



Appui aux politiques publiques



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE



30 ans de recherche
pour la prévention des inondations

Dans ce dossier

préparé par Roxane Jupin et Didier Richard (DAPP),
Michel Lang (RIVERLY) et Charles Perrin (HYCAR).

PAGE 4

Le cadre général de la politique publique française de prévention des risques naturels hydrauliques

PAGE 6

Connaître et modéliser le risque dans les bassins versants

PAGE 10

Prendre en compte les enjeux des territoires pour les protéger des inondations

Remerciements

Nous remercions toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce dossier.

Vazken Andreassian, Lionel Berthet, Catherine Fouchier, Frédéric Grelot, Bruno Janet, Pierre Javelle, Michel Lang, Jérôme Le Coz, Charles Perrin, Guillaume Piton, et Maria-Helena Ramos.

Collection Appui aux Politiques publiques
Dir. de publication : Nicolas de Menthière
Dir. de collection : Gisèle Parfait
Conception et rédaction :
Roxane Jupin et Didier Richard
Maquette et mise en page : Roxane Jupin
Impression : Biprint

Photo de couverture : ©AdobeStock, Ekaterina Pokrovsky
Photo 2e de couverture : ©AdobeStock



©AdobeStock

Octobre 2022

La politique de prévention des inondations s'appuie sur la connaissance des phénomènes, de l'aléa et du risque mise au service de l'action.

30 ans de recherche pour la prévention des inondations

Le risque d'inondation est le premier risque naturel en France en termes d'impacts et d'étendue. Il concerne un français sur quatre, soit plus de 17 millions de personnes. Expertes des risques liés à l'eau, six équipes scientifiques d'INRAE contribuent à la mise en oeuvre de la politique de prévention des inondations. Elles travaillent sur des outils et méthodes de prévision comme de prévention de ce risque.

Le bilan catastrophique des inondations en Europe au cours des dernières décennies, notamment des grandes crues de l'été 2002, du printemps 2013 ou encore de l'été 2021, place le risque inondation au premier rang des catastrophes naturelles. L'exposition à ces inondations met en péril la sécurité des populations, la protection des terres agricoles et des milieux naturels et plus largement l'économie des territoires. Sur les 30 dernières années, le coût moyen annuel des dommages est de l'ordre de 650 à 800 millions d'euros.

La politique publique française de prévention des inondations s'appuie sur des décennies d'expérience et d'améliorations successives. Une force de cette politique publique est de pouvoir s'appuyer sur une volonté politique stable de longue date, dont a également bénéficié la

collaboration entre INRAE et les pouvoirs publics. Depuis plus de 30 ans, les scientifiques d'INRAE ont ainsi accompagné le développement et l'amélioration des instruments actuels de prévision et de prévention des inondations. Ils mènent des recherches sur les risques liés au débordement de cours d'eau fluviaux et torrentiels et au ruissellement. Ces recherches concernent aussi bien l'anticipation des crues et la prévision de l'aléa que la prévention du risque et la protection contre les inondations.

Ces activités sont aujourd'hui portées essentiellement par le département AQUA et six unités de recherche réparties sur le territoire français. Elles constituent le socle d'une collaboration avec la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires.

LA POLITIQUE DE PRÉVENTION DES RISQUES NATURELS EN 7 PRINCIPES

1. Connaître les phénomènes, l'aléa et le risque
2. Surveiller, prévoir et alerter
3. Faire de l'information préventive et éduquer la population
4. Prendre en compte les risques dans l'aménagement et l'urbanisme
5. Réduire la vulnérabilité
6. Préparer et gérer les crises
7. Gérer l'après-crise et faire des retours d'expérience

L'APPUI D'INRAE À LA POLITIQUE DE PRÉVENTION DES INONDATIONS

Projets de recherche

- Pour diffuser des cartes d'anticipation et de suivi des aléas
- Pour choisir les bons outils de prévision des pluies et crues extrêmes
- Pour créer une base de données des inondations remarquables
- Pour développer des systèmes d'anticipation des crues soudaines
- Pour améliorer la prévision grâce à l'intelligence artificielle

Outils, modèles et méthodes

- Pour transformer les pluies en débits
- Pour transformer les hauteurs d'eau en débits
- Pour évaluer les incertitudes des prévisions
- Pour une approche économique du risque

Appui scientifique et technique

➤ Le cadre général de la politique publique française de prévention des risques naturels hydrauliques

LES PRINCIPES DE LA PRÉVENTION CONTRE LES RISQUES NATURELS

Une stratégie efficace de prévention des inondations pourrait se résumer par cette formule : « Ne pas se trouver au mauvais endroit au mauvais moment ». Cela suppose de localiser les endroits permettant de se trouver en sécurité aux moments critiques. Ces deux grandes dimensions de la prévention se retrouvent dans les [sept principes](#) qui soutiennent la politique nationale de prévention des risques naturels :

- La connaissance des phénomènes, des aléas et des risques,
- La surveillance, la prévision et l'alerte,
- L'information préventive et l'éducation des populations,
- La prise en compte du risque dans l'aménagement et l'urbanisme,
- Les travaux de réduction de la vulnérabilité,
- La préparation à la gestion de crise,
- La gestion de l'après-crise et le retour d'expérience.

En 2014, sous l'impulsion européenne, la France renforce sa politique de gestion des risques d'inondation avec la stratégie nationale de gestion des risques

d'inondation (SNGRI). Celle-ci comporte trois objectifs prioritaires : 1) Augmenter la sécurité des populations exposées, 2) Stabiliser à court terme, et réduire à moyen terme, le coût des dommages liés aux inondations, 3) Raccourcir le délai de retour à la normale des territoires sinistrés. Cette stratégie nationale est mise en œuvre au travers des programmes d'actions de prévention des inondations (PAPI), lancés en 2003 et portés par les collectivités territoriales.

