



Le Zouave du Pont de l'Alma à Paris lors de la crue de la Seine le 5 juin 2016
(© Julien Tournebize, INRAE)

> **Prévision des crues et des inondations**

De la mesure des débits aux systèmes opérationnels de prévision



Juin 2026

Charles Perrin, Vazken Andréassian, François Bourgin,
Olivier Delaigue, David Dorchies, Guillaume Dramais,
Catherine Fouchier, Pierre-André Garambois, Pierre Javelle,
Michel Lang, Jérôme Le Coz, Maria-Helena Ramos,
Benjamin Renard, François Tilmant, Valérie Molinéro-Demilly,
INRAE

Etude de cas du département de recherche **AQUA (Écosystèmes aquatiques, ressources en eau et risques)** réalisée selon la méthode ASIRPA (Analyse de l'impact sociétal de la recherche) mise au point par INRAE.

Résumé

Depuis le début des années 2000, un effort de recherche de long terme coordonné entre plusieurs équipes de recherche d'INRAE a permis de progresser dans le domaine de la prévision des crues et des inondations. Les travaux ont porté sur l'amélioration de la connaissance des débits en rivière, la simulation des crues et leur prévision en temps réel, l'intégration de chaînes de prévision et la quantification des incertitudes associées. Ils ont été menés par un groupe d'hydrologues, hydrauliciens et statisticiens d'INRAE, issus de quatre unités de recherche, en partenariat avec le Service central Vigicrues du Ministère de la transition écologique, qui a été l'interlocuteur technique principal dans les développements et qui a apporté un soutien financier pluriannuel.

Les recherches se sont attachées principalement à développer et améliorer (i) des techniques de mesure des débits et des méthodes d'estimation des courbes de tarage dans des contextes hydrauliques variés, (ii) des modèles et méthodes de prévision des crues au niveau du réseau réglementaire Vigicrues, (iii) des modèles et méthodes pour l'avertissement aux crues en dehors du réseau réglementaire, (iv) des techniques de quantification des incertitudes associées à ces différentes approches. Ces travaux ont porté sur l'ensemble du territoire métropolitain et sur des départements d'Outre-mer, afin d'assurer la généralité des développements et leur applicabilité à différents contextes hydroclimatiques. Les résultats de recherche sont transférés de manière continue aux services opérationnels via des guides, outils et logiciels.

Les recherches d'INRAE sur les crues ont eu un impact durable sur la capacité des services de l'État français en charge de la surveillance des débits (Unités d'Hydrométrie - UH) et de la prévision des crues (Services de Prévision des Crues - SPC). Ces services utilisent les méthodes et outils développés pour fournir des indicateurs clé aux décideurs intervenant dans les chaînes d'alerte, contribuant ainsi à protéger les personnes et les biens lors d'événements d'inondation dont les impacts sont potentiellement dévastateurs. Au cours des vingt dernières années, plus d'une quarantaine de doctorants ou post-doctorants ont contribué à cet effort de recherche, un nombre important d'articles, tant scientifiques que techniques ont permis de diffuser les résultats, et des liens étroits ont été tissés avec les services de l'État via des formations, des groupes utilisateurs, des démarches de retour d'expérience et des ateliers techniques.

Abstract

Flood and inundation forecasting From flow monitoring to operational forecasting systems

Since the early 2000s, a long-term research effort coordinated between several INRAE research teams has led to progress in the field of flood forecasting. The work has focused on improving knowledge of river flows, simulating and forecasting floods in real time, integrating forecasting chains, and quantifying associated uncertainties. It has been carried out by a group of hydrologists, hydraulicians, and statisticians from four INRAE research units, in partnership with the Central Flood Warning Service (Vigicrues network) of the Ministry of Ecological Transition, which has been the main technical partner in the developments and has provided multi-year financial support.

Research focused mainly on developing and improving (i) techniques for measuring flows and methods for estimating rating curves in various hydraulic contexts, (ii) models and methods for forecasting floods at the station of the Vigicrues regulatory network, (iii) models and methods for flood warning outside the regulatory network, (iv) techniques for quantifying the uncertainties associated with these different approaches. This work covered the entire metropolitan territory and overseas departments in order to ensure the generality of the developments and their applicability to different hydroclimatic contexts. Research outcomes are continuously transferred to operational services through guides, tools, and software.

INRAE's research on floods has had a lasting impact on the capacity of the French government agencies responsible for water flow monitoring (Hydrometry Units - UH) and flood forecasting (Flood Forecasting Services - FFS). These services use the methods and tools developed to provide key indicators to decision-makers involved in the alert chain, thereby helping to protect people and property during flood events with potentially devastating impacts. Over the past 20 years, more than 40 PhD students and postdoctoral researchers have contributed to this research effort, a significant number of scientific and technical articles have helped disseminate the results, and close links have been built with government agencies through training courses, user groups, feedback initiatives, and technical workshops.

Table des matières

Résumé	2
Abstract	3
Problématiques sociétales initiales et contexte externe initial	5
Les inondations, des enjeux socio-économiques majeurs	5
De l'annonce à la prévision des inondations.....	5
Vers une meilleure connaissance des débits en rivière	6
Evolution du cadre réglementaire.....	6
Contributions d'INRAE et de ses partenaires hors-INRAE	7
La convention DGPR/SRN - INRAE, un cadre partenarial de long terme sur la prévision	7
Structuration des contributions INRAE au volet Prévision des inondations	8
Partenariats complémentaires.....	10
Produits issus des recherches	11
Circulation des connaissances et intermédiaires	16
Groupes de travail	16
Formations	17
Conférences et séminaires	17
Communication grand public	18
Chronologie	18
Récapitulatif des cinq partenaires principaux (hors-INRAE) associés	21
Impacts	21
Économique.....	21
Environnemental	22
Politique	22
Santé/Sanitaire.....	23
Social, territorial	23
Impacts généralisés	23
Impacts potentiels	23
Chemin d'impact	24
Les impacts en résumé	25
Source des données – Références	25
Annexe 1 – Liste des abréviations utilisées	26
Annexe 2 – Définition de quelques termes courants	27

Problématiques sociétales initiales et contexte externe initial

Les inondations, des enjeux socio-économiques majeurs

Les inondations sont parmi les phénomènes naturels les plus dommageables au monde. En 2024, les pertes liées aux inondations étaient estimées à 84 Md\$, juste derrière les cyclones (145 Md\$) à l'échelle mondiale (AON, 2025¹). En France, la Caisse nationale de réassurance (CCR) estime que, depuis 1982, année de création du régime d'indemnisation des risques de catastrophes naturelles (dit régime Cat Nat), la moitié de la sinistralité issue de phénomènes naturels est liée aux inondations (CCR, 2025²). En 2024, les inondations ont représenté un coût global des dommages assurés estimé entre 1,2 et 1,35 Md€. Ces chiffres devraient évoluer à la hausse dans les prochaines décennies du fait du changement climatique, avec une augmentation probable de la fréquence et de l'intensité des phénomènes de précipitation extrêmes. La CCR (2023³) estime que le coût moyen annuel lié au péril inondation devrait augmenter de + 15 % d'ici à 2050 (soit + 148 millions d'euros par an) du fait d'évolution de l'aléa, et de + 38 % (soit + 370 millions d'euros par an) du fait de l'aléa et de l'évolution des enjeux assurés. Les enjeux sociaux sont également très importants. On estime qu'environ 18,5 millions de personnes sont potentiellement concernées par le risque d'inondation en France, et les impacts des inondations sur les logements, les réseaux (transport, communication, eau, énergie, etc.) et les moyens de production peuvent se faire sentir durablement, sur plusieurs années.

De l'annonce à la prévision des inondations

Au-delà des solutions structurelles de protection contre les inondations (digues, barrages, etc.), une manière de réduire leurs impacts négatifs est d'anticiper les phénomènes de crue et d'alerter les populations et les décideurs avec suffisamment d'avance pour favoriser la mise en sécurité des personnes, l'évacuation des zones à risques, et la protection des biens. Jusqu'en 2003, en dehors des dispositifs gérés par EDF sur les principaux massifs montagneux, la France ne disposait au niveau national que d'un dispositif d'annonce de crues sur ses grands cours d'eau. Il s'agissait d'observer la formation et la propagation des phénomènes de crues dans le réseau hydrographique à l'aide des capteurs de mesure disponibles en rivière. Cette propagation dans les cours d'eau pouvant être très rapide, les délais de réaction étaient souvent trop courts pour permettre une chaîne d'alerte efficace, en dehors des grands cours d'eau où existaient des outils d'hydraulique simplifiée (par ex. les réglottes de Bachet). Suite à différents événements catastrophiques dans les années 1990 et au début des années 2000 (Vaison-la-Romaine en 1992, moitié nord de la France en 1995, bassin de l'Aude en 1999, bassin de la Somme en 2001), une commission d'enquête parlementaire⁴ a pointé du doigt les lacunes du dispositif français de prévision, et a proposé une série de mesures pour en améliorer l'efficacité.

Naissait alors en 2003, sous l'impulsion du ministère en charge de l'environnement, le service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations (SCHAPI), service rattaché à la direction générale de la prévention des risques (DGPR) et qui sera installé sur la Météopole à Toulouse. Ce service se voyait notamment confier la mission de coordonner l'action de 22 services de prévision des crues (SPC) issus de la refonte des 52 services d'annonce de crues (SAC) (Tanguy et al., 2007⁵). L'objectif était alors de mettre rapidement sur pied des moyens opérationnels d'anticipation des inondations, à

¹ 2024 Climate and Catastrophe Insight, AON, <https://assets.aon.com/-/media/files/aon/reports/2024/climate-and-catastrophe-insights-report.pdf>

² Les catastrophes naturelles en France. Bilan 1982-2024, CCR. https://www.ccr.fr/wp-content/uploads/2025/07/20250610_BILAN_CAT_NAT_2024-3.pdf

³ Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à horizon 2050 – 2023.CCR. <https://www.ccr.fr/consequences-du-changement-climatique-sur-le-cout-des-catastrophes-naturelles-en-france-a-horizon-2050/>

⁴ <https://www.assemblee-nationale.fr/rap-enq/r3386-01.asp>

⁵ <https://doi.org/10.1051/lhb:200502005>

la fois en termes de dispositifs techniques équipant les services, et de compétences au niveau des agents formés aux métiers de la prévision. Cela a conduit notamment à la publication en 2006 de la première carte de vigilance crues, vigilance dans les 24 h à venir, basée sur le même code couleur que la vigilance météo mise en service en 2001 (vert, jaune, orange, rouge), et concentrée sur les réactions des principaux cours d'eau de la France métropolitaine continentale (Janet et al., 2025⁶). L'année suivante, Météo-France proposera une carte de vigilance pluies-inondations⁷ afin d'améliorer l'efficacité de la chaîne d'alerte et la communication.

