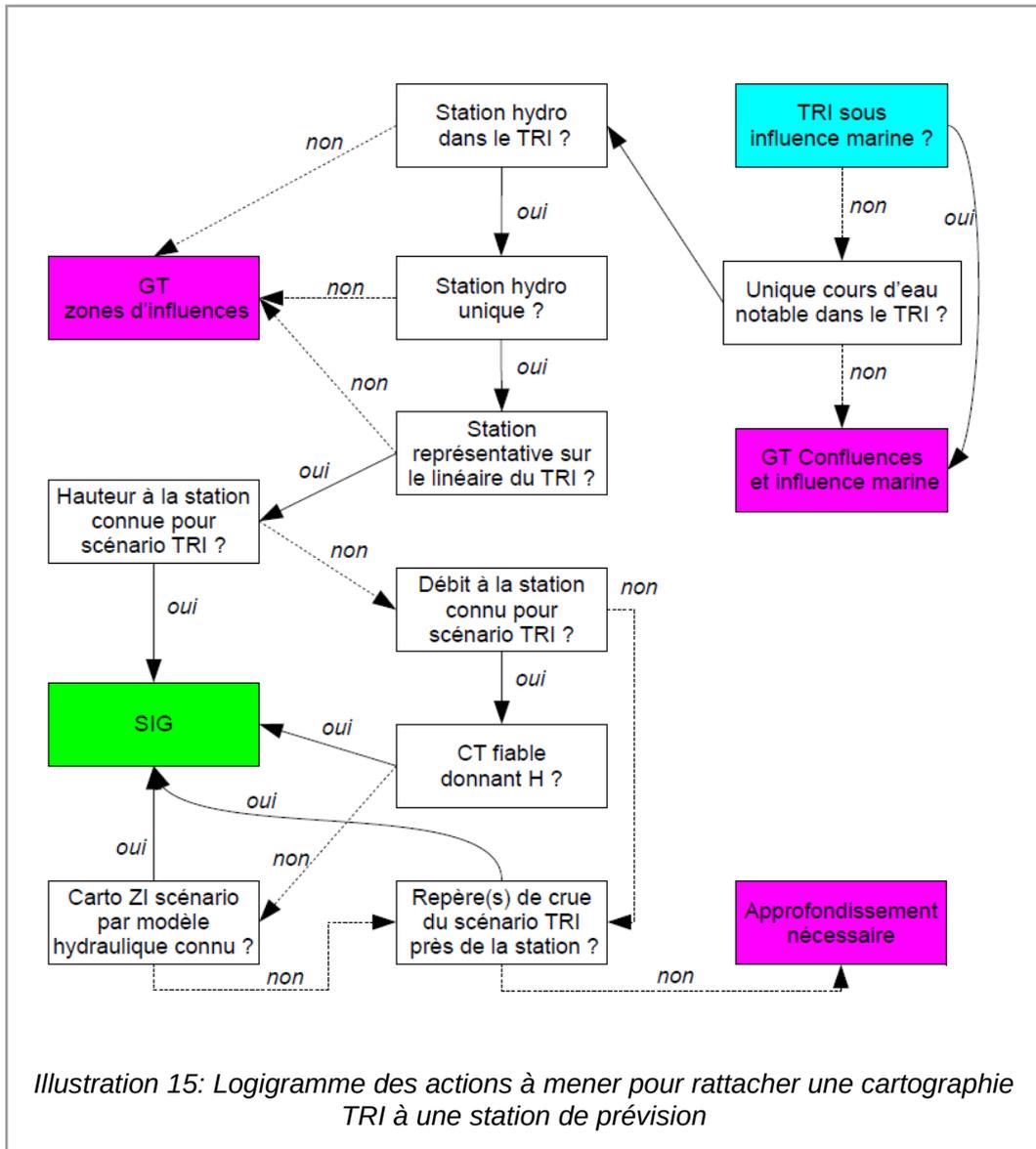
Illustration 14: Zone inondée et ses classes de hauteurs d'eau créée à partir de laisses de crues observées sur une prise de vue aérienne, d'un MNT LIDAR et du plugin QGIS CartoZI - Source : poster "De l'observation de la crue à la représentation de l'inondation : les apports de la cartographie numérique- ANRN - Mars 2016"

En l'absence de mesure d'une crue passée à une station (soit car la station n'existait pas, soit car l'enregistrement des données a été perturbé), des moyens existent pour retrouver la hauteur ou le débit au droit de la station, sous réserve de posséder des données idoines :

- exploitation d'une ligne d'eau reconstituée fournissant la cote, puis la hauteur atteinte à l'échelle ;
- exploitation directe ou interpolation de repères de crue nivelés à proximité de la station,
- exploitation d'une emprise inondée reconstituée en projetant sur un MNT les limites de l'inondation au droit de la station.

Dans tous les cas, on s'assurera que les conditions d'écoulement en lits mineur et majeurs n'ont pas évolué notablement depuis la crue reconstituée, en particulier pour garantir un rattachement correct à l'échelle de référence. Dans certains cas, la crue passée n'aura alors pas vocation à intégrer VIGInond.

Le logigramme ci-après (Illustration 15), établi à l'issue des réflexions du groupe de travail thématique sur l'exploitation des données de la Directive Inondation permet de dérouler les actions à mener pour rattacher une cartographie TRI (ou autre) à une station de prévision.