LE RISQUE DANS L'AMÉNAGEMENT ET L'URBANISME : LE PLAN DE PRÉVENTION DES RISQUES NATURELS

La maîtrise de l'urbanisation est un levier important de la prévention des inondations. Pour les installations fixes et les constructions, il s'agit en effet de choisir le bon emplacement pour limiter les dégâts en cas d'inondation. Ainsi, la bonne stratégie consistera à ne pas construire « aux mauvais endroits ». C'est tout l'enjeu de la réglementation de l'occupation de l'espace.

Pour éviter l'aggravation des risques dans le futur, la stratégie nationale repose ainsi sur la prise en compte des risques d'inondation

dans l'aménagement des territoires exposés avec les plans de prévention des risques d'inondation (PPRI). Ceux-ci sont prescrits et approuvés par l'État et élaborés en concertation avec les communes et les populations. Le PPRI cartographie les zones exposées aux risques d'inondation et y réglemente l'usage du sol, la façon de construire, l'usage et la gestion des zones à risques, selon le niveau de risque.

L'élaboration de ces plans de prévention et du zonage réglementaire du risque qu'ils proposent requiert de disposer de connaissances suffisantes sur l'emprise des inondations. Cette connaissance se construit d'une part à partir des inondations historiques connues, d'autre part en utilisant des outils de modélisation mis à disposition des pouvoirs publics par les chercheurs, qui les développent et les améliorent continuellement.

SURVEILLANCE, PRÉVISION ET ALERTE : LA SCIENCE AU CŒUR DE LA RÉORGANISATION DE LA PRÉVISION DES CRUES

De dramatiques inondations à la fin du XX^e siècle ont conduit à la refonte du dispositif de surveillance et d'annonce des crues qui, mis en place en 1854, laissait trop peu de temps pour agir et protéger les populations. Le nouveau modèle repose sur une étroite collaboration entre science et acteurs publics représentés par le Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations (Schapi).

C'est en 2002, suite au [rapport](#) de l'Assemblée nationale sur la lutte contre les inondations, que le ministère chargé de l'écologie lance une réforme pour transformer le système d'annonce des crues en système de prévision des crues. Celui-ci doit permettre d'anticiper à court terme l'arrivée des crues et de prévoir l'aléa correspondant, avec des délais et une précision suffisants pour activer efficacement les chaînes d'alerte et de secours. Aujourd'hui, le système est porté par 17 services de prévision des crues (SPC), issus de cette réorganisation.

En 2003, le Schapi, avec lequel INRAE nouera un partenariat étroit, est créé et rattaché au ministère chargé de l'écologie. Sa mission est de piloter la vigilance aux crues à l'échelle nationale et d'accompagner les SPC en matière d'animation, de conseil et de formation. Il assure également la coordination scientifique et technique du domaine de la

Un cadre européen pour la gestion des risques hydrauliques

Depuis 2007, la politique de gestion des risques d'inondation est encadrée par la directive européenne 2007/60/CE, dite « directive inondation », qui vise à limiter les impacts des inondations sur la santé humaine, l'activité économique, l'environnement et le patrimoine culturel. Cette directive est transposée en droit français dans la loi portant engagement national pour l'environnement, dite « loi LEne », en 2010, et dans le décret du 2 mars 2011 relatif à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation (décret N°2011-227).

L'expertise d'INRAE en hydrométrie à l'international

Plusieurs experts en hydrométrie sont présents au sein d'organisations internationales : Organisation météorologique mondiale depuis 2008, groupes de travail internationaux, stages internationaux d'hydrométrie animés depuis 2013 par INRAE.

Entre 2010 et 2020, sept expertises-projets à l'international d'un à trois ans ont également été menées à travers le monde sur l'ensemble des sept piliers de la prévention des inondations : cartographie de régimes hydrauliques, conception d'un barrage contre les laves torrentielles, recommandations pour la conception, la gestion et le suivi de constructions zones humides, ou encore évaluation des risques liés à de fortes pluies en contexte d'état d'urgence. Plusieurs de ces expertises ont mobilisé des modèles et méthodes développés par INRAE.

Une collaboration INRAE-DGPR pour l'appui à la connaissance, l'évaluation et la gestion des risques d'inondation

INRAE et la DGPR entretiennent un partenariat depuis les années 1990 dans le domaine de la connaissance et de la prévention des risques naturels et hydrauliques. La dernière convention signée avec la DGPR en mai 2022, en application de la convention-cadre avec le ministère chargé de l'écologie, prévoit un programme d'étude et de recherche mené avec son service des risques naturels et hydrauliques (SRNH) dans 5 domaines d'action :

risques, 2) Prévision des inondations, 3) Sécurité des ouvrages hydrauliques, 4) Prévention des inondations, 5) Risques naturels terrestres.

Pour l'année 2022, ce sont 77 actions de recherche et expertise qui sont engagées avec la DGPR. Elles mobilisent :

- 3 départements de recherche : AQUA, ECODIV et ACT
- 6 unités : ETNA, G-EAU, HYCAR, LESSEM, RECOVER et RIVERLY
- Une trentaine d'ETP, dont 10 ETP impliquant 50 à 60 ingénieurs et chercheurs permanents



Bruno Janet
Conseiller scientifique et technique du Schapi, DGPR, ministère chargé de l'écologie