Parallèlement aux aspects opérationnels, la restructuration des services s'est accompagnée de la mise en place de programmes pluriannuels de recherche-développement en partenariat avec des établissements de recherche, engagés pour proposer des solutions innovantes d'anticipation. Dès 2003, le Cemagref (désormais INRAE) s'est impliqué dans ces programmes de recherche, en particulier au travers de ses équipes travaillant sur la modélisation hydrologique à des fins opérationnelles. **Les modèles hydrologiques, qui représentent la réponse en débit des bassins versants à des pluies, sont en effet des outils indispensables pour la prévision des crues, puisqu'ils permettent des délais d'anticipation supérieurs à ceux obtenus avec des outils de propagation en rivière uniquement.**

Vers une meilleure connaissance des débits en rivière

En parallèle, en 2006, l'Etat engage une autre réforme portant sur l'**hydrométrie**, c'est-à-dire les dispositifs de mesure des débits dans les cours d'eau, visant à unifier les dispositifs (matériels et de ressources humaines) de gestion des données hydrométriques, dans le but d'améliorer la gestion quantitative de l'eau et de mutualiser la connaissance et les moyens. Des unités d'hydrométrie (UH) sont créées, au sein des Directions régionales de l'environnement (DIREN devenues depuis DREAL) (Leleu et al., 2014⁸). Un ambitieux chantier de refonte des bases de données hydrométriques est ensuite lancé (Opération HYDRO 3), avec l'objectif de créer un référentiel unifié sur les données, et de permettre à la fois leur bancarisation sur le long terme, leur accès pour des applications temps réel et leur analyse par des modules statistiques dédiés. Cela aboutira notamment à l'ouverture de l'**HydroPortail** en 2022 et des services statistiques associés (Dufeu et al., 2022⁹ ; Audouy et al., 2024¹⁰), qui permettent un accès aisé à l'ensemble des données disponibles, avec un référentiel mis à jour. Un autre chantier sera également mis en œuvre pour créer une base nationale des repères de crue, de manière à améliorer la connaissance des événements extrêmes. Une plateforme nationale collaborative sur les repères de crues sera ainsi ouverte en 2016 (Fromental et al., 2024¹¹). Depuis 2007, INRAE a apporté son concours à ces différents développements, que ce soit sur les techniques de mesure des débits (jaugeage), l'analyse statistique ou la connaissance des crues.

Evolution du cadre réglementaire

L'évolution du dispositif opérationnel de la prévision des crues s'inscrit dans un cadre plus général sur la prévention des risques et des inondations, qui a évolué au cours des 20 dernières années. On peut citer notamment les textes et démarches suivants, qui ont contribué à orienter certains travaux :

- Les deux arrêtés du 2 juin 2003^{12 13} portant respectivement création et organisation du SCHAPI, qui cadrent les missions service et son mode de fonctionnement.

⁶ <https://doi.org/10.1080/27678490.2025.2472646>

⁷ La Vigilance « pluie-inondation » repose sur l'expertise de Météo-France pour les précipitations et intègre une connaissance de la sensibilité hydrologique fournie par le réseau Vigicrues sur certaines régions.

⁸ <https://doi.org/10.1051/lhb/2014004>

⁹ <https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2099317>

¹⁰ <https://doi.org/10.1080/27678490.2024.2317798>

¹¹ <https://doi.org/10.1080/27678490.2024.2333410>

¹² <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000778441>

¹³ <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000229756>

- La même année, le 30 juillet 2003, est publiée la loi n° 2003-699 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages¹⁴. Elle prévoit notamment la mise en place des repères de crues et donne un cadre général à la surveillance et la prévision des crues.
- La circulaire du 13 avril 2006 relative à l'organisation de l'hydrométrie¹⁵ puis celle du 4 novembre 2010 relative à l'évolution de l'organisation pour la prévision des crues et l'hydrométrie¹⁶ renforcent les liens et modalités de fonctionnement conjointes des UH et SPC.
- La Directive Inondation (2007/60/CE)¹⁷ et sa transposition en droit français par le décret n°2011-227 du 2 mars 2011 relatif à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation¹⁸, qui conduira à définir **la stratégie nationale de gestion des risques d'inondation** (SNGRI)¹⁹. Cette stratégie a trois grands objectifs prioritaires : augmenter la sécurité des populations exposées ; stabiliser à court terme, et réduire à moyen terme, le coût des dommages liés à l'inondation ; raccourcir fortement le délai de retour à la normale des territoires sinistrés. L'amélioration de la sécurité des populations évoluant en zone inondable passe notamment par une amélioration des systèmes de prévision des crues et des inondations, en termes d'efficacité, de précision, et de délai d'anticipation, mais aussi en termes de couverture spatiale des services offerts, avec l'objectif de couvrir l'intégralité des phénomènes d'inondation (débordement de cours d'eau, ruissellement, remontée de nappe, submersion marine). La SNGRI renforce également la prise en compte des événements exceptionnels et les modalités de cartographie du risque, et met en place les **plans de gestion du risque inondation** (PGRI) avec des aspects liés à la prévision.
- Suite à la création en 2005 du "**Groupe Doppler en Hydrométrie**" (adossé à la Section Hydrométrie de la Société Hydrotechnique de France, créée en 2013) et sous l'impulsion des acteurs impliqués, la commission nationale de normalisation AFNOR/X10C « Hydrométrie »²⁰ a été réactivée entre 2014 et 2024²¹. Cela a notamment abouti à un ensemble de travaux de normalisation sur diverses techniques de jaugeage, avec par exemple la nouvelle édition de la **Charte Qualité Hydrométrie** de 2017, qui sert de référentiel commun en France.
- Enfin, on peut citer le cadrage des travaux des organismes opérant pour la DGPR via des feuilles de route interannuelles, dont deux portant respectivement sur les débordements de cours d'eau et le ruissellement, avec des aspects de prévision²².

Contributions d'INRAE et de ses partenaires hors-INRAE

La convention DGPR/SRN - INRAE, un cadre partenarial de long terme sur la prévision

Le Département AQUA (Écosystèmes aquatiques, ressources en eau et risques) d'INRAE mène des recherches sur les risques naturels liés à l'eau, notamment les inondations, dans le cadre de l'un de ses trois grands objectifs scientifiques (GOS 3 - Risques naturels et environnementaux liés à l'eau : anti-

¹⁴ <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000604335>

¹⁵ <https://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/notice?id=Bulletinofficiel-0004471&re-gld=72035cfe-083f-4287-a335-211844e876f3&pos=5>

¹⁶ <https://www.legifrance.gouv.fr/circulaire/id/32150>

¹⁷ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000523817>

¹⁸ <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000023654727>

¹⁹ <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/prevention-inondations>

²⁰ <https://gdh-hydrometrie.org/activites-du-groupe/groupe-de-travail/la-commission-de-normalisation-en-hydrometrie-afnor-x10c/>

²¹ Elle a été remise en sommeil fin 2024, elle ne fait plus que de la veille normative. La communauté souhaite reporter l'effort vers des documents communs au niveau national (sous l'égide du SCV) et international (guides et référentiels de l'OMM).

²² https://www.ihedate.org/IMG/pdf/feuilles_de_route_prevention_des_risques.pdf

pation, évaluation et gestion). Ces recherches ont pour objectifs de développer des connaissances nouvelles sur la genèse des phénomènes d'inondation et de produire des méthodes et outils permettant d'en améliorer la prévision et la gestion, à destination des acteurs de l'eau et des services opérationnels.

La convention quinquennale DGPR/SRN - INRAE est pilotée par le Service des risques naturels (SRN, anciennement Service des risques naturels et hydrauliques - SRNH) de la DGPR. Elle regroupe plusieurs volets traitant de différents risques (prévision des inondations, ouvrages hydrauliques, prévention des inondations, risques terrestres). Sur la prévision des inondations, elle offre un cadre partenarial de long terme permettant d'aller de la recherche amont et la production de connaissance jusqu'au transfert d'outils aux acteurs du réseau national Vigicrues. Elle permet également d'accéder à de larges bases de données hydroclimatiques et d'informations sur des événements de crue sur l'ensemble du territoire national, indispensables pour le développement de méthodes applicables à des contextes très variés. Elle met aussi en contact direct chercheurs et acteurs de la prévision des crues et de l'hydrométrie, permettant de collecter des retours d'expérience des utilisateurs des méthodes développées et de construire de nouvelles questions de recherche.

Le volet « Prévision des inondations » de la convention a été créé en 2003. Le programme de travail est renouvelé sur une base annuelle depuis lors, avec un cadre pluriannuel de la convention depuis 2022. Il est établi en concertation avec le SCHAPI (devenu Service central Vigicrues (SCV) en 2024).

Structuration des contributions INRAE au volet Prévision des inondations

Axes de travail

Les travaux de recherche au sein du volet « Prévision des inondations » sont organisés en cinq axes :

- **Axe I – Développements métrologiques en hydrométrie (HYDROM)** : cet axe vise à améliorer la connaissance des débits dans les cours d'eau, par le développement de techniques hydrométriques innovantes, par l'amélioration de la quantification des incertitudes associées aux mesures, par la formation des acteurs des Unités d'Hydrométrie, et par le traitement statistique de ces mesures. Cet axe contribue notamment à améliorer les données hydrologiques mises à disposition sur l'**HydroPortail** par le SCV.
- **Axe II – Prévision opérationnelle des crues sur le réseau réglementaire des Services de prévision (PREVI)** : cet axe vise à développer et améliorer des méthodes et modélisations hydrologiques s'insérant dans les chaînes de prévision des crues utilisées en temps réel par les SPC, pour produire des prévisions de crue assorties d'une quantification d'incertitudes. Cet axe contribue notamment au développement des outils opérationnels **GRP**, **OTAMIN** et **EvalHyd** utilisés par les SPC, dont les prévisions alimentent le portail Vigicrues géré par le SCV.
- **Axe III – Avertissement crues soudaines en site non jaugé (AVERT)** : cet axe permet d'accompagner le SCV dans le développement et la mise en place du dispositif d'avertissement Vigicrues Flash, visant à fournir aux communes un service d'avertissement aux crues comparable à l'Avertissement Pluies Intenses à l'échelle des Communes (APIC) de Météo-France. Cet axe développe ainsi la plateforme de modélisation SMASH permettant de traiter plus spécifiquement les petits cours d'eau en dehors du réseau surveillé par les SPC.
- **Axe IV – Actions hydrologiques transversales aux axes HYDROM-PREVI-AVERT (TRANSV-HPA)** : cet axe regroupe plusieurs des thématiques développées dans les trois axes précédents et permet de conduire des actions transversales à ces trois axes. A titre d'exemple, sont menés actuellement dans cet axe des travaux relatifs au **projet Vigicrues 2030** sur la couverture totale du territoire par la vigilance crue.
- **Axe V – Développements sur les Outre-mer (OMER)** : cet axe regroupe les actions menées sur les territoires des collectivités territoriales d'Outre-mer, en particulier pour le compte des DEAL et des **Cellules de Veille Hydrologiques (CVH)** associées (en particulier en Guadeloupe,

Guyane, Martinique, Mayotte et Réunion), avec l'objectif d'améliorer les techniques hydrométriques et les systèmes de prévision, en tenant compte des spécificités de ces territoires (par ex. contexte insulaire, disponibilité limitée en données, ou événements cycloniques).