6 - Conclusion

Dans le cas où le nombre de jeux de données disponibles est relativement faible, on sera tenté de tout utiliser, avec les réserves explicitées dans les sous-chapitres précédents.

A l'inverse, dans le cas où le nombre de jeux de données disponibles est, par chance, relativement grand, il est important qu'il soit réduit à un nombre suffisant et utilisable avec les gestionnaires de crise et les RDI. Des écarts substantiels en termes d'emprise de zones inondées, d'atteinte aux enjeux ou de hauteurs de submersion, et les effets de seuil permettent de ne pas utiliser des jeux de données trop « proches ».

L'étude des atteintes aux enjeux doit dans tous les cas associer les RDI, qui apporteront leur connaissance de ces enjeux et leurs besoins en termes de données pour appuyer correctement les gestionnaires de crise.

Principes de base pour le choix des scénarios à cartographier

Il s'agit de disposer de scénarios représentatifs, non exhaustifs mais utiles à la gestion de crise. On cherchera à cartographier des scénarios de crue différenciés en termes d'emprises inondées, et si les limites des emprises inondées sont rapidement atteintes, différenciés en termes de hauteurs d'eau.

Il ne semble pas exister de méthode universelle précise permettant d'identifier a priori le nombre de scénarios à produire et à capitaliser. L'analyse des aléas et des atteintes aux enjeux, qui ne peut se faire que dans une deuxième phase après la production des premiers scénarios, est donc primordiale. Cette analyse ne peut se faire sans associer la mission RDI des DDT(M), la plus à même de juger des besoins des préfectures, sur la base de leurs connaissances et de leur expérience. Depuis 2014-2015, des travaux collaboratifs entre SPC et DDT ont été initiés dans ce but (Exemple des travaux DDT 77 – SPC SMYL, présentés aux journées Prévision des Inondations, septembre 2015¹⁶).

Néanmoins, avant d'entreprendre la réalisation de nouveaux scénarios, la première action consiste à faire le bilan des scénarios existants, issus de travaux antérieurs (études PPRi, AZI, PAPI, crues historiques documentées). Cette étape risque cependant de limiter les scénarios cartographiés à des événements de fréquences faibles.

Il s'agit de produire des scénarios différenciés en termes d'emprises inondées sans chercher l'exhaustivité. Aussi, quelques préconisations fortes ressortent :

- la limite haute du jeu de données : le scénario de la crue du PPRi (la plus forte crue connue et documentée ou la crue centennale si elle est supérieure à la précédente) recensé et mis en forme, voire recalculé dans des cas précis (cf. Chapitre Les PPRi);
- la limite basse : la zone de transition vert / jaune et de préférence, la valeur haute de cette zone de transition ;
- les scénarios de crue correspondant aux autres zones de transition, car elles témoignent a priori des éventuels effets de seuils dans l'atteinte des enjeux. La limite haute est à privilégier mais si l'écart entre les limites basses et hautes est substantiel (il est supérieur à 20 cm dans 25 % des cas), il faut envisager d'avoir deux scénarios (bas et haut) pour une zone de transition.

Entre ces 3 à 6 scénarios prioritaires, d'autres scénarios intermédiaires peuvent être produits et pour certains capitalisés en complément.

Le nombre de scénarios à produire doit être limité ou contraint par la cohérence des écarts entre référence à l'échelle et incertitude de mesure à la station qui doivent être du même ordre. L'incertitude de prévision en hauteur à la station se gère quant à elle à travers le choix de deux emprises pour encadrer la prévision et son domaine d'incertitude.

Le choix de la limite basse résulte d'avoir un premier scénario d'inondation avec le niveau de vigilance jaune qui implique l'écriture d'un bulletin. Dans la majorité des cas, cette première inondation du champ majeur correspond à la valeur haute de la zone de transition vert/jaune. Dans d'autres cas, plus restreints en nombre, l'inondation n'est pas le premier facteur conduisant au passage en vigilance jaune (jaune « navigation »). Néanmoins, dans ces cas-là, il restera intéressant de conserver ce haut de la zone de transition vert/jaune pour le premier scénario, quitte à ne représenter qu'un lit mineur en eau : savoir qu'il n'y a pas d'inondation en vigilance jaune est une information en soi.

16 Présentation disponible sur l'extranet du réseau Prévision des crues et Hydrométrie :

[http://pch.metier.e2.rie.gouv.fr/fichier/pdf/14h30_DRIEE_DDT77_cle2f1c5c.pdf?](http://pch.metier.e2.rie.gouv.fr/fichier/pdf/14h30_DRIEE_DDT77_cle2f1c5c.pdf?arg=5395&cle=d90dd092004a80559836e68b06782586ecbcb671&file=pdf%2F14h30_DRIEE_DDT77_cle2f1c5c.pdf)

[arg=5395&cle=d90dd092004a80559836e68b06782586ecbcb671&file=pdf%2F14h30_DRIEE_DDT77_cle2f1c5c.pdf](http://pch.metier.e2.rie.gouv.fr/fichier/pdf/14h30_DRIEE_DDT77_cle2f1c5c.pdf?arg=5395&cle=d90dd092004a80559836e68b06782586ecbcb671&file=pdf%2F14h30_DRIEE_DDT77_cle2f1c5c.pdf)

Quelles méthodes de production ?