Le Schapi pilote le réseau VIGICRUES et coordonne la prévision des crues à l'échelle nationale avec notamment la gestion du site VIGICRUES. Pour en améliorer l'efficacité, et préparer l'avenir, le Schapi collabore avec les organismes scientifiques. Dans ce cadre, je gère la convention DGPR-INRAE sur 3 volets : amélioration des outils de prévision et du calcul des incertitudes, amélioration des techniques d'estimation des débits, et compréhension des crues éclair sur les bassins versants non jaugés. Je suis aussi les besoins ponctuels comme l'adaptation d'outils pour l'outre-mer, les expertises, ou le suivi de projets de recherche comme le projet PICS sur l'anticipation des crues soudaines. Les scientifiques nous apportent des réflexions que nous confrontons à des questions opérationnelles dans une démarche de co-construction du partenariat. Nous avons ainsi fiabilisé la prévision grâce aux modèles hydrologiques et développé un service d'avertissement sur les crues éclair, VIGICRUES Flash. En 2023, un colloque organisé avec la Société hydrotechnique de France dressera le bilan de 20 ans de prévision des crues appuyés par la science. Mais de nombreux défis restent à relever pour améliorer les prévisions : utiliser des prévisions météorologiques d'ensemble, mobiliser l'intelligence artificielle, ouvrir la vigilance sur l'ensemble du territoire, ou encore mieux communiquer sur les incertitudes.

prévision des crues en lien avec les organismes scientifiques et techniques de l'État. Depuis 2006, le Schapi, service de la DGPR, les SPC, les unités d'hydrométrie et les cellules de veille hydrologique en outre-mer sont chargés de la vigilance crues en continu sur le réseau réglementaire des cours d'eau surveillés par l'État, soit 23 100 kilomètres en métropole via le réseau VIGICRUES Flash. Ils contribuent également au déploiement de la surveillance en dehors du réseau réglementaire. Ces actions sont menées sous la coordination du Schapi qui assure en parallèle la production de la carte nationale de vigilance crues disponible sur l'application [VIGICRUES](#).

UN PARTENARIAT INRAE-DGPR POUR LA CONNAISSANCE ET LA GESTION DU RISQUE D'INONDATIONS

La réforme de 2002 sur la prévision des crues est l'occasion de renforcer et formaliser la collaboration entre INRAE et la direction générale de la prévention des risques (DGPR). Cette dernière souhaite renforcer les compétences hydrologiques des services de prévision des crues et les doter d'outils de prévision adaptés aux besoins. Plusieurs organismes scientifiques, INRAE, Météo-France, le BRGM, les universités de

Toulouse, Montpellier et Grenoble, et Thalès, vont conjuguer leurs efforts pendant cinq ans pour évaluer la qualité de différents modèles de prédiction. Cette initiative permet de créer une communauté scientifique autour du sujet de la prévision des crues. Aujourd'hui, les équipes d'INRAE sont reconnues pour leurs compétences en modélisation et en hydrométrie. Leurs actions d'appui à la DGPR sont intégrées à des programmes annuels d'actions plus larges, sur « la connaissance et la prévention des risques naturels et hydrauliques » qui œuvrent notamment à une meilleure connaissance et une meilleure gestion des risques d'inondation.

Ce partenariat a d'ailleurs été confirmé en 2020 par le renouvellement de la convention-cadre entre le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires et INRAE. Celle-ci comporte un volet sur la connaissance, l'évaluation et la gestion des risques, incluant les risques d'inondation et la sécurité des ouvrages hydrauliques, et un volet relatif aux territoires et aux villes ciblant entre autres la compétence de « gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations » (GEMAPI) confiée aux intercommunalités.

Sous l'impulsion de la directive inondation, la France a mobilisé d'importants moyens pour appuyer sa stratégie de prévention des inondations.



©AdobeStock

Une démarche collaborative au cœur du développement du modèle GRP

Le modèle GRP a été développé dans le cadre de la recherche, mais a rapidement fait l'objet de transferts au travers d'outils opérationnels adaptés aux opérateurs de terrain. L'évolution de ces outils, que ce soit sur le fond avec des recherches associées, ou sur la forme en termes de fonctionnalités ou d'ergonomie, a toujours impliqué les utilisateurs finaux. Plusieurs partenaires ont été sollicités, notamment Météo-France et le réseau VIGICRUES, ainsi que les utilisateurs des outils, qu'ils soient dans le réseau national de la prévision, opérateurs privés ou bureaux d'études. Leurs retours d'expérience ont largement contribué à faire évoluer les outils et les méthodes associées. Ce fonctionnement collaboratif s'appuie sur un groupe de travail qui se réunit annuellement. Il permet de faire ressortir des questions souvent complexes appelant parfois des recherches spécifiques. Une version spatialisée d'un des modèles impliqués dans GRP, ainsi que des méthodes de quantification des incertitudes ont par exemple émané de ce groupe.

Estimer les incertitudes, une information indispensable pour la gestion des risques

La prévision des crues comporte de nombreuses sources d'incertitude : pluie, météo, débit, calage des paramètres... Des méthodes ont donc été développées pour quantifier ces incertitudes et aider à la prise de décision.

INRAE s'est notamment investi dans l'animation du groupe international **HEPEX** pour développer des méthodes probabilistes de prévision, en particulier avec l'émergence des approches d'ensembles permettant de rendre compte des incertitudes associées à la prévision.

Par ailleurs, à la demande du Schapi, le logiciel **OTAMIN** a été conçu par INRAE pour associer automatiquement et systématiquement des intervalles prédictifs aux prévisions hydrologiques et hydrauliques obtenues avec différents modèles. Le logiciel permet ainsi d'associer un intervalle de confiance aux prévisions, utile à la prise de décision. Cet outil est particulièrement intéressant dans les petits bassins versants sur lesquels plus l'anticipation sera grande, plus l'incertitude de la prévision le sera également.

