

**PRESTATION D'ASSISTANCE A LA MISE EN ŒUVRE
D'APPROCHES DISTRIBUEES ET REGIONALISEES
UTILISEES DANS LES METHODES DEVELOPPEES PAR
L'EQUIPE RHAX – UNITÉ RECOVER – CENTRE INRAE
PACA**

Appel d'Offres ouvert

**CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIERES
(C.C.T.P.)**

APPEL D'OFFRES OUVERT passé en application des Appel d'offre ouvert selon les articles R2161 2 à 11 du code de la commande publique relatif aux marchés publics

la science pour la vie, l'humain, la terre

Centre Provence-Alpes-Côte d'Azur
228, route de l'Aérodrome
Domaine Saint Paul - Site Agroparc
CS 40509
84914 Avignon Cedex 9
Tél. : +33 1 (0)4 32 72 20 00

Rejoignez-nous sur :



www.paca.inrae.fr

Article 1 : Présentation d'INRAE

INRAE, l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement, est un acteur majeur de la recherche et de l'innovation créé le 1er janvier 2020. Institut de recherche finalisé issu de la fusion entre l'INRA et l'IRSTEA, INRAE rassemble une communauté de 12 000 personnes, avec 273 unités de recherche, service et expérimentales implantées dans 18 centres sur toute la France.

L'institut se positionne parmi les tout premiers organismes de recherche au monde en sciences agricoles et alimentaires, en sciences du végétal et de l'animal, et en écologie-environnement. Il est le premier organisme de recherche mondial spécialisé sur l'ensemble « agriculture-alimentation-environnement ». INRAE a pour ambition d'être un acteur clé des transitions nécessaires pour répondre aux grands enjeux mondiaux.

Face à l'augmentation de la population, au changement climatique, à la raréfaction des ressources et au déclin de la biodiversité, l'institut a un rôle majeur pour construire des solutions et accompagner la nécessaire accélération des transitions agricoles, alimentaires et environnementales.

Les recherches d'INRAE sont conduites au sein de 14 départements scientifiques qui animent des communautés de recherche disciplinaires. Le département AQUA mène des recherches sur le fonctionnement et l'évolution des écosystèmes aquatiques, du cycle de l'eau et des cycles biogéochimiques. Par ses missions de recherche, formation et expertise, il contribue à la production de connaissances sur le fonctionnement, l'évolution et la gouvernance des socio-écosystèmes aquatiques et au développement de solutions opérationnelles permettant :

- l'atteinte du bon état écologique des milieux aquatiques et la conservation de la biodiversité,
- la gestion sobre des ressources en eau, considérée comme bien commun, en quantité et en qualité,
- l'anticipation et la gestion des risques naturels et anthropiques liés à l'eau et aux milieux aquatiques.

Article 2 : Présentation de l'équipe de recherche en hydrologie d'Aix-en-Provence

L'équipe de recherche en Hydrologie du centre d'Aix-en-Provence (RHAX) fait partie du département « AQUA ». Les activités de recherche menées au sein de ce département sont structurées en 3 Grands objectifs scientifiques (GOS). Les travaux de l'équipe RHAX participent au GOS 2 "Ressources en eau : soutenir une gestion sobre et durable de l'eau comme bien commun dans les territoires", au GOS 3 "Risques naturels et environnementaux liés à l'eau : anticiper, évaluer et gérer". Les objectifs de ces travaux visent la compréhension et la description des phénomènes qui agissent sur l'hydrosystème et les aménagements hydrauliques, au travers de l'étude des termes du cycle de l'eau, des flux et des stocks, et la quantification des aléas, des vulnérabilités et des risques naturels et anthropiques associés. Ces objectifs répondent à des enjeux de gestion durable de la ressource en eau et de protection des territoires face aux événements extrêmes et aux risques chroniques dans un contexte de changements globaux.

Dans ce cadre, l'équipe RHAX (7 permanents, 4 doctorants, 2 CDD) travaille au développement d'approches basées sur une modélisation simplifiée des processus hydrologiques et à leur régionalisation, c'est-à-dire à l'application de ces méthodes à l'ensemble d'une région. L'objectif est de fournir, en tout point d'un territoire, des connaissances des risques hydrologiques, tant ceux liés

aux excès d'eau que ceux liés aux pénuries d'eau. Ces méthodes s'appuient sur l'exploitation de l'ensemble des données disponibles et extrapolent ces informations en tout point, notamment sur les cours d'eau non jaugés.