Types d'action

Chaque axe est composé de deux types d'actions :

- **A** : des actions Recherche et développements donnant notamment lieu à des travaux de thèse ou de post-doctorat ;
- **B** : des actions Appuis et transferts vers l'opérationnel permettant de transformer en outils et méthodes opérationnels les développements menés dans les actions de type A.

Des actions d'appui et de retour d'expérience liées à des événements de crue récents sont également menés plus ponctuellement dans le cadre de la convention ou d'actions associées (dispositif d'appui scientifique et technique – AST – notamment).

Les travaux produisent de nombreux résultats, sous des formes variées, qu'elles soient académiques ou opérationnelles (voir partie suivante).

Gouvernance

Le volet Prévision des inondations est organisé de la manière suivante :

- Le SCV assure le pilotage et l'orientation des travaux, en lien avec ses objectifs stratégiques et opérationnels ;
- INRAE propose des développements scientifiques et techniques pour répondre aux questions soulevées par le SCV ;
- La programmation et le suivi des travaux sont menés sur la base d'un cycle annuel comprenant :
 - Une réunion de restitution des travaux de l'année en cours et de programmation des travaux de l'année suivante, se déroulant à l'automne par axe ;
 - Un travail conjoint INRAE-SCV de construction des actions, avec arbitrage des priorités par le SCV, pour aboutir à un programme de travail définitif en fin d'année ;
 - Une réunion de suivi à mi-parcours (généralement en juin) pour faire part de l'avancement des actions et des difficultés éventuelles rencontrées
- Chaque axe de travail est coordonné par une personne d'INRAE et a une personne référente au niveau du SCV. Les éventuelles difficultés rencontrées sont traitées d'abord par ces binômes, puis remontées si besoin aux pilotes principaux du volet côté SCV et INRAE.
- La coordination des travaux entre axes est assurée par les coordinateurs d'axes INRAE (concertation pour les réunions de programmation et identification d'actions transversales) et les personnes référentes du SCV (recherche de synergies entre actions et de cohérence avec les orientations techniques du SCV).

Equipes impliquées

En 2003, le SCHAPI (désormais SCV) a souhaité rassembler un ensemble de partenaires scientifiques pour évaluer différentes approches de prévision des crues, dans un contexte temps réel (projet Bassins versants numériques expérimentaux – BVNE) (2006-2011). Deux équipes du Cemagref (désormais INRAE) à Aix et Antony ont participé à cette opération, et les travaux se sont ensuite poursuivis sur cette thématique. À partir de la fin des années 2000, le Cemagref a également répondu à la demande du SCHAPI de bénéficier d'un appui en hydrométrie, avec l'implication de l'équipe de Lyon.

Aujourd'hui, les équipes d'INRAE impliquées de manière récurrente dans la convention et leur contribution aux différents axes sont détaillées dans le Tableau 1. Ces travaux mobilisent une quarantaine

d'agents permanents et non permanents (chercheurs.ses, ingénieurs.es, doctorant.e.s et post-doctorant.e.s). Des travaux plus ponctuels ont pu être menés avec les équipes d'INRAE de l'Institut en Géosciences de l'Environnement (IGE) à Grenoble.

Tableau 1 : Contribution des équipes d'INRAE aux axes de la convention (* = Coordination d'axe)

Nom complet Unité	Nom abrégé, codique INRAE et localisation	Equipe	Contribution aux axes
Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages	UMR G-Eau [1458], Montpellier	Gestion Hydraulique, Optimisation et Supervision des Transferts d'Eau (GHOSTE) ²³	PREVI
Hydrosystèmes Continents Anthropisés - Ressources, Risques, Restauration	UR HYCAR [1462], Antony	Hydrologie des bassins versants (HYDRO) ²⁴	PREVI*, TRANSV-HPA, OMER*
Risques, écosystèmes, vulnérabilité, environnement, résilience	UMR RECOVER [1467], Aix-en-Provence	Risques Hydrométéorologiques (RHAX) ²⁵	HYDROM, AVERT*, TRANSV-HPA*, OMER
Fonctionnement des hydrosystèmes	UR RIVERLY [1469], Villeurbanne	Hydraulique des rivières (HYR) ²⁶	HYDROM*, TRANSV-HPA, OMER

Partenariats complémentaires

Les travaux d'INRAE sur la prévision des inondations s'inscrivent dans un cadre de partenariats scientifiques plus larges, en France et à l'international, avec une recherche de complémentarité des compétences. Ces partenariats se traduisent au niveau des données ou d'actions spécifiques.

Parmi les partenaires clés en France, on peut citer :

- **Météo-France** : acteur national incontournable de l'observation des variables atmosphériques, de la recherche en météorologie et des applications opérationnelles de prévisions, Météo-France est un partenaire privilégié pour la prise en compte du compartiment atmosphérique. Les équipes d'INRAE exploitent de très nombreux produits et bases de données de Météo-France, mis à disposition depuis de nombreuses années pour les activités de recherche et ouverts plus largement depuis 2024. Elles collaborent en particulier avec les équipes du **Centre national de recherche en météorologie** (CNRM)²⁷ et de la **Direction de la climatologie et des services climatiques** (DCSC), basées à Toulouse.
- Le **BRGM** : spécialiste de la géologie et de l'hydrogéologie, le BRGM apporte une expertise importante dans la compréhension des liens entre eaux de surface et eaux souterraines. Ce lien peut être particulièrement complexe dans le cas des formations karstiques (formations calcaires érodées par l'eau), dont la prise en compte dans les modèles de prévision des crues reste complexe.
- L'**Université Gustave Eiffel**, plus particulièrement le laboratoire Eau et Environnement (à Nantes)²⁸, qui a développé des travaux sur les chaînes intégrées de prévision sur les crues soudaines, et qui a également une expertise forte sur les aspects inondation, procédures d'avertissement, d'alerte et de gestion de crise.

²³ <https://g-eau.fr/index.php/fr/umr-geau/les-equipes/item/409-gestion-hydraulique-optimisation-et-supervision-des-transferts-d-eau-ghoste>

²⁴ <https://webgr.inrae.fr/>

²⁵ <https://recover.paca.hub.inrae.fr/qui-sommes-nous/nos-equipes/rhax>

²⁶ <https://riverhydraulics.riverly.inrae.fr/>

²⁷ <https://www.umr-cnrm.fr/>

²⁸ <https://ee.univ-gustave-eiffel.fr/>

- Le **Cerema**, qui développe notamment diverses approches de modélisation hydraulique utiles pour la simulation des zones inondées, et qui peuvent être couplées à des modèles de prévision des crues.
- L'**Institut de mécanique des fluides de Toulouse (IMFT)**, pour ses travaux en modélisation hydrologique et hydraulique.
- L'Institut des Géosciences de Environnement (IGE, Grenoble) pour ses travaux sur les risques, notamment en zone de montagne.
- Les producteurs d'énergie comme **Electricité de France (EDF, en particulier sa Direction technique générale à Grenoble)** et la **Compagnie nationale du Rhône (CNR, à Lyon)**, qui gèrent de nombreux ouvrages hydrauliques et ont développé à ce titre de fortes compétences dans divers domaines, notamment en hydrométrie.

A l'international, des partenariats existent avec diverses institutions et organismes de recherche, dans le cadre de projets européens ou internationaux, groupes de travail ou réseaux scientifiques. On peut citer notamment parmi les partenaires le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF), le Joint Research Centre (JRC) rattaché à la Commission européenne et responsable de l'implémentation d'EFAS (European Flood Awareness System), le service géologique américain (USGS, Etats-Unis), le Bureau of Meteorology (Australie), l'Institut météorologique et hydrologique suédois (SMHI, Suède), plusieurs partenaires canadiens (Université Laval, Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), et Environment Canada), etc. Parmi les réseaux, on peut citer l'initiative HEPEX²⁹ sur la prévision hydrologique d'ensemble (Hydrologic Ensemble Prediction Experiment) ou les groupes de travail sur la normalisation en hydrométrie. Récemment, une collaboration dans le cadre du projet européen Destination Earth, regroupant un très large panel d'acteurs de la prévision météorologique et hydrologique, a permis d'évaluer l'intérêt de simulations météorologiques à haute résolution pour la simulation des crues rapides. Ces différents partenariats contribuent à développer des recherches à l'état de l'art international.

A côté de ces partenariats scientifiques, les travaux s'appuient sur des partenariats techniques avec les différents services concernés du réseau Vigicrues :

- plusieurs pôles du SCV, en particulier le pôle Modélisation et hydrologie opérationnelle et le pôle Acquisition de données hydrométriques,
- le réseau des 24 UH,
- le réseau des 17 SPC et des 5 Cellules de veille hydrologique (CVH – Guadeloupe, Guyane, Martinique, Mayotte, Réunion)³⁰,

mais également avec d'autres structures locales (**établissements publics territoriaux de bassins (EPTB)**, services départementaux d'incendie et de secours (SDIS), syndicats de rivières, etc.).