Connaître et modéliser le risque dans les bassins versants

SIMULER LE DÉBIT DES COURS D'EAU : UN ENJEU INVESTI TRÈS TÔT PAR LES HYDROLOGUES D'INRAE

Une crue correspond à l'augmentation du débit d'un cours d'eau dépassant plusieurs fois son débit moyen. Pouvoir estimer le débit des cours d'eau est donc indispensable à la mission de prévision et de prévention des crues portée par les services de l'Etat. Dès les années 1980, les scientifiques d'INRAE développent des modèles

complémentaires de calcul des débits. Trois modèles sont basés sur la pluviométrie : GRP, GRD et AIGA. Des travaux sont également menés pour mieux rendre compte de la relation hauteur-débit dans les cours d'eau et des incertitudes associées, avec par exemple le modèle BaRatin. Chaque année, INRAE assure des formations à l'Institut de formation de l'environnement (IFORE) du ministère autour des concepts mis en œuvre dans la construction de ces modèles : hydrologie statistique, incertitudes, jaugeages...

PRÉVOIR LES DÉBITS DANS LES BASSINS VERSANT JAUGÉS GRÂCE À DES MODÈLES SIMPLES ET ROBUSTES

Dans les années 1980, les hydrologues de l'unité HYCAR développent le modèle hydrologique global dit « GR », pour « génie rural », et une famille de modèles fonctionnant à différents pas de temps.

Ces modèles permettent de transformer la pluviométrie sur les bassins versants en débit dans les cours d'eau. Ils sont construits sur la base d'importants jeux de données et d'une connaissance fine du comportement hydrologique des bassins versants équipés de stations de jaugeage.

Dès 2003, les scientifiques s'associent au service de prévision des crues Seine moyenne-Yonne-Loing pour développer une déclinaison du modèle GR, le modèle de prévision en temps réel **GRP**, pour « Génie-Rural-Prévision ». Conçu pour fonctionner simplement, il ne dépend que de trois paramètres à optimiser et utilise les données de pluie, d'évapotranspiration potentielle, de température et de débit.

La simplicité des paramètres et des réglages lui confère une bonne robustesse et en fait l'un des modèles de référence pour la prévision des débits. À la suite d'une importante politique de formation assurée par INRAE et de la dynamique de diffusion opérée par le Schapi, il est maintenant utilisé dans la plupart des services de prévision des crues, et tourne en temps réel sur plusieurs centaines de points de prévision. Le modèle GRP a par la suite été adapté au contexte des crues en montagne avec l'ajout du module CemaNeige. Il permet de simuler l'évolution du couvert neigeux sur un bassin versant et d'en estimer la fonte. Il améliore ainsi la modélisation des débits liquides à l'exutoire des bassins versants influencés par la neige.



Maria-Hélène Ramos

Directrice de recherche en Hydrologie, unité HYCAR, INRAE

Mon travail porte un intérêt particulier à la prévision des débits des rivières et l'alerte aux crues. Ingénieure au Brésil, j'ai obtenu un doctorat à Grenoble et effectué un post-doctorat en Italie, au Centre commun de recherche de la Commission Européenne, où j'ai travaillé avec le système européen d'alerte pour les inondations. Ces compétences m'ont amenée à conduire deux expertises majeures sur la prévision des crues, l'une au Pérou suite aux inondations de 2017 *via* la Commission européenne et les Nations Unies, et l'autre initiée en 2021 avec l'Organisation météorologique mondiale sur la prévision de crues rapides en Afrique de l'Ouest. Ces expertises m'ont permis d'appréhender les enjeux locaux et proposer des solutions concrètes suite aux échanges avec les acteurs concernés. Mes recherches sont aussi enrichies par des nouvelles pistes de réflexion. Aujourd'hui, je me plais à former de jeunes scientifiques et à animer la communauté des hydrologues, notamment *via* le réseau international HEPEX autour de la prévision d'ensemble, et l'Union européenne des géosciences, qui rassemble environ 18 000 membres du monde entier.





Trois questions à

Lionel Berthet

Sous-directeur de la connaissance des aléas et de la prévention,
Service des risques naturels et hydrauliques,
Direction générale de la prévention des risques,
Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires



Quelles sont les relations entre la prévention des risques à la DGPR et les scientifiques ?

Au sein de la DGPR, la sous-direction de la connaissance des aléas et de la prévention est chargée des risques inondation et littoraux, des risques naturels terrestres (comme les mouvements de terrain, les avalanches et les séismes) et de la sécurité des ouvrages hydrauliques. Elle mobilise une trentaine de personnes. Depuis mes débuts professionnels, j'ai pu constater que la collaboration avec les scientifiques d'INRAE était déjà bien installée. Pour nous, en administration centrale ou services déconcentrés, INRAE, c'est un vivier de scientifiques qui mènent une recherche exigeante et opérationnelle : nous savons pouvoir compter sur eux pour appréhender et réagir face à des phénomènes complexes et assez rares comme dans le cas récent de la tempête Alex, caractériser l'aléa, ou encore construire une grille d'analyse socio-économique pour la reconstruction. La convention qui organise la coopération INRAE / DGPR fait une place importante au soutien d'activité de recherches, notamment pour mieux comprendre les différents aléas naturels. Une connaissance indispensable pour élaborer les différents outils de la prévention et de la protection des populations.

Peut-on dire que les risques d'inondation se sont aggravés ?

Face à un événement rare et intense, nous avons tendance à le ressentir comme « le plus » catastrophique jamais subi. En réalité, il faut aborder la question des risques dans une perspective historique : les dernières inondations dommageables sur la Loire et la Seine en 2016 et 2018 sont sans commune mesure avec le débordement dévastateur de la Seine à Paris en 1910. Ce serait de même un raccourci de dire que de plus en plus

de citoyens sont exposés aux inondations. Une étude de la Caisse centrale de réassurance montre qu'en réalité, les outils de la prévention ont permis de contenir les coûts et dommages. Nous disposons d'ailleurs de modèles de plus en plus fiables, notamment grâce aux travaux d'INRAE, pour prévoir et simuler, étape essentielle pour anticiper l'action, et prévenir et limiter les dommages, en priorité humains.

Quelles sont les questions scientifiques d'aujourd'hui et de demain ?