Article 3 : Contexte général

3.1 Les enjeux

Le risque inondation est le risque naturel qui provoque le plus de dégâts dans le monde¹. Chaque année, des régions entières sont touchées, entraînant des préjudices de plus en plus considérables tant en termes de vies humaines que de pertes économiques. Cette tendance à l'augmentation des dégâts est à mettre sur le compte de changements « globaux », incluant divers facteurs : changements liés à l'occupation des sols (déforestation, urbanisation) amplifiant et accélérant les phénomènes de crue, réchauffement climatique entraînant en certaines régions une augmentation des précipitations en intensité et en fréquence, et urbanisation mal maîtrisée (notamment dans les pays en voie de développement), plus exposée aux crues (cf. le rapport 2014² du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat – GIEC).

Parallèlement aux enjeux liés aux excès d'eau (inondations, crues soudaines), les sociétés sont confrontées à de graves défis posés par les pénuries d'eau et en particulier par la rareté de la ressource en eau de surface mobilisable, problèmes aggravés tout à la fois par l'augmentation des besoins et par les changements globaux. Les effets du changement climatique sur la ressource en eau sont déjà identifiés à différentes échelles : risques de débits plus faibles et d'étiages plus fréquents, réduction des stocks d'eau solide (manteau neigeux, glaciers), impact majeur sur les disponibilités en eau pour l'agriculture (FAO 2011³), pour la production d'eau potable et pour l'usage industriel de l'eau.

La réduction des dommages liés aux extrêmes hydrologiques est un enjeu crucial tant à l'échelle mondiale qu'à l'échelle locale. Ainsi, à des niveaux supranationaux, comme en Europe, ou à des échelles plus locales, de nombreuses initiatives œuvrent à la mise en place de mesures appropriées, qu'elles soient structurelles ou non.

3.2 Les mesures face au risque de pénurie d'eau

La Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) du 23 octobre 2000 a fixé une politique et des objectifs communs aux États membres afin d'atteindre un « bon état qualitatif et quantitatif des milieux aquatiques » superficiels et souterrains en 2015. Elle a été transposée en droit français par la loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006, dite Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) qui a renforcé la gestion de la ressource en eau déjà préexistante en France au niveau des SDAGE (schéma directeurs d'aménagement et de gestion des eaux) et des SAGE (Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux) mis en place par la loi sur l'eau n°92-3 du 3 janvier 1992.

¹ WMO (2004) Flood forecasting initiative. <http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/FloodForecastingInitiative.php>

² http://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/IPCC_WG2AR5_SPM_Approved.pdf

³ <http://www.fao.org/docrep/014/i2096e/i2096e.pdf>

Ce cadre législatif et réglementaire a été complété, suite à la sécheresse de 2003, par la mise en place en 2005 à l'échelle nationale d'un Plan Cadre Sécheresse pour permettre une meilleure gestion de la ressource en eau. Quatre niveaux d'intervention ont été définis, basés sur des valeurs d'indices d'étiage, allant de la vigilance à la crise renforcée, pour instaurer différentes restrictions en fonction du stade de sécheresse observée.

3.3 Les mesures face au risque inondation

La directive européenne du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation a été transposée en droit français par l'article 221 de la LENE (loi portant engagement national pour l'environnement) du 12 juillet 2010 et par le décret no 2011-227 du 2 mars 2011, qui modifient le code de l'environnement.

Via différentes étapes déclinées en autant d'outils (EPRI, évaluation préliminaire des risques d'inondation ; identification des TRI, territoires à risque important d'inondation, et élaboration de leurs cartes des surfaces inondables et de leurs cartes des risques d'inondation ; PGRI, plans de gestion des risques d'inondation), cette directive inondations est venue renforcer le dispositif français déjà en place (PPRI, Plan de préventions des risques inondation ; PCS, Plans communaux de sauvegarde ; SDAGE, schéma directeurs d'aménagement et de gestion des eaux).