Produits issus des recherches

Les travaux menés depuis une vingtaine d'année dans le cadre de la convention DGPR-INRAE ont contribué à réaliser des progrès sur un certain nombre de sujets clés (la plupart des outils et instruments nommés ci-dessous sont décrits dans le Tableau 2), en particulier :

- **Estimation des débits en rivière** : les travaux portent sur le développement de technologies de mesure innovantes et la quantification d'incertitudes associées :
 - Estimation et gestion des courbes de tarage, et quantification des incertitudes associées : la méthode BaRatin a été développée sur les bases d'une approche bayésienne permettant de croiser l'information hydraulique connue a priori avec l'information contenue dans les jaugeages munis de leur incertitude. Elle a été mise en œuvre dans le logiciel

²⁹ <https://hepex.org.au/>

³⁰ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000049268288>

BaRatinAGE³¹ qui permet d'intégrer de nouvelles informations acquises pendant les événements de crue ;

- Caractérisation de l'influence de la végétation et de la marée : de nombreuses stations hydrométriques sont soumises à l'influence de la marée ou à celle de la végétation aquatique, influençant la relation hauteur-débit et créant des relations différentes suivant la dynamique du cours d'eau (montée-descente ; phénomènes d'hystérésis). Les recherches ont permis de proposer des modélisations de ces phénomènes et de les intégrer dans l'estimation des courbes de tarage grâce au code de calcul BaM³² ;
- Détarage de stations : Les lits naturels des cours d'eau évoluent en fonction des périodes d'érosion ou de dépôt de sédiments, pouvant conduire à des évolutions lentes ou brusques de la relation hauteur-débit. Les travaux ont visé à permettre une gestion des courbes de tarage instables, en proposant des outils de détection, visualisation et estimation de détarages (package R RatingShiftHappens³³) ;
- Jaugeage par vidéo : il s'agit de techniques de vélocimétrie par analyse de séquences d'images, de plus en plus couramment utilisées, notamment dans les cas de crues rapides où les jaugeages classiques peuvent être compliqués. Le logiciel Fudaa-LSPIV³⁴, développé en collaboration avec EDF et la CNR, permet le traitement d'image et l'estimation des débits.
- Outils de jaugeage low-tech / low-cost : pour les bas débits, la règle à jauger et les outils associés (dont l'application mobile QRàJ développée par la Cellule d'animation technique pour l'eau et les rivières Calvados-Orne-Manche (CATER COM)) ont été développés et largement diffusés auprès d'un public d'utilisateurs très varié.
- Calcul d'incertitude des jaugeages ADCP : les techniques de jaugeage par profileur acoustique de vitesse par effet Doppler (ADCP, Acoustic Doppler current profiler) qui utilisent des ondes ultrasons pour mesurer la vitesse de l'eau, sont de plus en plus utilisées. La méthode OURSIN a été développée pour en estimer les incertitudes. Elle a été implémentée dans QRevInt³⁵, basé sur le logiciel QRev de l'USGS, et une extension QRame³⁶ a été développée pour l'application de QRevInt sur un ensemble de jaugeages ;
- Logiciels du réseau hydrométrique national : Des appuis méthodologiques ont été apportés en particulier sur le développement du module d'analyse statistique des chroniques de débits archivées dans la base de données associée à l'HydroPortail/hydro.eaufrance³⁷ (package R HydroPortailStats³⁸), ainsi que sur les évolutions du logiciel Barème de gestion des jaugeages et des courbes de tarages (futur logiciel JACINTHE), avec de nombreuses applications sur la prévention des inondations.
- **Prévision sur sites jaugés** : les travaux s'attachent à développer des modèles et outils pour la prévision sur sites jaugés :
 - Modèle hydrologique de prévision : Le modèle GRP (modèle GR Prévision, de la famille des modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)) a été développé pour produire des prévisions de débit sur sites jaugés, en utilisant des observations et prévisions de pluie et de température. Le modèle a connu des améliorations progressives (par ex. récemment l'adaptation pour la réactivité aux pluies intenses) et peut fonctionner à différents pas de temps. Il est à la base d'un logiciel opérationnel du même nom³⁹ ;

³¹ <https://baratin-tools.github.io/>

³² <https://github.com/BaM-tools>

³³ <https://github.com/Felipemendezrios/RatingShiftHappens>

³⁴ <https://riverhydraulics.riverly.inrae.fr/outils/logiciels-pour-la-mesure/fudaa-lspiv>

³⁵ <https://www.genesishydrotech.com/qrevint>

³⁶ <https://gdh-hydrometrie.org/boite-a-outils/logiciels/qrame-2/>

³⁷ <https://www.hydro.eaufrance.fr>

³⁸ <https://github.com/benRenard/HydroPortailStats>

³⁹ <https://webgr.inrae.fr/outils/logiciels/grp>

- Accumulation et fonte de la neige : Certains événements de crue sont influencés par les fontes nivales. Le module Cemaneige⁴⁰ permet de modéliser la dynamique du manteau neigeux à l'échelle du bassin versant, et d'estimer la contribution de la fonte au débit en utilisant la température de l'air ;
 - Assimilation de données : Les observations de débit sont utiles pour corriger les erreurs des modèles hydrologiques en temps réel, via des techniques d'assimilation de données. Des travaux ont été menés pour évaluer l'intérêt de diverses méthodes d'assimilation et les adapter au contexte de la prévision en temps réel ;
 - Estimation des incertitudes prédictives : Les prévisions de débit sont entachées d'incertitudes provenant de différentes sources (observations, modèle, paramètres, prévision météo). La méthode QUOIQUE, sur laquelle est basée le logiciel OTAMIN⁴¹, permet d'évaluer les incertitudes liées à la modélisation hydrologique ;
 - Prévision d'ensemble : L'incertitude issue des prévisions météorologiques peut-être quantifiée sur la base d'ensembles de prévisions météorologiques. Différents travaux ont été menés pour évaluer les prévisions probabilistes de crue produites sur la base de ces ensembles, en utilisant en complément un ensemble de procédures statistiques de pré- ou post-traitement ;
 - Évaluation des prévisions : La qualité des prévisions doit être évaluée, au moment du développement des modèles de prévision ou après des événements. L'outil EvalHyd⁴², utilisable avec différents types de modèles, permet de calculer des critères de performance sur des prévisions déterministes ou probabilistes, avec différents types de conditionnement.
- **Avertissement sur sites non jaugés** : les travaux ont pour objectif de produire des avertissements aux crues en dehors du réseau réglementaire :
- Modélisation hydrologique : les développements se sont d'abord concentrés sur des approches événementielles de modélisation, adaptées à des contextes de crues rapides (modèle GRD, outil AIGA). Ces dernières années, les travaux se sont concentrés sur une plateforme de modélisation spatialisée SMASH⁴³. Le système Vigicrues Flash est aujourd'hui basé sur cette plateforme ;
 - Méthodologie de régionalisation : les paramètres des modèles hydrologiques sur sites non jaugés doivent être estimés par des méthodes indirectes dites de régionalisation, en se servant en particulier des liens entre paramètres estimés sur sites jaugés et descripteurs de bassins versants. Les recherches ont permis de mettre en place les modélisations sur de larges parties du territoire ;
 - Utilisation des données radar : l'avertissement aux crues soudaines (temps de réactions inférieurs à six heures) nécessite de recourir à des produits pluviométriques d'observation basés sur le réseau français de radar (ARAMIS). Les modélisations ont été adaptées pour prendre en compte ces informations (en particulier produits Antilope ou Panthere) à différents pas de temps ;
 - Estimation de la sévérité des crues : sur sites non jaugés, on ne dispose pas de seuil de crue comme sur les stations réglementaires. Pour avoir une échelle de gravité des crues prévues, on utilise des rejeux du modèle. Le franchissement de quantiles prédéfinis permet d'assurer un avertissement gradué aux utilisateurs ;
 - Utilisation des prévisions de pluie immédiate : le modèle de prévision de Météo-France fournit des prévisions immédiates, jusqu'à 6 heures d'échéance. Ces prévisions sont essentielles sur les bassins très réactifs, pour gagner un peu en anticipation. Les prévisions

⁴⁰ <https://webgr.inrae.fr/outils/modeles-hydrologiques/modele-de-neige>

⁴¹ <https://webgr.inrae.fr/outils/logiciels/otamin>

⁴² <https://webgr.inrae.fr/outils/logiciels/evalhyd>

⁴³ <https://smash.recover.inrae.fr/>

du modèle AROME-PI ont été évaluées dans des chaînes de prévision, notamment sur des bassins présentant de forts enjeux (travaux également menés dans le cas des bassins jaugés) ;

- **Outils de propagation** : les modèles hydrologiques peuvent être couplés à des outils de propagation hydraulique. On utilise généralement des outils de propagation faisant des hypothèses simplificatrices sur les écoulements. Une large gamme d'outils ont été évalués dans des cadres de modélisation variés (sur bassins jaugés et non jaugés).
- **Travaux spécifiques aux territoires ultramarins** : Depuis une dizaine d'années, des travaux sont menés avec les acteurs locaux de la prévision et de l'hydrométrie, pour améliorer les dispositifs existants. On peut citer en particulier :
 - Des travaux d'amélioration des systèmes de prévision à la Réunion, avec la mise en place des outils SMASH et GRP ;
 - Des démarches d'amélioration des dispositifs et techniques de jaugeage à Mayotte ;
 - Des développements pour l'estimation des pluies et la prévision des débits sur les principaux cours d'eau de Guyane.

Les travaux réalisés permettent de produire une grande variété de livrables, en particulier :

- Rapports d'étude,
- Production scientifique et techniques (articles et communications en conférence) (voir exemple dans le Tableau 3),
- Modélisations et méthodes de traitement statistiques,
- Logiciels opérationnels,
- Guides techniques,
- Supports et dispense de formation dans les cycles de formation pour le réseau Vigicrues.

Le Tableau 2 donne des exemples de livrables parmi les plus significatifs produits dans le cadre de la convention.