Il reste encore de nombreuses questions qui nécessitent des avancées scientifiques. D'abord, la caractérisation de l'aléa reste perfectible pour plusieurs phénomènes naturels. C'est d'autant plus le cas quand ils nécessitent une description à une petite échelle spatio-temporelle. Par exemple, si la caractérisation des inondations des grands cours d'eau est globalement satisfaisante, des progrès sont nécessaires pour décrire et anticiper les risques associés aux crues rapides et plus encore au ruissellement.

Pour l'avenir, la connaissance des effets du changement climatique sur les aléas est très diverse : s'il y a un assez bon consensus scientifique quant à l'élévation du niveau moyen de la mer, il reste difficile d'estimer les effets sur les pluies intenses, en particulier dans le Sud de la France, et encore plus sur les inondations qui en résulteront du fait de la multiplicité des facteurs à prendre en compte, notamment l'humidité du sol. Au-delà des inondations, les risques liés aux feux de forêt et aux sécheresses doivent être éclairés scientifiquement et INRAE nous accompagne sur ces volets. L'appui des scientifiques est plus que jamais primordial. Le dialogue avec cette communauté, qui a débuté il y a plus de 20 ans et qui fonctionne très bien, doit donc se poursuivre.

Focus sur trois grands projets pour mieux connaître les crues exceptionnelles

Les crues extrêmes, comme celles qui n'ont par exemple qu'une chance sur 1000 de se produire par an, peuvent être dévastatrices. La directive inondation impose d'évaluer les caractéristiques majeures des inondations causées par ce type de crues. Dans ce cadre, INRAE s'est investi dans deux grands projets financés par l'ANR :

- Le projet [Extraflo](#) (2009-2013) avait pour objectif de comparer une dizaine de méthodes de prédétermination des pluies et crues extrêmes utilisées en France. Les comparaisons ont été traduites en recommandations auprès des services chargés de l'instruction des plans de prévention des risques. Dans le rapport final, les modèles SHYREG-Pluie et SHYREG-Débit, développés par INRAE pour la connaissance régionale de l'aléa pluvial et hydrologique, ont notamment été recommandés pour leur robustesse.
- Le projet [PICS](#) (2018-2022) a permis, grâce à des combinaisons de modèles, de développer des systèmes offrant jusqu'à 6 h d'anticipation sur les crues soudaines et représentant leurs impacts sur les territoires.

Une [synthèse](#) des inondations remarquables recensées en France métropolitaine et dans les outre-mer entre 1770 et 2011 a par ailleurs été établie par INRAE et un historien indépendant. Elle rassemble des informations sur la genèse hydro-météorologique et les impacts d'environ 175 inondations. En 2011, ce recensement, qui a demandé près de 10 ans de travail, a été transposé dans une base de données.

Grâce à cette meilleure connaissance des crues extrêmes, les modèles de prévision peuvent être adaptés à ce type d'événements.



La modélisation hydrologique est incontournable pour anticiper le risque d'inondation.



PRÉVOIR LES DÉBITS DANS LES PETITS BASSINS VERSANTS : UNE PROBLÉMATIQUE PARTICULIÈRE

Au début des années 2000, les hydrologues de l'unité RECOVER à Aix-en-Provence s'associent à la direction inter-régionale Sud-Est de Météo-France pour développer la méthode AIGA. Alimentée en temps réel par des données de pluie obtenues par radar, la méthode permet de prévoir au pas de temps horaire les débits dans les petits bassins versants méditerranéens. Ces bassins se caractérisent en effet par des temps de réaction courts et sont souvent touchés par les phénomènes de crues éclair. Ces crues éclair s'avèrent particulièrement meurtrières et dévastatrices avec plusieurs centaines de millions d'euros de dégâts par événement.

En 2010, les fortes crues de Draguignan ont souligné la nécessité de fournir aux communes un outil d'avertissement sur les petits bassins versants qui ne font pas partie du système de surveillance national. Une difficulté pour la recherche, car il faut maintenant pouvoir anticiper les crues en quelques heures, sur tout le territoire national, en tirant le meilleur parti des données de pluies radar produites par Météo-France.

C'est la méthode AIGA qui l'a permis après plusieurs années de recherches et développements, d'abord grâce la plateforme RHYTME qui diffuse des cartes d'anticipation et de suivi des aléas hydrométéorologiques aux 170 structures abonnées en région PACA, puis au niveau national via le service VIGICRUES Flash.



Catherine Fouchier
Chercheuse en hydrologie, unité RECOVER, INRAE

Dans l'équipe, nous travaillons sur l'anticipation des crues éclair qui touchent particulièrement les petits cours d'eau non surveillés. Pendant ma thèse, j'ai travaillé sur la méthode AIGA qui modélise les débits sur ces cours d'eau et y estime la fréquence des crues modélisées. Moins un événement est fréquent, plus il est potentiellement dangereux. En 2017, le Schapi a souhaité un dispositif de prévision des crues éclair, VIGICRUES Flash, que nos acquis sur AIGA, déjà déployé en PACA, ont

permis de rendre rapidement opérationnel. Le sujet de l'anticipation des crues est complexe et évolue en permanence, tout comme notre modèle hydrologique qui s'insère maintenant dans notre plateforme SMASH. Elle combine des modèles hydrologiques et hydrauliques, permet de les enrichir et de les tester, puis de les paramétrer pour qu'ils reproduisent au mieux les comportements des cours d'eau. Une des prochaines étapes sera d'y intégrer des prévisions de pluie. Un déploiement de SMASH à la Réunion est également prévu avec des questions propres à la topographie et la climatologie locales. Tous ces développements sont soutenus par le Schapi.