La prévision opérationnelle des crues est coordonnée en France par le SCHAPI (service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations, créé en 2003), qui s'appuie sur 19 services de prévision des crues. Ce suivi concerne un nombre défini de rivières, totalisant un total d'un peu plus de 22 800 km de linéaire surveillé (suivi consultable sur internet sur : <http://www.vigicrues.gouv.fr/>). Ce dispositif dénommé Vigicrues ne permet pas de suivre les petits cours d'eau, sujets à des crues soudaines, comme cela a été relevés par différentes missions d'inspections : mission du Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) [2008] relative au phénomène de ruissellement urbain ; mission de M. Fournier, sénateur du Gard et maire de Nîmes [2008] portant sur l'analyse des moyens de prévision et de prévention des inondations liées à des phénomènes de ruissellement urbain ; rapport CGEDD/IGA [2010] de retour d'expériences des inondations survenues dans le département du Var les 15 et 16 juin 2010.

En réponse aux limites identifiées et suite aux inondations du Var de juin 2010 ainsi qu'à la tempête Xynthia à l'origine d'importantes submersions marines sur le littoral atlantique, l'État a publié en 2011 le plan inter-gouvernemental dit « plan submersions rapides » ou PSR⁴. Une des composantes de ce plan a consisté à déployer l'outil Vigicrues Flash dédié à l'anticipation des crues sur 30 000 km de cours d'eau non couverts par le dispositif Vigicrue.

Enfin, dans le double contexte de la directive cadre sur l'eau et de la directive inondations aux objectifs desquels – gestion équilibrée de la ressource en eau et de gestion intégrée des bassins hydrographiques – concourent à la fois les SDAGE et les PGRI, la loi de modernisation de l'action publique territoriale et l'affirmation des métropoles (MAPTAM) du 27 janvier 2014 a attribué au bloc communal⁵ une compétence exclusive et obligatoire relative à la gestion des milieux aquatiques et à la prévention des inondations (GEMAPI).

⁴ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-Plan-Submersions-Rapides,21330.html>

⁵ Communes ou EPCI à fiscalité propre auxquels les communes sont rattachées

Article 4 : L'approche par modélisation

Pour répondre aux enjeux posés par les extrêmes hydrologiques, l'équipe RHAX propose des approches basées sur la modélisation des processus à l'œuvre dans la transformation de la pluie en débit et sur la régionalisation de ces modélisations afin de caractériser le risque hydrologique en tout point du territoire et en particulier sur les bassins versants non jaugés. Les modélisations hydrologiques développées par l'équipe RHAX sont des modélisations distribuées régionalisées :

- soit continue pour la modélisation de chroniques de débits,
- soit fréquentielle pour la connaissance des extrêmes hydrologiques.

Ces modélisations hydrologiques sont associées à des modélisations hydrauliques permettant par exemple la transformation des débits en champs d'inondation ou en niveau de remplissage de réservoir de barrage, ainsi qu'à l'estimation de l'impact des aléas hydrologiques sur la société. L'objectif est de fournir des connaissances du risque hydrologique (excès et pénurie) en tout point d'un territoire et donc en milieux non jaugés, par le biais d'une modélisation intégrée depuis les entrées pluviométriques, observées et prévues, jusqu'aux impacts sur les territoires.

Différents types de modèles hydrologiques et hydrauliques sont développés et mis en œuvre : conceptuels/à base physique, hydrologiques globaux/semi-distribués et distribués, hydrauliques 1D et 2D. Quelle que soit la thématique étudiée (crues ou ressource), le caractère parcimonieux des modèles est recherché afin de faciliter l'étape de régionalisation des paramètres. Cette régionalisation est menée à résolution spatiale fine. Les pas de temps couverts vont du mensuel à l'infra-horaire, les échelles spatiales de modélisation pour les modèles distribués sont kilométriques et infra-kilométriques ; et le mode de mise en œuvre temporel est soit événementiel soit continu.

Cette approche par modélisation est enrichie par des travaux portant sur la représentation des incertitudes de prévision ainsi que sur la correction des états et sorties des modèles par le biais de l'assimilation de données temps réel (notamment débit) et de techniques d'intelligence artificielle.