Tableau 2 - Exemples de logiciels et instrumentations dont la production a été réalisée totalement ou partiellement dans le cadre de la convention DGPR-INRAE (classement par ordre chronologique de première version)

Nom	Unités INRAE impliquées	Type	Descriptif succinct	Première version
GRP	HYCAR, G-Eau	Logiciel	Prévision hydrologique des crues	2007
Fudaa-LSPIV	RIVERLY	Logiciel	Vélocimétrie par analyse de séquences d'images	2014
BaRatinAGE	RIVERLY, RECOVER	Logiciel	Outil de construction des courbes de tarage et d'estimation des incertitudes	2015
HydroPortailStats	RIVERLY	Logiciel	Module statistique utilisé par l'Hydro-Portail	2017
OTAMIN	HYCAR	Logiciel	Outil d'estimation des incertitudes prédictives	2018
BaM	RIVERLY	Logiciel	Estimation d'un modèle et de ses incertitudes	2018
Règles à jaugeur ⁴⁴	RIVERLY	Instrumentation	Outil de jaugeage facile et rapide à utiliser	2020
SMASH	RECOVER	Logiciel	Plateforme de modélisation hydrologique spatialisée	2020

⁴⁴ <https://riverhydraulics.riverly.inrae.fr/outils/instrumentation/regles-a-jauger>

EvalHyd	HYCAR	Logiciel	Outil d'évaluation des performances de modèles	2022
QRame	RIVERLY	Logiciel	Application de la méthode QrevInt sur un ensemble de stations	2024
RatingShiftHappens	RIVERLY, RECOVER	Logiciel	Détection et estimation de détarages	2024

Tableau 3 : Exemples de publications scientifiques et techniques sur les travaux menés dans le cadre de la convention DGPR-INRAE

Examples of scientific papers illustrating the collaborative research on flood monitoring and forecasting

Bourgin, F., M. H. Ramos, G. Thirel and V. Andréassian (2014). "Investigating the interactions between data assimilation and post-processing in hydrological ensemble forecasting." *Journal of Hydrology* 519: 2775-2784, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.07.054>.

Jay-Allemand, M., Demargne, J., Garambois, P.-A., Javelle, P., Gejadze, I., Colleoni, F., Organde, D., Arnaud, P., and Fouchier, C. (2024). Spatially distributed calibration of a hydrological model with variational optimization constrained by physiographic maps for flash flood forecasting in France, *Proc. IAHS*, 385, 281–290, <https://doi.org/10.5194/piahs-385-281-2024>.

Javelle, P., C. Fouchier, P. Arnaud and J. Lavabre (2010). Flash flood warning at ungauged locations using radar rainfall and antecedent soil moisture estimations. *Journal of Hydrology* 394(1): 267-274, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.032>.

Le Boursicaud, R., Pénard, L., Hauet, A., Thollet, F., and Le Coz, J. (2016) Gauging extreme floods on YouTube: application of LSPIV to home movies for the post-event determination of stream discharges. *Hydrol. Process.*, 30: 90–105, <https://doi.org/10.1002/hyp.10532>.

Le Coz, J., B. Renard, L. Bonnifait, F. Branger and R. Le Boursicaud (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology* 509: 573-587, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.016>.

Examples of technical papers illustrating the collaborative research on flood monitoring and forecasting

Baby, F., Boujard, P., Martel, S., Roulenq, A., Villani, D., Organde, D., Javelle, P., Tilmant, F., Perrin, C. (2024). Prévision des crues en milieu montagneux sous climat tropical : exemple de La Réunion. *La Houille Blanche*, 110(1). <https://doi.org/10.1080/27678490.2024.2374540>.

Demargne, J., Javelle, P., Organde, D., Garandeau, L., & Janet, B. (2019). Intégration des prévisions immédiates de pluie à haute-résolution pour une meilleure anticipation des crues soudaines. *La Houille Blanche*, 105(3–4), 13–21. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019023>.

Le Coz, J., Renard, B., Lang, M., Calmel, B., Mendez Rios, F., Hauet, A., Despax, A., Perret, E., Bonnifait, L. (2024). Développement d'outils pour la quantification des incertitudes des données hydrométriques. *La Houille Blanche*, 110(1). <https://doi.org/10.1080/27678490.2024.2337704>

Viatgé, J., Pinna, T., Ficchi, A., Perrin, C., Dorchies, D., Garandeau, L., & Tilmant, F. (2019). Vers une plus grande flexibilité temporelle du modèle opérationnel de prévision des crues GRP. *La Houille Blanche*, 105(2), 72–80. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019017>.

Viatgé, J., Berthet, L., Marty, R., Bourgin, F., Piotte, O., Ramos, M. H., & Perrin, C. (2019). Vers une production en temps réel d'intervalles prédictifs associés aux prévisions de crue dans Vigicrues en France. *La Houille Blanche*, 105(2), 63–71. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019016>.

Circulation des connaissances et intermédiaires

En plus des livrables détaillés dans la section précédente, les résultats et connaissances produits dans le cadre des travaux menés dans la convention sont diffusés par un ensemble de canaux, liés au processus de développement – transfert – retour d’expérience illustré à la Figure 1. Les développements méthodologiques sont réalisés dans le cadre de travaux de recherche au sein des équipes impliquées. Une fois les résultats disponibles, ceux-ci sont transférés aux utilisateurs (acteurs du réseau Vigicrues) sous diverses formes et produits. Leur mise en œuvre pratique donne lieu à des retours d’expérience de la part des utilisateurs, pointant notamment les éventuelles limites. Ces retours font l’objet d’analyses, qui aideront à formuler de nouvelles questions de recherche pour répondre aux problèmes soulevés, et donc à réinitier une nouvelle phase de développement. L’accompagnement réalisé sur les phases de transfert et de retour d’expérience est détaillé dans ce qui suit.

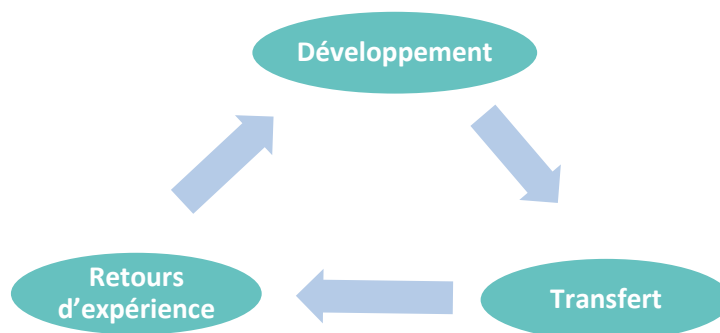


Figure 1 : Illustration du cycle de développement adopté

Groupes de travail

Les équipes ont constitué ou se sont impliquées dans un ensemble de groupes de travail, à vocation scientifique ou techniques. Ce sont des lieux d’échange privilégiés sur des méthodes ou outils, permettant le partage de points de vue et assurant à la fois le transfert de connaissance de la recherche vers les utilisateurs, et la collecte des retours d’expérience qui nourrira ensuite la recherche. On peut notamment citer :

- Groupes utilisateurs sur les outils développés (animation par les équipes INRAE) : des groupes utilisateurs regroupant des acteurs territoriaux du réseau Vigicrues ont été constitués autour de certains outils développés par INRAE, de manière à permettre des échanges réguliers entre développeurs INRAE et utilisateurs. Des groupes existent aujourd’hui sur les logiciels Fudaa-LSPIV, BaRatinAGE, GRP, OTAMIN, etc.
- Groupe Doppler Hydrométrie (GDH)⁴⁵ (co-animation par les équipes INRAE et d’autres acteurs (EDF, CNR...)) : il s’agit du réseau des hydromètres francophones monté en 2005 (France, Canada, Suisse, Luxembourg, Cameroun, Maroc, République du Congo, Sénégal, etc. ; 650 adresses abonnées), permettant des échanges sur les problématiques d’hydrométrie. Il a organisé notamment depuis 2009 neuf exercices d’intercomparaison de jaugeages à grande échelle, permettant de regrouper différentes équipes d’hydromètres, avec l’objectif de comparer les résultats de différents utilisateurs et instruments, et d’estimer les incertitudes de différentes techniques de jaugeage. Au niveau français, le GDH regroupe praticiens des unités d’hydrométrie, du SCV et de divers acteurs (EDF, CNR, etc.), et des acteurs de la recherche qui apportent leur expertise sur les techniques et les pratiques de jaugeage ;
- Feuilles de route DGPR : INRAE co-anime deux feuilles de route sur les travaux des opérateurs de l’État sur les risques naturels : l’une sur « Inondation par débordement » avec le Cerema, et l’autre sur « Inondation par ruissellement » avec l’Université Gustave Eiffel ;

⁴⁵ <https://gdh-hydrometrie.org/en/>

- Expert-Team Hydrometry (ex-ProjectX) (participation depuis 2008) : Il s'agit d'un réseau d'experts, piloté par l'Organisation météorologique mondiale (OMM), sur le domaine de l'hydrométrie. INRAE y apporte son expertise sur la métrologie et l'hydrométrie.
- Formation internationale en hydrométrie AIRH/AISH/OMM⁴⁶ (participation depuis 2013, animation depuis 2019) ;
- Prévision hydrologique d'ensemble (HEPEX) (co-animation puis participation) : Réseau scientifique international créé en 2004, ce groupe rassemble des personnes travaillant sur les prévisions hydrométéorologiques d'ensemble. INRAE y apporte son expertise sur la prévision probabiliste des crues et des étiages et la prévision saisonnière.

Formations

Les équipes INRAE organisent ou contribuent à des formations, théoriques ou pratiques, sur les thématiques de travail. Il s'agit pour partie de formations rentrant dans le cycle de formation piloté par le SCV sur la prévision des crues. Le Tableau 4 donne la liste des formations récurrentes auxquelles les équipes participent.

Tableau 4 : Liste des formations récurrentes liées à la convention SCV avec les équipes INRAE

Thème	Public cible	Année de démarrage	Fréquence
Probabilités et statistiques appliquées à l'hydrologie	Hydromètres et chargés d'étude en UH, prévisionnistes en SPC	2009	Annuelle
Statistiques avancées pour le calcul d'incertitudes en hydrologie	Hydromètres et chargés d'étude en UH, prévisionnistes en SPC	2015	1 fois tous les 2 ans
Cours international d'hydrométrie OMM/AIRH/AISH	Hydromètres et académiques (chercheurs/étudiants)	2013 (pour INRAE)	Tous les 2 ans en moyenne
Le modèle GRP	Prévisionnistes en SPC	2013	Annuelle
Incertitudes en prévision des crues et production de prévisions expertisées	Prévisionnistes en SPC	2016	Annuelle

Conférences et séminaires

La diffusion des connaissances se fait également par l'organisation de conférences et séminaires, scientifiques ou techniques par l'INRAE, à destination d'un public large (recherche, ingénierie, services opérationnels, gestionnaires des risques, etc.). Parmi les implications régulières, on peut citer la participation à l'organisation de conférences de :

- la Société hydrotechnique de France (SHF)⁴⁷, en particulier sur la prévision des crues et sur l'hydrométrie, qui permettent de rassembler des publics scientifiques et techniques à l'échelle nationale ;
- l'European Geosciences Union (EGU)⁴⁸, qui organise annuellement une conférence où apparaissent des sessions sur les questions liées à la prévision des crues ;
- Les conférences de l'AISH, avec notamment des cours d'hydrométrie dans le cadre des événements FRIEND-Water (Cotonou 2021, Dakar 2023) ;
- les conférences AIRH RiverFlow pour l'hydrométrie : organisation en 2018, contribution à l'organisation (via la formation associée) en 2024 et 2026.

⁴⁶ <https://www.iahr.org/index/committe/103>

⁴⁷ <https://www.shf-hydro.org/>

⁴⁸ <https://www.egu.eu/>

Plus ponctuellement, les équipes INRAE peuvent organiser des séminaires thématiques liés à la prévision, par exemple dans le cadre des rencontres techniques HYDROGR⁴⁹ visant à diffuser les productions autour des modèles hydrologiques GR. Elles participent aussi à des salons professionnels pour présenter les méthodes et outils. On peut notamment citer les Assises nationales des risques naturels (ANRN), organisées par le Ministère de la transition écologique (6^e édition en 2025), le salon des maires et des collectivités locales, les conférences FloodRisk ou encore le salon Pollutec.

Communication grand public

Les agents INRAE sont régulièrement sollicités pour des communications grand public sur la question des inondations, que ce soit auprès des médias lors d'événements de crue pour expliquer les phénomènes, ou pour des manifestations de vulgarisation des résultats scientifiques (par ex. Fête de la Science). À titre d'exemple, INRAE a été associé techniquement à un projet monté par l'Agence de l'eau Adour-Garonne avec collèges et lycées sur le thème « Adopte un cours d'eau ». Il permettait de valoriser la règle à jauger et le protocole associé auprès d'un jeune public.

Chronologie

Le Tableau 5 donne les grandes étapes des développements réalisés par le SCV et la Figure 2 illustre les principales étapes de travail et l'organisation chronologique des développements réalisés par INRAE depuis 2003).

Tableau 5 : Principaux repères chronologiques

Date	Événement
2003	Réforme de l'organisation de la prévision des crues et création du SCHAPI : -deux arrêtés du 2 juin 2003 ⁵⁰ portant respectivement création et organisation du SCHAPI -loi n° 2003-699 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages -démarrage convention SCHAPI-Cemagref (à intégrer INRAE)
2005	Les équipes INRAE crée le d'hydromètre francophones « Groupe Doppler en Hydrométrie"
2006	Première vigilance crue : Vigicrues permet d'informer les personnes en temps réel - circulaire du 13 avril 2006 relative à l'organisation de l'hydrométrie
2010	Circulaire du 4 novembre 2010 relative à l'évolution de l'organisation pour la prévision des crues et l'hydrométrie
2011	Directive Inondation (2007/60/CE) ⁵² et sa transposition en droit français par le décret n°2011-227 du 2 mars 2011 relatif à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation ⁵³ , qui conduira à définir la stratégie nationale de gestion des risques d'inondation (SNGRI) et met en place les plans de gestion du risque inondation (PGRI) avec des aspects liés à la prévision.
2011	Fin de l'expérimentation BVNE (projet Bassins versants numériques expérimentaux), qui a permis de gagner en expérience sur la prévision temps réel
2011	Ouverture du service APIC de Météo-France
2014-2024	Activation de la commission nationale de normalisation AFNOR/X10C « Hydrométrie : un ensemble de travaux de normalisation sur diverses techniques de jaugeage
2016	Publication des prévisions graphiques avec incertitudes sur Vigicrues
2017	Ouverture du service Vigicrues Flash (accès aux alertes aux crues hors réseau réglementaire)
2017	Rédition de la Charte Qualité de l'Hydrométrie
2022	Nouveau site Hydroportail pour les données hydrométriques et hydrologiques
2023	Démarrage du projet Vigicrues 2030

⁴⁹ <https://webgr.inrae.fr/communications/rencontres-hydrogr>

⁵⁰ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000778441>

⁵¹ <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000229756>

⁵² <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000523817>

⁵³ <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000023654727>

Figure 2 : Frise Chronologique

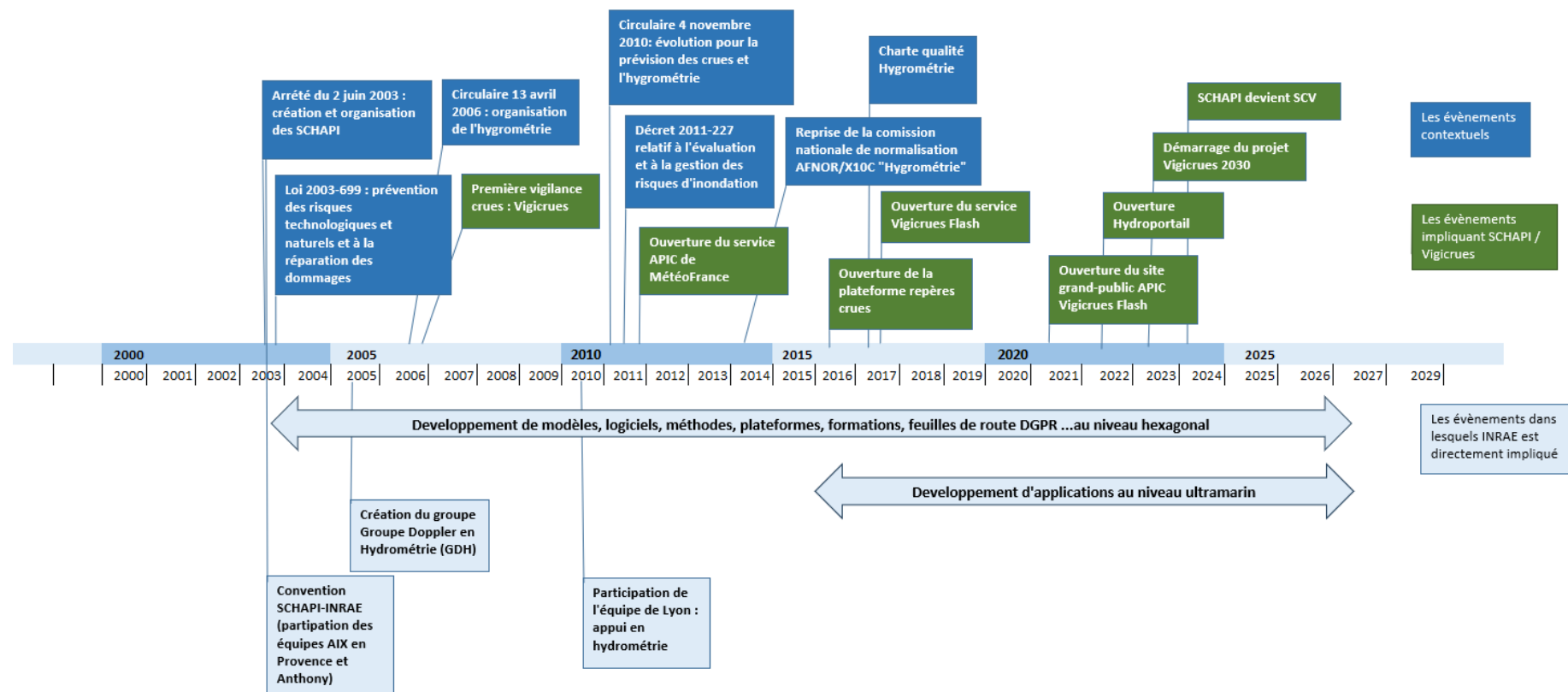
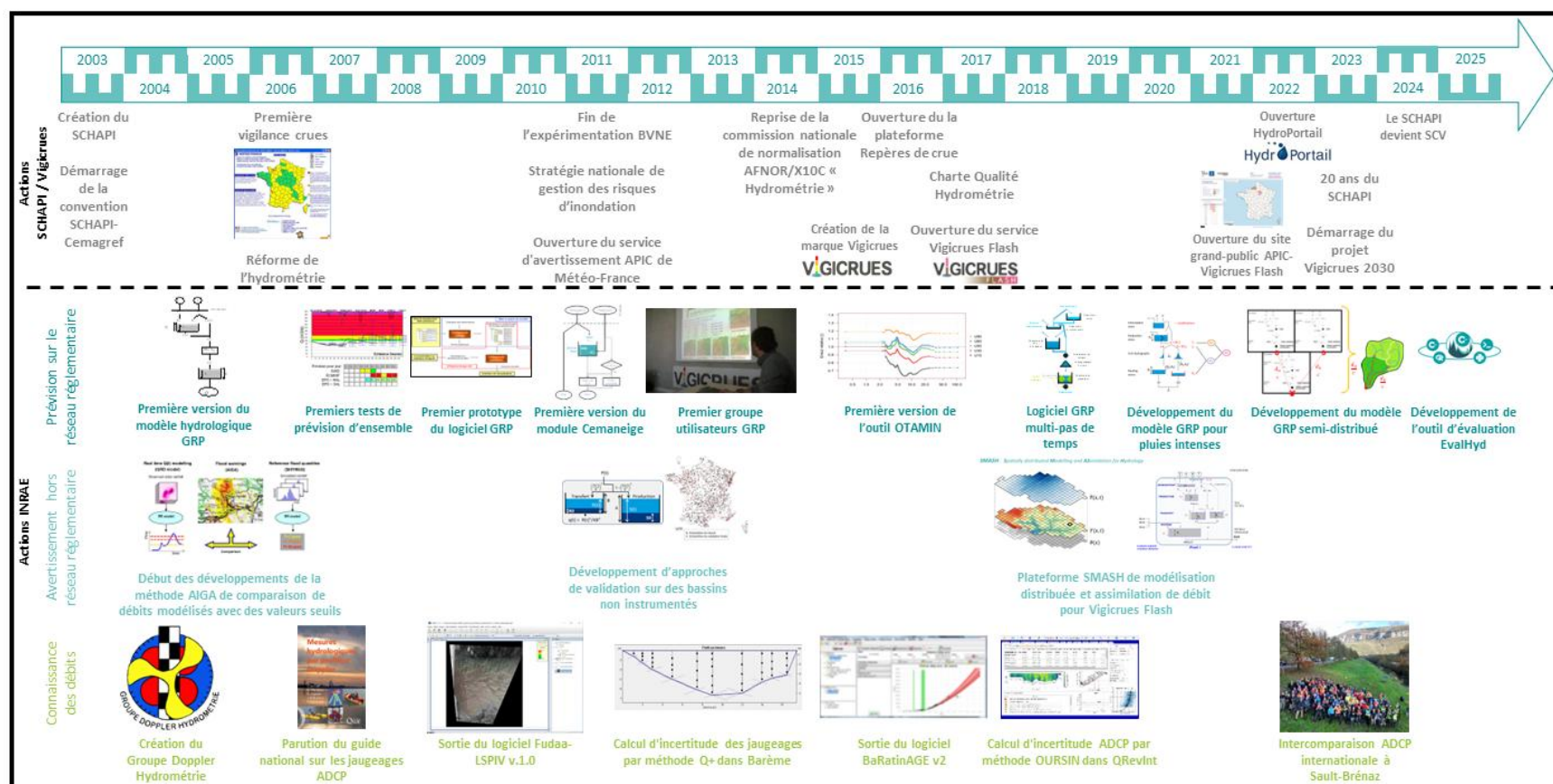


Figure 2 : Illustration des principales étapes de travail depuis 2003



Ces développements ont été en partie réalisés avec d'autres acteurs impliqués dans la recherche sur la prévision des crues, notamment Météo-France, le BRGM, l'Université Gustave Eiffel, le Cerema, EDF, la CNR, etc. Des projets de recherche, comme les projets ANR PICS (2017-2022) et MUFFINS (2022-2026), ont permis de réaliser des développements scientifiques ayant bénéficié au réseau de la prévision.

Récapitulatif des cinq partenaires principaux (hors-INRAE) associés

Nom du partenaire associé aux recherches (5 maximum)	Type (académique, privé, instance publique, institut technique)	Connaissances apportées disciplines, compétences spécifiques	Moyens apportés (Financiers, infrastructures.)	A participé depuis le début des recherches ?
SCV (Service central Vigicrues) et réseau Vigicrues	Services déconcentrés publics	Pratique opérationnelle de l'hydrométrie et la prévision	Dispositifs d'observation et expérience de prévision temps réel	Oui
Météo-France	Etablissement public (opérationnel et recherche)	Météorologie, prévision météorologique	Bases de données, produits météorologiques	Oui
Université Gustave Eiffel (UGE)	Etablissement public (enseignement supérieur)	Prévision intégrée des inondations		Non
Cerema	Etablissement public	Hydraulique		Non
Électricité de France (EDF)	Entreprise	Gestion d'ouvrages, hydrométrie	Cofinancements	Oui
Compagnie nationale du Rhône (CNR)	Entreprise	Gestion d'ouvrages, hydrométrie	Cofinancements	Oui

Impacts

Économique

Les inondations sont les événements naturels occasionnant le plus de dégâts en France. On estime les dégâts moyens liés aux inondations à environ 500 M€ / an sur les quarante dernières années. Les travaux menés par les équipes INRAE en partenariat avec le SCV (coût complet annuel d'environ 700 k€), bien que leurs impacts économiques directs soient difficiles à quantifier, ont contribué à :

- développer une grande variété d'applications grâce à la meilleure connaissance des débits extrêmes des crues (dimensionnement, gestion temps réel, seuils réglementaires, etc.). L'amélioration des techniques de jaugeage, des méthodes de quantification des incertitudes associées aux mesures, des traitements statistiques, contribue au développement de chaînes de prévision plus fiables. Différents travaux issus de la littérature scientifique montrent la valeur

des réseaux hydrométriques (meilleure précision des prévisions permettant de limiter les dégâts des inondations, meilleure estimation des débits extrêmes permettant un dimensionnement plus adapté des ouvrages, etc.)^{54, 55, 56, 57, 58}.

- disposer de prévisions de crue en temps réel, permettant de construire des chaînes d'information plus efficaces pour limiter les impacts sur les personnes et les biens. Ici encore, même si la valeur économique de telles prévisions dans le cas des inondations est toujours délicate à estimer, l'intérêt de tels dispositifs est reconnu par une très large gamme d'acteurs (gestionnaires de l'eau, assureurs, gestionnaires de réseaux, etc.). De plus en plus d'assureurs développent des systèmes d'alertes aux assurés de manière à aider à limiter les impacts. Des travaux ont également pu montrer la valeur économique des prévisions dans le cas de l'hydroélectricité⁵⁹, ou plus largement^{60, 61}.

Environnemental

Les travaux menés dans le cadre de la convention SCV-INRAE n'ont pas d'objectifs environnementaux directs. Cependant, ils ont des impacts environnementaux indirects en :

- améliorant la connaissance des débits, ils contribuent à mieux définir certains seuils environnementaux utilisés notamment dans des objectifs de préservation des milieux ;
- limitant les pollutions accidentelles liées aux inondations, en permettant de mieux protéger les biens ;
- permettant une meilleure gestion des ouvrages (par ex. barrages) grâce aux prévisions, et permettant ainsi aux gestionnaires de ces ouvrages de mieux répondre aux contraintes environnementales à l'aval.

Politique

Jusqu'en 2003, la France ne disposait au niveau national que d'un dispositif d'annonce de crues sur ses grands cours d'eau. Depuis la naissance, en 2003, du service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations (SCHAPI), et aux lois, arrêtés et circulaires qui ont suivi, une grande variété d'applications ont développées, impliquant fortement INRAE, pour mieux gérer les débits des rivières notamment lors des débits extrêmes des crues. Cette nouvelle organisation contribue à augmenter de manière continue, d'abord au niveau hexagonal et depuis une dizaine d'années au niveau ultramarin, la sécurité des populations exposées ; limiter le coût des dommages liés à l'inondation ; raccourcir fortement le délai de retour à la normale des territoires sinistrés. L'amélioration de la sécurité des populations évoluant en zone inondable passe notamment par une amélioration des systèmes de prévision des crues et des inondations, en termes d'efficacité, de précision, et de délai d'anticipation, mais aussi en termes de couverture spatiale des services offerts, avec l'objectif de couvrir l'intégralité des phénomènes d'inondation (débordement de cours d'eau, ruissellement, remontée de nappe, submersion marine).

Les travaux menés par les équipes INRAE visent à soutenir les politiques publiques en matière de prévention des inondations au sens large. Les observations et prévisions produites aident les acteurs des territoires (gestionnaires, collectivités, etc.) dans leur prise de décision en contexte de gestion de crise,

⁵⁴ <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2024.100192>

⁵⁵ <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a749e12e5274a44083b81e8/str-w146-e-e.pdf>

⁵⁶ <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1017/S1350482700001626>

⁵⁷ <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.086>

⁵⁸ <https://hal.inrae.fr/tel-02602066v1/file/pub00045673.pdf>

⁵⁹ <https://hal.inrae.fr/tel-02608754v1>

⁶⁰ <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/NHREFO.NHENG-2094>

⁶¹ <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.04.016>

ainsi que pour l'analyse de retours d'expérience post-événement. L'implication des équipes INRAE pour le développement de normes en hydrométrie contribue à avoir des référentiels communs entre les différentes régions françaises ou à l'international, améliorant la qualité globale des données et facilitant les échanges de ces données pour des études à différentes échelles (régionales, nationales, internationales).

Santé/Sanitaire

Un des objectifs centraux des systèmes de prévision des crues est de prévenir les atteintes aux personnes. La prévision des zones inondées, en particulier dans le cas de crues éclair, contribue à faciliter l'évacuation des personnes séjournant dans ces zones, et ainsi à limiter le nombre de blessés ou de morts. Des prévisions peuvent aussi aider à limiter les comportements à risques. Eviter les alertes manquées est en ce sens un objectif recherché des systèmes de prévision de crue développés.

Social, territorial

Les inondations peuvent avoir des conséquences profondes et durables sur les populations, au-delà des dégâts directs. Elles peuvent par exemple occasionner des coupures de réseaux (eau, électricité, transport, etc.) dont la remise en état peut prendre plusieurs mois, détruire des infrastructures publiques, conduire aux déplacements de certaines zones habitées jugées trop à risques, etc. Bien que certains aspects relèvent davantage de la prévention, la prévision des inondations en temps réel peut faciliter la gestion de crise (anticipation des coupures du réseau routier pour mieux guider les populations en dehors des zones inondables. Les portails Vigicrues et Vigicrues Flash, en mettant des prévisions et avertissements à disposition de la population et des acteurs territoriaux, contribuent à limiter les impacts sociaux des inondations.

Notons que sur l'aspect hydrométrie, l'impact sociétal ne se limite pas au SCV mais il y a des retombées et participations de multiples organismes, jusqu'à des projets collaboratifs, éducatifs (collège/lycée) et associatifs (FF spéléologie par ex). Les prévisions du site Vigicrues sont également beaucoup utilisées par les usagers des rivières, notamment les clubs de canoé-kayak.