MUFFINS (2022-2026) : pour le développement de systèmes de prévision innovants, intégrant notamment de l'intelligence artificielle

Dans la suite du projet PICS, INRAE est le pilote du projet MUFFINS (*MUltiscale Flood Forecasting with INnovating Solutions*). L'objectif est de développer les outils de demain, à la fois multi-échelles, et transdisciplinaires pour une prévision des crues jusqu'aux impacts. Le projet regroupe 9 partenaires français, acteurs opérationnels ou du domaine des assurances, ainsi que des chercheurs en hydrométéorologie, hydraulique, mathématiques appliquées. Le projet prévoit notamment l'ajout d'une prévision de pluie pour augmenter l'anticipation des débits, d'un modèle d'impact pour prévoir les dégâts ou encore de méthodes d'intelligence artificielle pour améliorer les performances précises des modèles.

La méthode AIGA est actuellement utilisée dans trois dispositifs opérationnels de surveillance et d'anticipation des aléas hydrométéorologiques à la résolution du km² et à un pas de temps de 15 minutes :

1. Le dispositif national APIC « Avertissement pluies intenses à l'échelle des communes » développé par Météo-France pour le ministère chargé de l'écologie. Il renseigne les 9 800 communes abonnées sur le caractère plus ou moins exceptionnel des précipitations observées en temps réel ;
2. Le service VIGICRUES Flash qui surveille 34 000 km de cours d'eau sur plus de 10 000 communes pour avertir automatiquement ses abonnés du risque de crues intenses et soudaines dans les prochaines heures ;
3. L'extranet Sécurité civile de Météo-France, qui propose aux services gestionnaires de crise en préfectures, une carte AIGA Pluie pour les pluies à 2h sur tout le territoire national et la carte AIGA Débit sur 15 départements du pourtour méditerranéen appartenant aux zones de défense sud et sud-est. L'objectif est à présent d'étendre le domaine d'application de l'outil en conservant une

méthode opérationnelle. Une nouvelle plateforme de modélisation est pour cela utilisée : SMASH. Celle-ci permet de mettre en œuvre différents types de modèles, à différentes échelles spatio-temporelles. Des modules propres à la neige, au ruissellement ou aux problématiques souterraines peuvent également être testés. Le projet MUFFINS financé par l'ANR (voir encadré) permettra par ailleurs d'explorer l'utilisation de l'intelligence artificielle dans la prévision des débits.

TRADUIRE LES HAUTEURS D'EAU EN DÉBITS : MESURES, INCERTITUDES ET MODÉLISATION

Les scientifiques ont beaucoup investi la question des techniques de mesure des débits et développé des logiciels comme Fudaa-LSPV, créé avec EDF, pour évaluer la vitesse de l'eau et le débit des cours d'eau à partir d'images vidéos. À ce logiciel se sont ajoutés des outils de calcul d'incertitudes (méthodes Oursin et Q+ implémentées dans les logiciels opérationnels QRevInt et Barème), des campagnes d'intercomparaison de matériels de jaugeage et des techniques de jaugeage alternatives.

Le modèle BaRatin, développé par l'unité de recherche RIVERLY à Lyon depuis 2010, permet d'estimer le débit des cours d'eau à partir de la hauteur d'eau mesurée par une station hydrométrique. L'approche statistique choisie pour BaRatin permet de combiner l'information hydraulique et les jaugeages incertains pour caler les paramètres de la relation hauteur-débit et ainsi quantifier l'incertitude des débits calculés. Pouvoir quantifier l'intervalle de confiance associé aux mesures de débit en temps réel contribue *in fine* à évaluer les incertitudes sur la prévision des crues. Le modèle BaRatin est utilisé par le réseau VIGICRUES à l'aide de son interface graphique BaRatinAGE, et un logiciel plus général, BaM!, propose un catalogue étendu de modèles de courbes de tarage, en plus de BaRatin. Ils sont également utilisés par la Compagnie nationale du Rhône pour la gestion opérationnelle des courbes de tarage. Toutes ces avancées sont exportées à l'international, notamment dans le réseau d'observatoires écologiques de long terme NEON aux États-Unis et ont été testées par l'Institut d'études géologiques des États-Unis (USGS).

Le débit est une donnée cruciale. Sa mesure nécessite des opérateurs qualifiés, des techniques variées et des procédures solides.



Jérôme Le Coz
Chercheur en
hydraulique, Unité
RIVERLY, INRAE

Je développe depuis 15 ans des méthodes innovantes de mesure des débits pour les services de prévention des crues du ministère chargé de l'écologie. Les mesures de débit sont la première brique de la prévision des inondations. Les modèles, les plans de prévention ou encore l'estimation des risques reposent dessus. Ces données, d'une valeur patrimoniale, sont conservées au sein de l'hydroportail. La France s'est dotée d'un réseau hydrométrique solide, avec environ 2400 stations de suivi du débit, certaines chroniques dépassant 100 ans d'observation. Les méthodes de mesure sont variées et en constante évolution, allant du moulinet à hélice au profileur hydro-acoustique et à l'analyse de vidéos prises au sol ou par drone. L'hydrométrie est un domaine de passionnés qui rassemble des ingénieurs du monde entier dans un réseau très dynamique. Au-delà de la mesure, il faut aussi quantifier l'incertitude liée aux conditions et à l'outil de mesure. Ce sont des défis sur lesquels la France est en avance, notamment grâce au soutien à long terme de nos partenaires.

➤ Prendre en compte les enjeux des territoires pour les protéger des inondations

Les actions menées pour gérer l'urbanisme et l'usage du sol en zone à risque relèvent de la prévention des inondations. Il s'agit de définir des zones non constructibles, ou constructibles sous condition du respect de certaines prescriptions, sur la base d'une cartographie des zones exposées au risque d'inondation. Pour l'établir, les ingénieurs croisent la cartographie des zones inondées pour différents aléas de référence, avec celle des enjeux et de leur

vulnérabilité. Ils s'appuient le plus souvent sur la modélisation hydraulique de crues, également utilisée pour dimensionner d'éventuels ouvrages de protection tels que des digues ou des barrages.