Ces axes de recherche sont déclinés au sein de l'équipe RHAX dans différentes actions en cours de développement ou dont le développement est envisagé dans les prochaines années :

- la prédétermination des pluies et des débits de crue avec les méthodes SCHYPRE – SHYREG-GRAFFAS (Arnaud et Lavabre, 2002, Cantet et al, 2025, Arnaud and Cantet, 2026),
- la prédétermination des débits d'étiage avec la méthode LOIEAU (Folton et Arnaud, 2020),
- la modélisation continue des débits avec la plateforme SMASH (Spatially distributed modelling and assimilation for hydrology, Colleoni et al, 2022) permettant l'anticipation des débits de crue et la formulation d'avertissements de crue, et, à terme, la prévision des champs d'inondation, l'anticipation des impacts des inondations, la prévision saisonnière des débits d'étiage, ...
- l'étude de l'impact des changements globaux (changement climatique, modification de l'occupation des sols, ...) sur les extrêmes hydrologiques ...

Ces dernières années, les demandes pour les mises en œuvre opérationnelles et l'amélioration des méthodes développées par l'équipe RHAX d'INRAE ont porté sur plusieurs points :

- descentes d'échelles temporelle et spatiale,
- extension du réseau de cours d'eau éligibles au dispositif Vigicrues Flash dans lequel est implémenté la modélisation hydrologique SMASH,
- étude des impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques,
- assimilation de données multi-sources.

Les objectifs convergents de modélisation en site non jaugé et de régionalisation des paramètres des modèles en tout point du territoire, poursuivis par les méthodes d'anticipation des crues (Javelle et al., 2014 ; Fouchier et al., 2017) et le modèle LOIEAU (Folton et Arnaud, 2020) ont incité à faire

converger leurs modélisations respectives et mettre en commun leurs procédures de calage et de régionalisation. Cette convergence a été permise par le développement récent de la plateforme SMASH de modélisation et d'assimilation de données (Colleoni et al, 2022). Cette plateforme de modélisation-assimilation hydrologique flexible permet la comparaison de différentes architectures de modélisation, différentes méthodes de calage plus ou moins complexes dont le calage distribué par méthode variationnelle, applicable directement à la problématique du "non-jaugé".

Par ailleurs, des applications hors France des approches par modélisations distribuées régionalisées développées au sein de l'équipe peuvent être envisagées, en s'appuyant des bases de données mondiales (descripteurs de surface, du sous-sol, données satellites climatiques et de surface, données de débits) .

De par sa taille, l'équipe RHAX d'INRAE, ne peut faire face seule aux demandes croissantes d'amélioration, d'application, totale ou partielle, et de suivi de ses méthodes sur des domaines nouveaux ou existants.

Par la suite,

- « Projet » désignera l'assistance à la mise en œuvre d'approches distribuées et régionalisées utilisées dans les méthodes développées par l'équipe RHAX d'INRAE (SCHYPRE-SHYREG-GRAFFAS, LOIEAU, SMASH, leurs variantes et méthodes similaires qui viendraient à être développées par l'équipe RHAX ...) ;
- « Méthode » désignera l'une des méthodes développées par l'équipe RHAX d'INRAE (SCHYPRE-SHYREG-GRAFFAS, LOIEAU, SMASH leurs variantes et méthodes similaires qui viendraient à être développées par l'équipe RHAX ...) ou toutes les méthodes à la fois ;
- « utilisateur » désignera un client actuel ou futur d'INRAE (service opérationnel, collectivité, région ou Etat) souhaitant la mise en œuvre de la Méthode ;
- « domaine » désignera le domaine spécifique sur lequel l'utilisateur souhaite la mise en œuvre de la Méthode. Il pourra s'agir aussi bien d'un domaine géographique déjà traité mais nécessitant des améliorations, ou bien d'un nouveau domaine géographique, jamais traité auparavant par l'équipe RHAX d'INRAE.

Article 5 : Objet de l'accord-cadre

L'objet du présent accord-cadre est une **prestation d'assistance pour la mise en œuvre d'approches distribuées et régionalisées utilisées dans les méthodes développées par l'équipe RHAX – Unité RECOVER – Centre INRAE PACA.**

Article 6 : Prestations attendues

À chaque nouvelle mise en œuvre du Projet, les prestations attendues relèveront des 4 types suivants :

- type 1 : « données »,
- type 2 : « applications »,
- type 3 : « développements »
- type 4 : « réunions ».

Type 1 :

Les actions de ce type visent à la constitution du jeu de données utilisé dans la suite de l'étude, pour les actions d'applications et de développements de la Méthode, ainsi qu'à l'analyse de ces données. Ces données sont relatives au domaine étudié et sont de trois types :

- données descriptives des bassins versants (par exemple : délimitations, directions d'écoulement ...) et du domaine d'étude (caractéristiques physiques, occupation du sol, pédologie, géologie, directions d'écoulement ...) ;
- mesures temporelles ponctuelles (hauteur d'eau, débits, cumul de pluie, température, humidité du sol, neige à des stations de mesure, piézométrie, données de prélèvements en eau, ...)
- données temporelles sous forme de grilles raster (par exemple : pluie observée ou modélisée ou prévue, température, évapotranspiration, humidité du sol, réserves utiles en eau,...).

Ces données doivent être assemblées, formatées, vérifiées, et pour certaines élaborées à partir d'autres données. Ces données doivent également être régulièrement mises à jour et archivées.

Les actions de type 1 sont optionnelles si l'on souhaite appliquer les méthodes sur un jeu de données déjà existants.

Type 2 :

Les actions de ce type concernent les applications de la Méthode sur un jeu de données d'entrée déjà constitué, ainsi qu'à l'analyse des résultats obtenus. Deux sortes d'application sont envisagées : les applications de calage-optimisation et les applications de simulation directe.

Les applications de calage-optimisation visent à définir dans quelles conditions la Méthode doit être appliquée pour que ses résultats soient optimaux sur le domaine étudié. Les événements présents dans le jeu de données sont rejoués par la Méthode, dont les sorties sont évaluées en les comparant aux valeurs issues des observations (par exemples chroniques observées ou métriques issues des observations comme des quantiles ajustés localement ou des signatures hydrologiques). Durant cette étape, les paramètres de la Méthode sont soit d'abord optimisés localement (c'est-à-dire pour chaque station de mesure disponible) puis régionalisés (c'est-à-dire pour une application en n'importe quel point du domaine étudié) soit directement calés de manière régionale (imbrication des procédures de calibration et de régionalisation). La détermination des meilleurs jeux de paramètres se fait par différents algorithmes de calage, soit uniformes, soit distribués, qui permettent d'explorer le champ des possibles. La régionalisation se fait soit en croisant les paramètres optimaux issus d'un calage uniforme avec des descripteurs terrain (par exemple : occupation du sol, géologie, paramètres disponibles sur bassins voisins), de manière à établir des relations entre les paramètres de la Méthode et ces descripteurs terrain (phase dite de « régionalisation ») soit par l'intermédiaire de contraintes introduites dans le calage variationnel permettant la réalisation d'un calage-régionalisation. Au cours de cette étape, plusieurs variantes de la Méthode pourront être testées, dans le but d'obtenir les meilleurs résultats.

Les applications de simulation directe visent à mettre en œuvre la Méthode à l'aide des paramètres calés sur le domaine étudié et à partir d'un jeu de données d'entrée déjà constitué.

Type 3 :

Les actions de ce type ont pour but le transfert dans un cadre appliqué et/ou opérationnel de la Méthode, dont les modalités de mise en œuvre auront été définies grâce aux actions de type 2, ainsi que le développement de nouveaux outils destinés à enrichir la mise en œuvre appliquée et/ou opérationnelle de la Méthode. On entend ici, contrairement aux actions de type 2, des développements pour un fonctionnement en temps réel, en mode prévision sur des événements à venir, de la Méthode et pour un fonctionnement en temps réel des interfaces de consultation de résultats

générés par la Méthode (quantiles, signatures hydrologiques ...). Ces développements seront instantanément transférables par l'utilisateur dans son propre système. Ces développements comprennent entre autres les tâches suivantes :

- définition des entrées et sorties des codes de calcul ou des interfaces de consultation, pour que ceux-ci soient compatibles avec le système de l'utilisateur (définition des formats de fichier, des chemins d'accès, du mode de lancement des calculs, de la synchronicité des tâches à effectuer) ;
- programmation des codes chargés des calculs temps réel et des interfaces chargés de la consultation en temps réel ;
- suivi des codes de calcul et des interfaces de consultation, en phase post-programmation, afin de permettre leur mise à jour,
- mise en place de démonstrateurs sur des applications possibles de la Méthode.

Il est à noter les prestations de cet accord-cadre n'incluent pas la livraison d'outils d'envoi d'avertissements ni de prestation de pupitrage et du suivi H24 qui sont du ressort de l'utilisateur.

Pour la description détaillée de chacun de ces différents types d'actions (livrables à fournir et unités d'œuvre correspondantes), on se reportera à l'Annexe 2 de l'acte d'engagement.

Type 4 :

Les actions de ce type sont les réunions de suivi du Projet. À chaque nouveau Projet, un comité de suivi sera constitué comprenant, a minima, un représentant d'INRAE, un représentant de l'utilisateur le cas échéant, et le titulaire.

Des réunions, à l'initiative d'INRAE seront régulièrement programmées. Celles-ci auront lieu sur les sites d'INRAE ou par téléconférence. Il n'y aura pas de réunions à l'étranger, autrement que par téléconférence. La fréquence de ces réunions sera a priori mensuelle, incluant une réunion de démarrage à chaque projet et de restitution de fin de projet.

Le titulaire sera chargé d'établir l'ordre du jour qui sera envoyé au moins 3 jours francs avant la réunion à INRAE pour validation. Le compte rendu de la réunion est établi par le titulaire dans un délai de 5 jours à l'issue de la réunion. Il est envoyé à INRAE qui dispose d'un délai de 3 jours pour le valider. À défaut de réponse expresse, le compte rendu est réputé validé.

Le titulaire devra également se charger de la préparation des supports de présentation nécessaires à la réunion, tels que diaporamas ou des notes explicatives le cas échéant.

Article 4 : Vérification et validation des prestations

La vérification et la validations des prestations se fera selon les conditions énoncées à l'article 7.3 du CCAP.

Références bibliographiques :

Arnaud P., Lavabre J., 2002. Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation. *Water Resources Research* 38, 1075–1085.

Arnaud, P., Cantet P., 2026. A stochastic model of continuous hourly areal rainfall series applied to a wide range of French cathments. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. DOI: 10.1007/s00477-026-03310-2

Cantet, P., Renard, B., Fine, J. A., and Arnaud, P.: Space-Time Simulation of Hourly Rainfall From Areal Statistics Accounting for Spatial Heterogeneity and Anisotropy, *Water Resources Research*, 61, e2024WR038562, <https://doi.org/10.1029/2024WR038562>, 2025.

Colleoni, F., Garambois, P.-A., Javelle, P., Jay-Allemand, M., and Arnaud, P. Adjoint-based spatially distributed calibration of a grid GR-based parsimonious hydrological model over 312 French catchments with SMASH platform, EGU sphere [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-506>, 2022

Folton, N., Arnaud, P., 2020. Water resource indicators estimated by regionalized daily rainfall-runoff model: LoiEau Web Database. *Houille Blanche-Rev. Int.* 22–29. <https://doi.org/10.1051/lhb/2020034>

Fouchier C., Saint Martin C., Javelle P., Meriaux P., Organde D. (2017). Mises en œuvre opérationnelles de la méthode AIGA pour anticiper les crues sur les cours d'eau non surveillés. *Irstea, Sciences Eaux & Territoires*, n°23, pp.48-55.

Javelle P., Demargne J., Defrance D., Pansu J., Arnaud P. (2014). Évaluation des avertissements de crue soudaines à des sites non jaugés en utilisant des campagnes post-événement : une application avec le système d'avertissement AIGA. Evaluating flash-flood warnings at ungauged locations using post-event surveys: a case study with the AIGA warning system. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 59(7): p. 1390-1402.