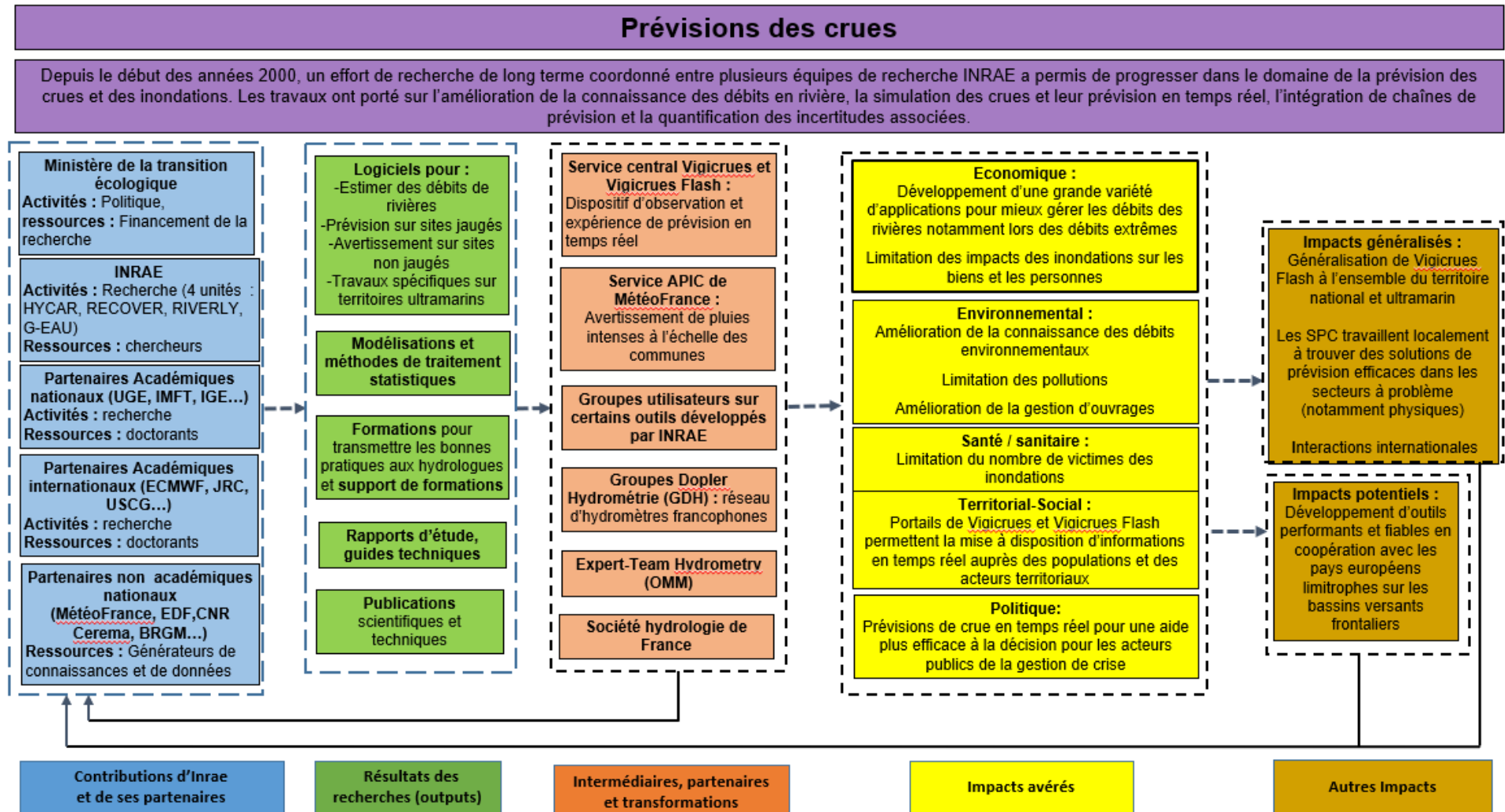
Impacts généralisés

Le projet Vigicrues 2030 du SCV, qui vise à assurer une couverture complète du territoire national pour la vigilance des crues (y compris les territoires ultramarins), fait intervenir les équipes INRAE (en partenariat également avec l'UGE). Les outils développés par INRAE (Equipe Risques Hydrométéorologiques d'Aix en Provence) actuellement utilisés dans Vigicrues Flash vont être étendus à l'ensemble du territoire. Par ailleurs, des travaux sont réalisés avec les SPC pour trouver localement des solutions de prévision plus efficaces dans les secteurs à problème (du fait de caractéristiques physiques particulières notamment).

Impacts potentiels

La coopération existe déjà avec les partenaires européens de pays limitrophes sur les bassins versants transfrontaliers en matière de prévision. Les outils développés permettront de renforcer cette coopération, en apportant des méthodes et outils plus performants et fiables.

Chemin d'impact



Les impacts en résumé

Le Tableau 6 synthétise les principaux impacts recensés des travaux sur la prévision des crues et des inondations.

Tableau 6 : Résumé des impacts des travaux sur la prévision des inondations

Dimension d'impact	Notation de l'importance de l'impact : de 1 à 5 ou faible, moyen, fort	Résumé de chacun des impacts
Economique	Fort	Développement d'une grande variété d'applications pour mieux gérer les débits des rivières notamment lors des débits extrêmes Limitation des impacts des inondations sur les biens et les personnes
Environnemental	Faible	Amélioration de la connaissance des débits environnementaux Limitation des pollutions Amélioration de la gestion d'ouvrages
Sanitaire	Fort	Limitation du nombre de victimes des inondations
Territorial-social	Moyen	Portails de Vigicrues et Vigicrues Flash permettent la mise à disposition d'informations en temps réel auprès des populations et des acteurs territoriaux
Politique	Moyen	Prévisions de crue en temps réel pour une aide plus efficace à la décision pour les acteurs publics de la gestion de crise

Source des données – Références

Les personnes extérieures contactées pour réaliser des entretiens dans le cadre de la constitution sont listées dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Liste des personnes avec lesquelles un entretien a été réalisé

Nom	Prénom	Titre	Affiliation
Chaléon	Carine	Adjointe au chef de département	DRIEAT Île-de-France Département Hydrologie et Prévision des Crues
Daubas	Mathias	Chef de pôle hydrologie opérationnelle	Service central Vigicrues
Janet	Bruno	Conseiller scientifique et technique auprès de la direction	Service central Vigicrues
Marty	Renaud	Responsable de l'unité Hydrologie-Hydrométéorologie	DREAL Centre-Val-de-Loire, SPC Loire-Allier-Cher-Indre
Soubeyroux	Jean-Michel	Directeur Adjoint Scientifique	Météo-France, Direction de la climatologie et des services climatiques

Annexe 1 – Liste des abréviations utilisées

Abréviation	Signification
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
AIRH	Association internationale de recherches hydrauliques
AISH	Association internationale des sciences hydrologiques
ANRN	Assises nationales des risques naturels
APIC	Avertissement Pluies Intenses à l'échelle des Communes
AQUA	Écosystèmes aquatiques, ressources en eau et risques
ARAMIS	Application radar à la météorologie infra-synoptique
AST	Appui scientifique et technique
AVERT	Avertissement crues soudaines
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BVNE	Bassins versants numériques expérimentaux
CEMAGREF	Centre national du machinisme agricole du génie rural, des eaux et des forêts
CCR	Caisse nationale de réassurance
CNR	Compagnie nationale du Rhône
CNRM	Centre national de recherche en météorologie
CVH	Cellules de Veille Hydrologiques
DEAL	Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement
DCSC	Direction de la climatologie et des services climatiques
DGPR	Direction générale de la prévention des risques
DIREN	Direction régionale de l'environnement
DREAL	Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EDF	Électricité de France
EGU	European Geosciences Union
EPTB	Établissements publics territoriaux de bassins
HYDROM	Développements météorologiques en hydrométrie
IMFT	Institut de mécanique des fluides de Toulouse
IRSTEA	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
INRAE	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
JRC	Joint Research Centre
OMER	Développements sur les Outre-mer
OMM	Organisation météorologique mondiale
PREVI	Prévision opérationnelle des crues sur le réseau réglementaire
SAC	Service d'annonce de crues
SCV	Service central Vigicrues
SCHAPI	Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations
SHF	Société hydrotechnique de France
SPC	Service de prévision des crues
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
TRANSV-HPA	Actions hydrologiques transversales aux axes HYDROM-PREVI-AVERT
UGE	Université Gustave Eiffel
UH	Unités d'hydrométrie
USGS	United States Geological Survey
SDIS	Services départementaux d'incendie et de secours

Annexe 2 – Définition de quelques termes courants

Les définitions suivantes sont issues de :

Margat, J. (1972). Terminologie hydrogéologique. BRGM, Département géologie de l'aménagement, Hydrogéologie, Orléans, 139 p. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/72-SGN-203-AME.pdf>

OMM et UNESCO (2012). Glossaire international d'hydrologie. Rapport WMO-No 385, 469 p. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000221862>

- **Alerte hydrologique :**

Information à caractère urgent sur un événement hydrologique prévu et considéré comme dangereux.

- **Crue :**

Montée, en général brève, du niveau d'un cours d'eau ou d'une masse d'eau jusqu'à un maximum dont il redescend plus lentement.

- **Hydraulique :**

Branche de la mécanique des fluides qui traite de l'écoulement de l'eau (ou d'autres liquides) dans des conduites, canaux découverts et autres ouvrages.

- **Hydrogéologie :**

Science, étude des eaux souterraines en général, aux points de vue et selon les méthodes géologiques, hydrodynamiques, chimiques, etc.

- **Hydrologie :**

Science des eaux naturelles, plus particulièrement des eaux continentales, sous leurs divers états. Science du cycle de l'eau dans la nature.

- **Hydrométrie :**

Science du mesurage et de l'analyse du cycle de l'eau elle comprend les méthodes, les techniques et l'instrumentation utilisées en hydrologie.

- **Incertitude :**

Estimation de l'intervalle de valeurs à l'intérieur duquel la valeur vraie à une probabilité donnée de se trouver.

- **Inondation :**

Submersion par l'eau débordant du lit normal d'un cours d'eau ou d'autres surfaces d'eau.

- **Prévision des crues :**

Prévision du niveau, du débit, du temps d'apparition et de la durée d'une crue, et plus spécialement du débit de pointe en un point donné d'un cours d'eau, résultant des précipitations et de la fonte des neiges.

Cette étude de cas a été réalisée par le département de recherche **AQUA (Écosystèmes aquatiques, ressources en eau et risques)** selon la méthode ASIRPA (Analyse de l'impact sociétal de la recherche) mise au point par INRAE.

Pour en savoir plus sur la méthode : <https://asirpa.hub.inrae.fr/>

Auteures principales et auteurs principaux :

Charles Perrin, Vazken Andréassian, François Bourgin, Olivier Delaigue, Guillaume Dramais, David Dorchies, Catherine Fouchier, Pierre-André Garambois, Pierre Javelle, Michel Lang, Jérôme Le Coz, Maria-Helena Ramos, Benjamin Renard, François Tilmant, Valérie Molinéro-Demilly

Constitutrices et contributeurs : Les travaux mentionnés dans ce document ont impliqué un très grand nombre de contributrices et contributeurs depuis leur démarrage en 2003, agents permanents ou contractuels, au sein des équipes concernées.

Les auteur-e-s remercient Carine Chaléon, Mathias Daubas, Bruno Janet, Renaud Marty et Jean-Michel Soubeyroux, qui ont accepté de réaliser des entretiens dans le cadre de l'élaboration de ce rapport, et/ou d'apporter un regard critique sur son contenu. Ils remercient également Mireille Matt pour ses observations sur le rapport, qui ont permis d'en améliorer la qualité.

Photo de couverture : crédit Julien Tournebize, INRAE (Le Zouave du Pont de l'Alma à Paris lors de la crue de la Seine le 5 juin 2016)

Ce document est sous licence Creative Commons BY NC SA : Attribution – Utilisation non commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions.



> Pour citer ce document : Perrin, C., Andréassian, V., Bourgin, F., Delaigue, O., Dorchies, D., Dramais, G., Fouchier, C., Garambois, P.A., Javelle, P., Lang, M., Le Coz, J., Ramos, M.H., Renard, B., Tilmant, F., Molinero-Demilly, V. *Prévision des crues et des inondations. De la mesure des débits aux chaînes opérationnelles de prévision*, Rapport ASIRPA, 2026, INRAE, 28 pages.

hal-05658992v1

> Contact : asirpa@inrae.fr