L'évaluation de l'efficacité des mesures de gestion du risque d'inondation, par la prévention ou la protection, comporte par ailleurs évidemment une dimension économique importante.

UNE MÉTHODE DE RÉFÉRENCE NATIONALE POUR L'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES PROJETS DE PRÉVENTION DES INONDATIONS

Chiffrer le coût des dommages d'une inondation participe de la prévention et de la gestion territoriale du risque. Depuis 2010, l'évaluation économique est inscrite dans les programmes d'actions de prévention des inondations (PAPI). Elle est obligatoire pour tout projet dépassant 2 millions d'euros et prend la forme d'une analyse coût-bénéfice. Il s'agit d'évaluer l'efficacité des mesures proposées en fonction de leur coût et des dommages monétaires évités grâce à ces mesures. Pour les projets de plus de 5 millions d'euros, elle prend la forme d'une analyse multicritère, en intégrant également des indicateurs non monétaires d'efficacité et de coût-efficacité. Ces méthodes contribuent à évaluer la réduction de la vulnérabilité du territoire résultant du projet. Elles permettent une aide à l'arbitrage entre les différentes options de gestion du territoire pour la prévention des inondations.

Les analyses coût-bénéfice et multicritère utilisées sont des méthodes nationales de référence recommandées par le ministère chargé de l'écologie. Elles ont été développées au sein du groupe de travail « Analyse multicritères inondation » lancé en 2008 dans la suite de l'état des lieux des [évaluations socio-économiques des instruments de prévention des inondations](#) (2007, ministère de l'Environnement). Le groupe réunit des experts scientifiques (INRAE G-eau, Cerema, DGPR), des assureurs, et une association de prévention et gestion du risque d'inondation (CEPRI) sous

le pilotage du Commissariat Général au Développement Durable.

Au sein de ce groupe de travail, les économistes de G-eau ont été particulièrement impliqués sur le développement des fonctions de dommages aux parcelles cultivées et aux activités économiques. Ces fonctions estiment les coûts attendus d'une inondation au regard des caractéristiques des enjeux (type de cultures, nature des activités) et de celles des inondations (intensité, période de l'année). Ils ont également développé une méthode scientifiquement rigoureuse et simple de mise en œuvre pour la prise en compte des incertitudes dans les analyses coûts-bénéfices.

Depuis 2011, l'UMR G-eau est également chargée de la formation continue autour des méthodes. Destinées prioritairement aux agents de l'État, les formations sont également ouvertes aux collectivités et bureaux d'études ; elles rassemblent chaque année une vingtaine de participants. Du fait de leur implication, les économistes de G-eau INRAE à Montpellier sont régulièrement sollicités par la DGPR pour expertiser la qualité des analyses socio-économiques des projets de prévention.

LE CAS PARTICULIER DE LA PRÉVENTION DES CRUES TORRENTIELLES EN MONTAGNE

Les crues torrentielles en montagne représentent des phénomènes hydrauliques particuliers en matière de prévention des inondations. Au-delà des débordements d'eau, elles impliquent, dans les cours d'eau de montagnes à fortes pentes, de volumineuses quantités de sédiments transportés par les crues. Le transport solide représente par conséquent une composante très importante de l'analyse des crues torrentielles, les sédiments pouvant causer l'érosion du lit et des berges, des engravements, défluviations, etc. lors d'épisodes extrêmes. INRAE apporte un appui régulier au service des risques naturels et hydrauliques (SRNH) pour améliorer la prévention de ce type de risque, à commencer par le développement de modèles hydrauliques spécifiques, capables d'intégrer cette composante de transport sédimentaire et ses influences sur les lois d'écoulement du mélange eau-sédiments.

Des actions de valorisation - transfert sont menées comme l'édition d'un



Frédéric Grelot
Economiste, UMR
G-eau, INRAE,
membre du groupe
de travail ACB/AMC

Depuis 2007, dans la continuité de ma thèse, je participe à l'élaboration du cadre national de l'évaluation économique des projets de gestion des inondations, notamment pour les ouvrages de protection. Avec mes collègues de G-eau, nous avons contribué à développer des compétences jusqu'ici manquantes en France, par rapport au Royaume-Uni ou aux États-Unis par exemple. Le challenge était de pouvoir calculer le montant des dommages évités grâce aux projets envisagés et de qualifier les incertitudes des indicateurs des analyses économiques. Sur la base de dires d'experts, nous avons élaboré des modèles utilisables « clés en main », dits « fonctions de dommages », pour les logements, les activités économiques et les parcelles cultivées. Ils sont préconisés par la DGPR dans l'analyse coût-bénéfice des projets labellisés PAPI. Nous sommes également un transfert *via* la formation continue depuis 2011 sur ce sujet. L'évaluation économique des inondations est stimulante, car nous sommes amenés à croiser beaucoup de disciplines : agronomie, géographie, hydrologie, sociologie, psychologie... et à étendre notre compréhension du lien inondation-territoire.

[guide technique](#) sur les caractéristiques des crues torrentielles avec transport solide, leurs effets morphologiques, les moyens de mesure adaptés, les méthodes de simulation existantes.