Plusieurs méthodes co-existent pour produire des cartographies de zones inondées :

- la valorisation de données sur des crues passées et notamment les repères de crues qui marquent les plus hautes eaux (PHE) atteintes lors d'une ou plusieurs crues : à partir des PHE, on peut reconstituer des lignes d'eau historiques qui serviront d'appui à la construction d'une emprise inondée ; les prises de vue aériennes sont également une source pour le tracé d'emprises inondées ;
- la modélisation hydrodynamique : construction d'un modèle à partir des données topographiques en lits mineur et majeurs, calage du modèle sur des événements passés, calculs à l'aide d'un code qui résout les équations de l'hydraulique à surface libre, exploitation des résultats sont les grandes étapes de la modélisation pour parvenir à une emprise inondée ;
- l'approche hydrogéomorphologique : méthode « naturaliste » et qualitative, elle permet de dégager les grandes structures d'une plaine inondable, typiquement les lits mineurs, moyens, exceptionnels et l'encaissant.

Contrairement à ce que l'on entend ou ce que l'on peut lire parfois, ces méthodes ne sont pas antagonistes mais plutôt complémentaires. En effet, il n'y en a pas une meilleure que l'autre dans l'absolu. Mais chaque méthode possède ses avantages et ses inconvénients et il est surtout important de mettre en œuvre celle(s) les plus adaptée(s) à son propre cas d'étude.

Dans le cadre de la constitution d'un catalogue de scénarios d'inondation sur la base de hauteurs atteintes à une station, il va de soi que la cartographie basée sur l'hydrogéomorphologie ne sera pas pertinente car elle est essentiellement qualitative. Malgré tout, certains points de la méthode peuvent être utilisés en contrôle.

La production peut être faite :

- en régie, sous réserves d'avoir les ressources, et d'avoir ou de développer les compétences pour ce type de travail, sachant notamment que des outils et des formations ont été développés par et pour le réseau Vigicrues. On conçoit parfaitement que tous les services ne puissent le faire. On gardera cependant à l'esprit que le travail en régie a aussi un coût : celui de l'agent, de sa formation et de son matériel.
- En sous-traitance directe ou indirecte : en direct, ce sera un appel aux moyens du CEREMA ou à des bureaux d'études privées ; en indirect, ce sera des conventions ou des partenariats avec des organismes qui travaillent en régie et/ou avec des financements de l'Etat : les EPTB par exemple.

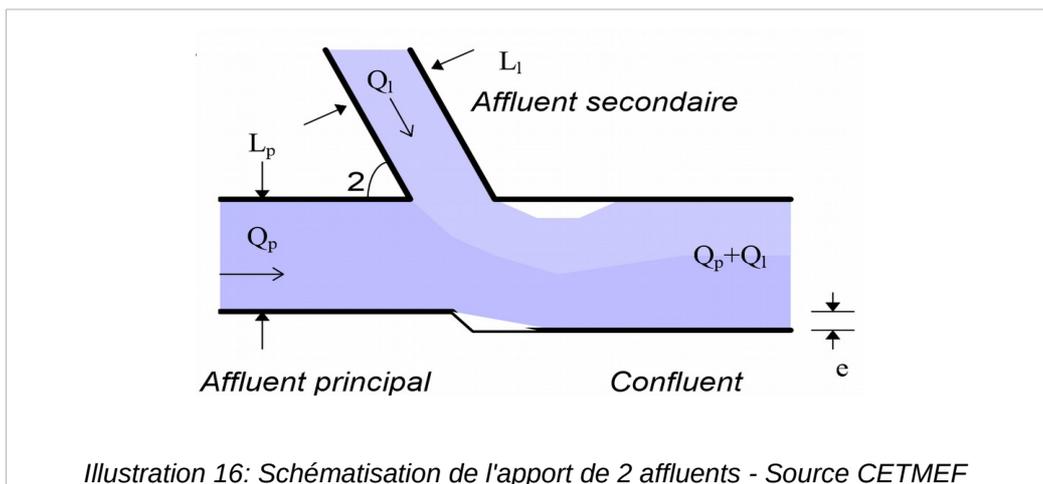
Méthodologie des cas particuliers

Ce chapitre 5, issu des travaux partiellement aboutis du groupe de travail « Confluences et Estuaires » et complété sur certains points par le rédacteur, mérite d'être approfondi pour apporter des éléments pratiques et applicables aux cas à traiter.

Les confluences

Une confluence est une connexion hydraulique entre deux (ou plusieurs) cours d'eau. Dans la majorité des cas, les apports des deux cours d'eau, notamment en crue, sont différents sans être toujours à l'avantage du même cours d'eau. Il arrive aussi que les apports soient similaires.

La rencontre de deux écoulements distincts dans une confluence génère une perturbation des lignes de courant : abaissement ou exhaussement (courbe de remous). L'ampleur du phénomène est fonction de la géographie du site et de la configuration de la confluence.



Le débit au niveau de la confluence est la somme des débits aux stations de mesures sur les affluents (s'il y en a), corrigée des temps de propagation entre les stations et la confluence (cf. Illustration 16). Ce déphasage des ondes de crue peut aggraver ou minorer le phénomène de crue au droit, à l'aval et même parfois à l'amont de la confluence. Les paramètres les plus influents doivent être identifiés.

1 - Les paramètres d'influence pour les confluences

Citons :

- Caractérisation des cours d'eau
- Apports respectifs en débit des cours d'eau contributeurs selon différents épisodes de crue
- Angle entre les deux cours d'eau à la confluence
- Déphasage des ondes de crue entre les contributeurs et degré de concomitance des crues

2 - La caractérisation des confluences

a) Généralités

Dans les zones de confluence, les écoulements hydrauliques sont influencés en fonction des apports des différents contributeurs. Pour un même débit d'un cours d'eau, on peut observer des hauteurs d'eau différentes en fonction du débit coulant dans l'autre contributeur. De nombreux scénarios (modification de la ligne d'eau, inversion des écoulements...) peuvent être constatés et envisagés avec des influences plus ou moins fortes sur le niveau des cours d'eau.

À l'aval d'une confluence, les hauteurs d'eau dépendent de la somme des débits des affluents. Le champ d'inondation en aval de la confluence est moins sensible à la typologie des flux de chaque contributeur.

L'analyse du fonctionnement hydraulique, hydrologique et hydrométrique d'une confluence est complexe :

- les écoulements débordants ne se font pas uniquement selon l'axe préférentiel de chaque vallée
- dans certains cas, les écoulements peuvent s'inverser si l'un des deux cours d'eau est en crue et pas l'autre. Moins le cours d'eau sans crue sera puissant par rapport à l'autre en crue, plus le remous sera visible.
- les stations d'hydrométrie situées en amont et à proximité de la confluence peuvent être influencées
- la crue à l'aval de la confluence dépendra de l'importance des apports de chacun des cours d'eau mais aussi de la concomitance de ces apports.
- Valeur des débits : un cours d'eau est significativement influencé si le rapport des débits (débit le plus élevé sur débit le plus faible) est supérieur à un facteur 5.

b) Caractérisation de la confluence par la largeur des affluents

Pour des pentes similaires (même ordre de grandeur) sur les deux cours d'eau confluent, la largeur au miroir de chaque contributeur, à proximité de la confluence, peut indiquer l'importance relative des deux cours d'eau l'un par rapport à l'autre. « De plus, si le cours de l'un des deux s'élargit significativement à l'approche de l'autre, c'est souvent le signe qu'il subit son influence, et donc, qu'il est fortement dominé. » (Guide méthodologique pour les études hydrauliques).

- Un linéaire de cours d'eau reste homogène en interceptant un (ou plusieurs) affluent(s) dont la largeur est inférieure au dixième de sa propre largeur.
- Si l'affluent a une largeur plus importante, l'homogénéité se perd au droit de la confluence. Nous avons alors deux linéaires différents de part et d'autre de cette zone.

c) Caractérisation des confluences par les enjeux

On peut se permettre d'être moins rigoureux dans les zones à faibles enjeux, notamment à proximité des confluences qui sont des secteurs complexes à appréhender. Cette moindre rigueur peut prévaloir pour produire un premier jeu de scénarios d'inondation. Dans un second temps, ce jeu pourra être améliorée moyennant des analyses et études plus approfondies.

d) *Caractérisation de la confluence par les surfaces de bassin versant*

Cette approche par bassin versant est une des plus rapides à mettre en œuvre puisque l'on connaît les surfaces de bassins aux confluences (source Base Nationale des Bassins Versants) au-delà de 5 km². On peut donc extraire les informations pour tous les cours d'eau, notamment ceux ayant un tronçon de vigilance. Pour des cours d'eau de bassins réagissant de manière relativement homogène aux pluies, le rapport des tailles de bassin sera proche lié au rapport des débits de crue pour une même occurrence. Pour les bassins dont le rapport de surface dépasse 5, on peut déjà en déduire que le cours d'eau principal ne sera pas influencé, ce qui facilitera l'analyse.

Cette approche permet de repérer les confluences à forte influence mutuelle entre les affluents. D'autres paramètres, tels que le régime des pluies, peuvent influencer sur la production des bassins versant.

e) *Étude des concomitances aux confluences*

Quand un cours d'eau ne prend pas l'ascendant sur l'autre, la concomitance des maxima de crue est un facteur aggravant en aval. Un exemple intéressant concerne l'Oise et l'Aisne qui confluent à Compiègne. En décembre 1993, une très forte crue se produit sur les deux cours d'eau mais les maxima sont décalés dans le temps. Début 1995, une nouvelle crue se produit, moins forte sur les deux cours d'eau en amont de leur confluence. Mais la concomitance des maxima donnera une crue plus forte en aval qu'en 1993.

Il est donc important d'étudier finement l'historique des crues pour dégager des tendances :

- la concomitance est-elle la règle ou non ?
- les crues de deux contributeurs sont-elles indépendantes ou non, notamment vis-à-vis de la pluviométrie à l'origine des crues ? Ce paramètre n'a souvent de sens que pour les grands bassins (cf. Seine et Loing ; Loire et Cher en juin 2016) ?

Le tableau ci-dessous illustre l'étude historique des crues à la confluence de l'Aisne et de l'Oise.

Crue	Concomitance Oise/Aisne	Débit maximum de l'Oise à Creil (m ³ /s)
Mars 1910	?	540
Janvier 1920	Oui	560
Novembre 1924	Oui	510
Janvier 1926	Oui	580
Décembre 1944	Oui	470
Février 1945	Oui	500
Mars 1956	Oui	290
Mars 1958	Oui	540
Novembre 1963	+/-	370
Janvier 1966	+/-	510
Décembre 1966	Non	540
Décembre 1967	Oui	460
Juillet 1969	+/-	155
Mars 1970	+/-	540
Mai 1970	Oui	350
Février 1977	Non	310
Février 1980	+/-	510
Novembre 1984	+/-	300
Décembre 1993	+/-	640
Janvier 1995	Oui	670
Février 1999	Oui	370
Janvier 2001	Oui	460
Mars 2001	Oui	600
Mars 2002	Oui	480
Janvier 2003	Oui	540
Janvier 2011	+/-	500

Illustration 17: Tableau de synthèse des concomitances Oise/Aisne pour 26 crues marquantes du bassin de l'Oise - Source : étude hydrologique globale du bassin versant de l'Oise.

Les zones estuariennes

1 - Généralités

Les zones estuariennes sont des secteurs complexes pour la prévision des inondations car plusieurs phénomènes peuvent s'entre-mêler :

- la marée « pure », phénomène transitoire de montée et de descente du niveau marin lié à l'attraction de la Lune et du Soleil. La marée est caractérisée par un coefficient compris entre 20 et 120 (simplification d'écriture en% car il est en réalité compris entre 0,2 et 1,2), dépendant de la position astronomique des deux astres et de la Terre. Multiplié à la hauteur moyenne et ajouté à la hauteur de base (deux valeurs caractéristiques de chaque port), ce coefficient permet d'obtenir avec une bonne fiabilité la hauteur à marée haute dans chaque port. En France, le littoral de la façade ouest est soumis à des marées semi-diurnes avec 2 cycles de marée par jour, espacée en théorie de 12h25 dont 1 cycle (à coefficient égal) est un peu plus fort que l'autre.
- les conditions atmosphériques (pression, vent) et maritimes (houle) qui peuvent provoquer des surcotes ou des sous-cotes,
- le croisement du passage d'une onde de crue avec le signal de marée, avec le cas le plus défavorable qui est le passage du maximum de la crue au moment de la pleine mer.

Ces multiples entrées (marée, sur/sous-cote éventuelle, crue éventuelle) à croiser augmentent exponentiellement les cas possibles. Ce qui nous amènera par la suite à les décomposer.

La Lune ayant une part prépondérante dans le phénomène des marées, une alternance est observée sur un rythme hebdomadaire entre période de mortes-eaux – faibles coefficients visibles lors des quartiers de Lune – et période de vives-eaux – forts coefficients aux syzygies Lune-Terre-Soleil. Les coefficients de marée fluctuent donc à la baisse pendant une semaine et à la hausse la semaine suivante (deux cycles durent précisément 29,5 j, durée de révolution synodique de la Lune autour de la Terre). Cette répartition

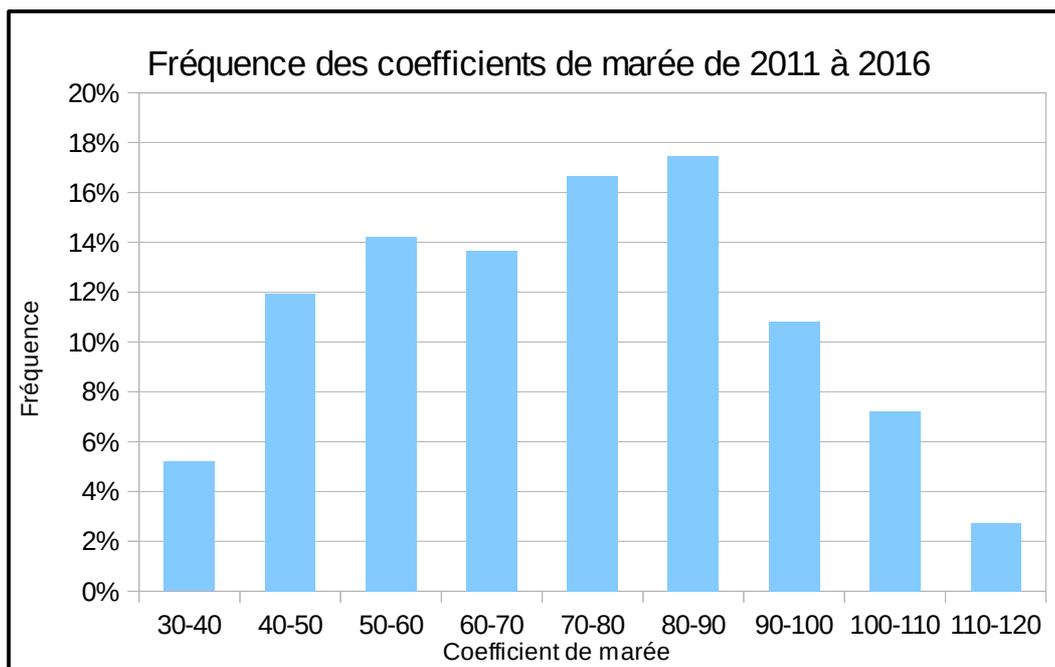


Illustration : Fréquence des coefficients de marées de 2011 à 2016

pour la survenance des coefficients de marée est présentée en Illustration 18.

Pour des conditions atmosphériques normales (pression, vent, houle), le signal de marée est parfaitement connu et prédictible très longtemps à l'avance sous la forme de marégrammes. Ces courbes sont disponibles notamment aux différents marégrammes du réseau RONIM piloté par le SHOM. Par convention, ces données sont fournies au réseau PC&H.

Les données observées du niveau d'eau et des sur/sous-cotes atmosphériques sont disponibles à travers des graphiques accessibles à tous. Les prévisions de surcote, non affichées sur les graphiques, sont fournies par Météo France en lien avec le SHOM.

On peut aussi obtenir les marégrammes prévus à un plus grand nombre de ports via des sites web spécialisés, tel maree.info.

2 - Phénomène maritime seul

En l'absence de crue des cours d'eau sous influence marine, seul le signal de marée aura une influence sur le niveau d'eau. L'impact des conditions atmosphériques sur le signal de marée est à scinder en trois :

- la pression atmosphérique : toute évolution de 10 hPa de la pression atmosphérique par rapport à la pression normale (1013 hPa) se traduit par une évolution de 10 cm du niveau marin ;
- le vent : sa direction est prépondérante, la vitesse étant un caractère aggravant si la direction du vent est défavorable. c'est donc l'orientation de l'estuaire par rapport à la direction du vent qui est à étudier ;
- la houle, générée par le vent au large.

Enfin, les conditions maritimes (houle, sa force et sa direction) peuvent également participer à augmenter les niveaux de pleine mer.

Les paramètres à prendre en compte pour déterminer le scénario de marée se rapprochant de la situation en cours sont donc :

1) coefficient de marée

2) surcote atmosphérique + effet de la houle et du vent => surcote globale

En chaque port intéressant un estuaire surveillé, **la production d'un tableau à double entrée** (Illustration 18) facilitera la prise en compte de ces paramètres : le coefficient de marée et la surcote, dont le croisement donne la hauteur d'eau de la pleine mer. L'exemple ci-dessous détaille les hauteurs d'eau de pleine mer au marégraphe de Brest en fonction des deux paramètres pré-cités.

On remarque sans grande surprise, que des conditions atmosphériques et de marée différentes aboutissent à des hauteurs d'eau à la pleine mer similaire (la même couleur dans le tableau avec une incertitude de 20 à 25 cm) :

		Sous-cote / surcote (m)						
		-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2
coef de marée	90	5,88	6,38	6,88	7,38	7,88	8,38	8,88
	95	6,03	6,53	7,03	7,53	8,03	8,53	9,03
	100	6,18	6,68	7,18	7,68	8,18	8,68	9,18
	105	6,33	6,83	7,33	7,83	8,33	8,83	9,33
	110	6,49	6,99	7,49	7,99	8,49	8,99	9,49
	115	6,64	7,14	7,64	8,14	8,64	9,14	9,64

Illustration 18: Exemple de tableau à double entrée intégrant les paramètres de surcote et coefficient de marée

En faisant l'hypothèse (prise ici juste pour illustrer la finalité de la méthodologie) que les premiers débordements apparaissent pour un coefficient de 105 sans surcote, on aurait 6 à 7 scénarios d'inondation à produire avec un pas d'une trentaine de cm (ce qui est assez fin) pour traiter tous les cas de submersion sans crue. Et la majorité des scénarios seraient exploitables en opérationnel pour différentes configurations de marée et de surcote.

Pour exploiter au mieux ce tableau, il faut **connaître la valeur du coefficient de marée le plus fort avant les premiers débordements dans des conditions atmosphériques normales**. Les marées étant des phénomènes cycliques à période relativement courte même pour des coefficients élevés, la connaissance de ce coefficient « seuil » semble accessible, d'autant qu'il n'y a que 18 estuaires atlantiques avec des tronçons de vigilance, répartis sur 6 SPC (soit une moyenne de 3 estuaires par SPC).

La marée se propage dans l'estuaire et l'étales de pleine mer dure une grosse heure. Les volumes débordés dépendent donc fortement de la durée de la submersion. Si les surfaces submergées sont limitées (quais, routes), l'emprise inondée sera peu dépendante de la durée de submersion. A l'inverse, plus les surfaces potentiellement submersibles sont importantes, plus la durée de submersion aura une influence sur l'emprise inondée. Deux approches sont donc possibles :

- une approche simplifiée : on fait l'hypothèse que les zones inondées dépendent peu du volume débordé qui sera plus ou moins constant pour le même scénario de marée. A partir d'une ligne d'eau fictive dans l'estuaire correspondant aux plus hautes eaux d'une marée donnée, on en déduit les zones inondées.
- une approche plus approfondie qui nécessiterait la mise en œuvre et l'exploitation d'un modèle hydrodynamique .

Les basses plaines méditerranéennes

1 - Présentation de la problématique

Les cours d'eau pentus sur leur partie amont débouchent dans de larges plaines inondables au relief très peu marqué, qui prennent souvent la forme d'un éventail, avec parfois des endiguements pour corser l'affaire. Le lit en toit est aussi caractéristique de ces secteurs à cause du dépôt des matériaux charriés sur les berges : les débits débordants reviennent rarement dans le lit mineur. De plus, ils ne sont pas mesurés par la station la plus aval, dont le niveau peut plafonner, sans aucune corrélation avec l'évolution des débits débordants, qui peuvent, eux, toujours augmenter. En conséquence, le niveau à la station n'est pas

représentatif des débordements et la relation univoque, souhaitable pour la prévision des inondations, entre une hauteur à la station et l'emprise inondée est souvent illusoire.

2 - Pistes de solution

Pour connaître les emprises inondées, d'autres paramètres que la hauteur d'eau à la station de prévision considérée doivent être pris en compte. Citons par exemple :

- le rattachement à la hauteur d'eau observée ou prévue à une station plus amont où la hauteur d'eau représente de manière plus fiable les débits roulés, et sous réserve d'apports intermédiaires minimales ;
- en complément du point précédent, le volume de la crue calculé de manière fiable à une station amont ;
- le calcul du rapport Q_i/Q_j (débit maximum instantané / débit moyen journalier) soit à la station considérée, soit à une station amont ;
- la durée de Socose (non calculables avant la fin de la crue) ;
- l'objectif est de dégager quelques typologies de crue dont les deux extrêmes sont :
 - la crue courte avec un hydrogramme très triangulaire ;
 - la crue plus lente avec un hydrogramme plus « rond » ;
 - éventuellement, une situation intermédiaire.

Pour chaque typologie, on réalisera un jeu de scénario d'inondation.

Pour la même hauteur d'eau à la station, la distinction des ZIP entre les différentes typologies de crue dans l'état actuel de VIGInond pourra se faire en jouant sur les millimètres (3,001 m pour la typologie 1 ; 3,002 m pour la typologie 2) en attendant les évolutions du format de données VIGInond.

Les cours d'eau endigués

Les digues fluviales (et maritimes) sont soumises à une réglementation spécifique qui impose un recensement des systèmes complets d'endiguement et d'une étude de dangers à réaliser à des échéances variables suivant la catégorie des digues (A, B ou C) et qui ont évolué dans le temps.

La première et principale préconisation que nous faisons est de se rapprocher des services en charge du contrôle de ces ouvrages hydrauliques (SCOH), qui sont maintenant rassemblés dans les DREAL. En effet, au-delà de la collaboration nécessaire entre services, il est indispensable d'avoir à disposition toutes les informations utiles qui ne peuvent qu'être reprises des études de danger.

1 - Les études de dangers

La réglementation existante¹⁷ en matière de sécurité des ouvrages hydrauliques et systèmes

17 [Décret n°2007-1735 du 11 décembre 2007](#) relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques ; [Arrêté du 12 juin 2008](#) définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu ; [Circulaire du 16 avril 2010](#) relative aux études de dangers des digues de protection contre les inondations fluviales

d'endigagements impose aux gestionnaires d'une digue la réalisation d'une étude de dangers.

Dans la circulaire du 16 avril 2010 auquel est annexé un guide de lecture des études de dangers des digues de protection contre les inondations fluviales, on peut noter les éléments suivants :

- l'établissement des études de danger [...] pour les digues de classes A, B et C. (NB : le classement des digues est détaillé dans le [décret n°2007-1735 du 11/12/2007](#));
- l'étude [de danger] a pour but d'apprécier les points forts de l'ouvrage, ses faiblesses, les scénarios possibles d'accidents ainsi que les conséquences de ces derniers, et les moyens de les prévenir. Elle permet également de mieux connaître la zone protégée et les crues pour lesquelles la digue apporte une protection et a contrario celles à partir desquelles le risque devient important pour les personnes et les biens
- l'étude de danger apporte des informations essentielles sur la sûreté de l'ouvrage et la sécurité des populations de la zone protégée. Elle permet d'avoir une bonne connaissance de l'ouvrage et de son fonctionnement : dimensionnement, aléas naturels, sensibilité aux différents modes de défaillance et de rupture, mesures de réduction des risques, enjeux protégés et enfin, niveau de risque résiduel une fois mises en œuvre les mesures précitées
- il convient que la crue (cote, débit, période de retour) au-delà de laquelle la digue n'apporte plus de protection, voire, est une source de dangers (risque de rupture ou de surverse), soit clairement identifiée.

Ces études de dangers dont la réalisation est cadrée d'un point de vue réglementaire sont à mêmes d'apporter des éléments sur les secteurs pouvant être inondés en cas de rupture de digue.

2 - La production des données de zones inondées derrière un système d'endigement

Au regard de la réglementation existante, la production de zones inondées derrière un système d'endigement incombe au gestionnaire de l'ouvrage.

Dans le cas où une étude de dangers existe, celle -ci est, dans la mesure du possible, ré-exploitée par le SPC (cf. chapitre suivant) en lien avec le service en charge du contrôle des ouvrages hydrauliques de la DREAL. Ce travail commun doit permettre la définition du scénario d'inondation à partir duquel il est nécessaire d'afficher la zone impactée.

En l'absence d'une étude de dangers présentant des éléments cartographiques d'aléas, la production de cette information ne peut pas être réalisée par le SPC au risque qu'il se substitue au gestionnaire de l'ouvrage.

Néanmoins si une autre étude relative aux zones potentiellement inondées en cas de défaillance du système d'endigement (PPRi, étude réalisée par le gestionnaire de l'ouvrage, etc.) est disponible, celle -ci est, dans la mesure du possible, ré-exploitée par le SPC (cf. chapitre suivant) en lien avec le service en charge du contrôle des ouvrages hydrauliques de la DREAL.

La nouvelle réglementation¹⁸ concernant les études de dangers doit imposer le rattachement de chaque scénario de défaillance à une station hydrométrique ou un marégraphe. Le SPC est identifié pour apporter un avis technique sur ce point.

18 Arrêté en cours d'approbation fin 2016 et relatif au plan de l'étude de dangers des digues organisées en systèmes d'endigement et autres ouvrages conçus ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions.

3 - L'exploitation d'une étude de dangers pour VIGInond

Dans le cas où une étude de dangers existe, certains éléments sont indispensables pour la représentation cartographique :

- l'emprise de la zone protégée par le système d'endiguement ;
- les niveaux de sûreté (arrêté 2008) et de protection (arrêté 2016) par rapport à une hydrologie de crue (débit, période de retour) ;
- les scénarios de zones inondées en cas de défaillance de l'ouvrage (appelés scénarios EDD dans la suite de ce chapitre).

Un échange entre le service en charge du contrôle des ouvrages hydrauliques de la DREAL et le SPC est nécessaire pour définir les données à afficher dans VIGInond et selon les préconisations suivantes :

- À partir du premier scénario de ZIP et en dessous du premier niveau de protection de l'ouvrage, la zone protégée est représentée.
- Si le niveau de protection est dépassé et s'il est inférieur au scénario Q100, on étudiera :
 - l'intérêt de ré-exploiter les scénarios de zones inondées produits dans l'étude de dangers :
 - si certains scénarios EDD peuvent être corrélés aux scénarios de ZIP produits pour VIGInond, ils sont réutilisés.
 - si aucun scénario EDD ne correspond aux scénarios de ZIP produits pour VIGInond, l'intérêt d'afficher systématiquement la zone protégée est étudié.
 - l'intérêt de produire une ou plusieurs ZIP pour les scénarios de l'EDD compris entre le niveau de protection et le niveau centennal, voire ce dernier s'il est inférieur à la crue historique. Dans le cas de système d'endiguement complexe, les différents niveaux de protection conditionnent les éventuels scénarios de ZIP à produire en plus.

Ces premières préconisations doivent faire l'objet de travaux d'approfondissement en 2017 et 2018 entre le réseau de la prévision des crues et les acteurs chargés de la sécurité des ouvrages hydrauliques.

À ce jour, VIGInond ne permet pas de distinguer ou typer l'emprise inondée de la zone non protégée de celle de la zone protégée quand elle ne l'est plus (déversement ou rupture), ce qui permettrait de voir explicitement les zones derrière les digues : ces zones peuvent être l'objet de phénomènes violents – fortes vitesses d'écoulement, remplissage rapide d'un casier avec des hauteurs d'eau importantes – distincts d'une inondation « classique » ou progressive.

De même, pour un scénario entre le niveau de sûreté et le niveau de protection (cas des digues anciennes), il nous semble intéressant de connaître les secteurs impactés si la digue rompt avant de déverser ou surverser.

Une évolution de VIGInond devra donc être envisagée pour intégrer les conclusions des travaux d'approfondissement qui doivent être menés.

Et en dehors du réseau surveillé ?

Comme nous l'avons présenté en introduction, VIGInond assure le stockage des emprises inondées rattachées à des hauteurs d'eau à des stations hydrométriques ou marégraphiques. Dans l'absolu, rien n'empêche donc de réaliser des ZIP en dehors du réseau de cours d'eau surveillé par l'État. Il est acquis que l'on y viendra même si ce n'est pas la priorité à ce jour.

Les zones littorales

Bien qu'au départ conçue pour la prévision des inondations, VIGInond peut parfaitement intégrer des données de submersion sur le littoral, en dehors des zones estuariennes. Et donc participer à la prévision des submersions marines.

La ZIP associée à une submersion devra être rattachée à un marégraphe dont les données sont disponibles pour les principaux estuaires de l'Atlantique et de la Manche sur Vigicrues et repris sur le site du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine. Le SHOM diffuse également à ces marégraphes les signaux de marée théorique (conditions météorologiques neutres) et celui prévu en intégrant les éventuelles valeurs de surcote. En s'appuyant sur les hauteurs marégraphiques prévues, on pourra, comme sur les cours d'eau surveillés par Vigicrues, encadrer la prévision de hauteur à la pleine mer par deux emprises de submersion.

Les linéaires de cours d'eau non surveillés

Rappelons ici la définition du réseau surveillé : il s'agit des linéaires de tronçons de cours d'eau sur lesquels une couleur de vigilance est attribuée. Ce réseau surveillé fait environ 22 000 km, découpés en 287 tronçons de 232 fleuves et rivières.

L'objectif reste la prévision de zones inondées et non l'observation de zones inondées. Dans l'attente de l'ouverture officielle du service d'avertissement automatique sur les crues soudaines Vigicrues Flash (prévu à compter de 2017), le réseau non surveillé ne fait l'objet d'aucune prévision à quelques rares exceptions près.

Une fois le service Vigicrues Flash ouvert, les tronçons de cours d'eau couverts par ce service feront l'objet d'alertes concernant le dépassement de deux niveaux de crue ("crue forte" et "crue très forte"). On pourra envisager de produire pour ces deux occurrences de crue une emprise inondée au moins sur les secteurs aux enjeux les plus forts.



**Ministère de l'Environnement,
de l'Énergie et de la Mer**

Secrétariat général
Tour Pascal A
92055 La Défense cedex
Tél. 01 40 81 21 22