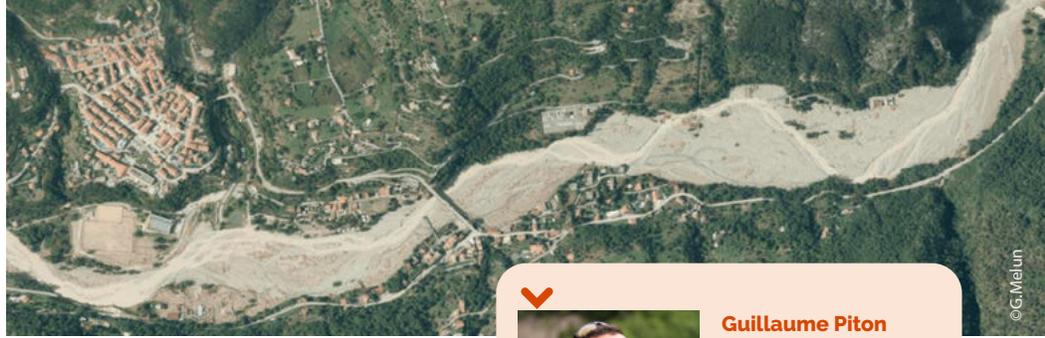
L'appui se manifeste également par la contribution à des groupes de travail mis en place par le SRNH. Un groupe a par exemple élaboré le guide méthodologique «*Plan de prévention des risques torrentiels*» et un second a travaillé sur la prise en compte des spécificités du risque torrentiel dans la conception des méthodes d'analyse coûts-bénéfices et multicritère. D'autres actions ont permis la conception de dispositifs de correction torrentielle adaptés, le développement de méthodes d'évaluation de leur efficacité ou encore l'élaboration de stratégies de maintenance adaptées à ces dispositifs particuliers. Enfin, INRAE participe à l'accompagnement de la démarche Stratégie territoriale pour la prévention des risques en montagne (STePRiM), mise en place par le ministère chargé de l'écologie, au travers de l'élaboration du cahier des charges initial et de l'aide à la décision pour la mise en œuvre par les collectivités candidates.

Des recherches qui intéressent les assureurs

Les études portant sur le risque de crues intenses intéressent particulièrement les assureurs qui financent des travaux de recherche.

Le modèle MHYST, pour «modélisation hydraulique simplifiée en écoulement stationnaire», financé par le Fonds AXA pour la recherche, modélise de manière simplifiée les inondations sur des territoires disposant de peu de données, ce qui en fait un complément utile aux modèles hydrauliques classiques.

La Caisse centrale de réassurance a quant à elle financé des travaux d'analyse et de simulation des pluies à l'échelle des territoires métropolitain et corse. Un modèle a été adapté à une cinquantaine de zones du territoire pour simuler la variabilité fréquentielle, saisonnière, spatiale et temporelle des pluies sur de longues années et le risque d'inondation associé.



Pouvoir prévoir l'évolution des lits permet de proposer des principes d'aménagement du territoire.

SE PROTÉGER DES INONDATIONS GRÂCE AUX SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE

Le développement de solutions de prévention fondées sur la nature s'inscrit dans le programme DGPR/SRNH-INRAE. En cohérence avec la GEMAPI, il s'agit d'adopter une gestion intégrée qui prenne en compte le risque inondation et les enjeux environnementaux : maintien de zones d'expansion des crues, de zones humides, actions de restauration des écosystèmes naturels. Récemment, le projet européen NAIAD a permis de proposer de nouvelles méthodologies d'évaluation de l'efficacité et d'aide à la décision pour implémenter des solutions fondées sur la nature. Une note méthodologique sur l'évaluation biophysique et économique des solutions basées sur la nature, associant géosciences, écologie et économie, est en cours de rédaction avec le Cerema, ainsi qu'une réflexion sur la cohérence de la gouvernance actuelle sur les inondations.

La politique de prévention contre les risques naturels a été initiée avec la problématique des inondations en 1858. Ses évolutions successives ont permis de construire des outils et méthodes qui répondent aux différentes problématiques des acteurs publics de cette politique. C'est ainsi qu'INRAE a contribué à la connaissance des phénomènes et de l'aléa, permettant leur prise en compte dans l'élaboration des zonages réglementaires du risque des plans de prévention des risques naturels dès les années 1980. Puis, des modèles et des outils ont été déployés pour améliorer la prévision des crues et accompagner les services créés à cet effet. Enfin, l'expertise des équipes INRAE contribuent à une gestion intégrée des risques d'inondation en proposant notamment des méthodologies



Guillaume Piton
Chercheur en hydraulique torrentielle, unité ETNA, INRAE

D'abord ingénieur hydraulicien en bureau d'études, je mène aujourd'hui des recherches sur les crues torrentielles impliquant du transport de sédiments et bois flottants, et sur les stratégies de protection contre les risques associés. La tempête Alex de 2020 a causé d'importantes crues et des dommages liés au charriage des sédiments dans les Alpes maritimes. La DGPR a immédiatement mobilisé l'IGN pour effectuer des images aériennes et un relevé Lidar, ainsi que le Cerema, l'ONF-RTM et INRAE pour réaliser un retour d'expérience sur cette catastrophe rare. Ces analyses nous ont permis d'améliorer la connaissance du transport sédimentaire et de flottants lors des crues extrêmes et d'éclairer la reconstruction post-crue. Dans cette logique d'amélioration continue, la DGPR soutient la recherche pour l'action et INRAE, tant dans nos travaux fondamentaux sur les cours d'eau torrentiels, que dans nos actions plus opérationnelles. En plus des publications, je contribue à la rédaction de guides et notes pour les services de l'État et les techniciens, comme le guide d'élaboration des Plans de Prévention des Risques associés aux cours d'eau torrentiels.

pour l'analyse coût-bénéfice des actions de prévention inscrites dans les PAPI. INRAE s'emploie déjà à affronter les nouveaux enjeux que la politique de prévention devra intégrer, parmi lesquels les impacts des changements climatiques et les incertitudes qui en découlent ou encore l'amélioration de la prise en compte du risque dans la gestion des territoires, en y impliquant l'ensemble des acteurs de ces territoires, de manière à accroître à la fois la prévention, la protection et la résilience du plus grand nombre face aux inondations. ■



Direction de l'Appui aux Politiques publiques
Centre siège d'Antony
1, rue Pierre Gilles-de-Gennes
92160 Antony

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/>

**Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE