



HAL
open science

Le programme HYMEX – Connaissances et prévision des pluies intenses et crues rapides en région méditerranéenne

Véronique Ducrocq, Brice Boudevillain, Christophe Bouvier, Isabelle Braud,
Nadia Fourrie, Cindy Lebeaupin-Brossier, Pierre Javelle, Olivier Nuissier,
Olivier Payrastre, Hélène Roux, et al.

► To cite this version:

Véronique Ducrocq, Brice Boudevillain, Christophe Bouvier, Isabelle Braud, Nadia Fourrie, et al..
Le programme HYMEX – Connaissances et prévision des pluies intenses et crues rapides en ré-
gion méditerranéenne. La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 2019, 3-4, pp.5-12.
10.1051/lhb/2019048 . hal-02369515

HAL Id: hal-02369515

<https://hal.science/hal-02369515v1>

Submitted on 9 Apr 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License



Open Archive Toulouse Archive Ouverte


OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an publisher's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/25759>

Official URL:

<https://doi.org/10.1051/lhb/2019048>

To cite this version:

Ducrocq, Véronique and Boudevillain, Brice and Bouvier, Christophe and Braud, Isabelle and Fourrié, Nadia and Lebeaupin-Brossier, Cindy and Javelle, Pierre and Nuissier, Olivier and Payrastra, Olivier and Roux, Hélène  and Ruin, Isabelle and Vincendon, Béatrice *Le programme HYMEX – Connaissances et prévision des pluies intenses et crues rapides en région méditerranéenne*. (2019) La Houille Blanche (3-4). 5-12. ISSN 0018-6368

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

ARTICLE DE RECHERCHE / RESEARCH ARTICLE

Le programme HYMEX – Connaissances et prévision des pluies intenses et crues rapides en région méditerranéenne

Véronique Ducrocq^{1,*}, Brice Boudevillain², Christophe Bouvier³, Isabelle Braud⁴, Nadia Fourrie¹, Cindy Lebeau-pin-Brossier¹, Pierre Javelle⁵, Olivier Nuissier¹, Olivier Payrastra⁶, Hélène Roux⁷, Isabelle Ruin² et Béatrice Vincendon⁸

¹ CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, 42 avenue Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 01, France

² IGE, UMR5001/UR252, CNRS, Grenoble INP, IRD, et UGA, CS 40 700, 38058 Grenoble Cedex 9, France

³ HSM, UMR 5569 CNRS-IRD-UM, Université Montpellier, CC 57, 163 rue Auguste Broussonnet, 34090 Montpellier, France

⁴ IRSTEA Lyon, Unité de recherche RiverLy, 5 rue de la Doua, CS 20244, 69625 Villeurbanne Cedex, France

⁵ IRSTEA Aix, Unité de recherche RECOVER, 3275 route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5, France

⁶ IFSTAR, Centre de Nantes, route de Bouaye CS4, 44344 Bouguenais Cedex, France

⁷ IMFT, UMR5502, CNRS-INP Toulouse-Université de Toulouse 3, 2 allée du Professeur Camille Soula, 31400 Toulouse, France

⁸ Direction de la climatologie et des services climatiques, Météo-France, 42 avenue Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 01, France

Reçu le 25 janvier 2018 / Accepté le 26 septembre 2018

Résumé – Le programme international de recherche HyMeX (Hydrological cycle in the Mediterranean eXperiment, www.hymex.org), composante du chantier multi-organisme MISTRALS lancé pour 10 ans en 2010, a pour objectif de progresser dans la compréhension du cycle de l'eau en Méditerranée, et notamment d'améliorer les connaissances et la prévision des risques hydrométéorologiques. L'étude et la prévision des épisodes de pluies intenses et crues rapides qui affectent régulièrement le pourtour méditerranéen sont au cœur du programme HyMeX. Après une présentation de la stratégie générale d'observations qui a combiné campagnes de mesures, renforcement d'observations pendant plusieurs automnes et collectes de données socio-hydrologiques après les événements majeurs qu'a connus la région sur la période, une revue d'ensemble des avancées scientifiques réalisées depuis le lancement d'HyMeX est proposée tant en termes de connaissances et modélisation des épisodes méditerranéens de pluie intense et de leurs impacts, qu'en termes d'évaluation et amélioration des méthodes et systèmes de prévision, et plus particulièrement les systèmes de prévision d'ensemble hydrométéorologiques à courte échéance basés sur le modèle de prévision météorologique AROME de Météo-France.

Mots clés : pluie intense / crue rapide / méditerranée / prévision / observations

Abstract – **HyMeX – Advances in understanding and forecasting of heavy precipitation and flash floods in the Mediterranean.** The HyMeX international research project (Hydrological cycle in the Mediterranean eXperiment, www.hymex.org), as part of the multi-agency MISTRALS program launched in 2010 for a 10-y period, aims at advancing our understanding of the water cycle in the Mediterranean, and in particular to improve knowledge and forecasting of hydrometeorological risks. At the heart of the HyMeX project, are the study and forecasting of heavy precipitation and flash flood events that regularly affect the Mediterranean region. After a presentation of the general observation strategy which combined research field campaigns, reinforcement of observations during several autumns and collections of socio-hydrological data after the major events in the region during the period, an overall review of the scientific advances made since the launch of HyMeX is given both in terms of knowledge and modelling of Mediterranean episodes of intense rainfall and their impacts, and in terms of evaluation and improvement of forecasting methods and systems, in particular short-term hydrometeorological ensemble forecasting systems based on the numerical weather prediction model AROME of Météo-France.

Keywords: heavy precipitation / flash-flood / Mediterranean / forecasting / observations

*Correspondance : veronique.ducrocq@meteo.fr

1 Introduction

Le programme international de recherche HyMeX (Drobinski *et al.*, 2014) vise à progresser dans la compréhension du cycle de l'eau en Méditerranée et des événements hydro-météorologiques à forts impacts associés, tant en termes de prévisibilité, d'évolution avec le changement climatique que de vulnérabilité socio-économique et de capacité d'adaptation des territoires et des populations face à ces événements extrêmes. HyMeX est à la fois, un programme de recherche interdisciplinaire qui implique des chercheurs dans les domaines de la météorologie, du climat, de l'océanographie physique, de l'hydrologie, et des sciences humaines et sociales, et un programme à visées importantes de transfert vers les services opérationnels de prévision météorologique et hydrologique (e. g. Météo-France, SCHAPI/SPC). HyMeX est une composante du chantier multi-organisme MISTRALS¹ lancé en 2010 qui vise à fédérer les recherches et renforcer les collaborations internationales en Méditerranée.

Le plan scientifique international du programme HyMeX a été organisé autour de cinq grandes thématiques : (1) « Le bilan en eau de la mer Méditerranée » qui pilote la circulation océanique en Méditerranée ; (2) « Le cycle hydrologique continental », avec un intérêt particulier pour les sécheresses et les ressources en eau ; (3) « Les épisodes de pluies intenses et crues rapides », qui affectent régulièrement le pourtour méditerranéen en particulier à l'automne ; (4) « Les échanges air-mer intenses et la formation d'eaux denses » en fin d'hiver dans les régions soumises à des vents régionaux forts (Mistral, Tramontane, Bora,...) ; (5) « La vulnérabilité et la capacité d'adaptation » des territoires et populations exposés aux événements hydrométéorologiques sévères. La présentation se focalise ici sur la thématique « pluies intenses et crues rapides » qui est une thématique particulièrement développée au sein d'HyMeX et des projets ANR associés (MEDUP², IODAMED³, FLOODSCALE⁴, MOBICLIMEX⁵, MUSIC⁶, PICS⁷). La stratégie d'observation générale d'HyMeX est d'abord décrite, puis très brièvement sont présentés les principaux résultats sur la connaissance des processus impliqués dans la formation des épisodes de pluie intense et crues rapides, ainsi que sur leurs modélisation et observation. Les avancées en termes de réduction et quantification des

incertitudes de la prévision des pluies intenses et des crues rapides réalisées au cours des dernières années sont décrites dans la section 4, et la section 5 présente les travaux en cours sur la prévision intégrée des précipitations jusqu'aux impacts.

2 Les campagnes de mesures et les observations long terme

La stratégie d'observation d'HyMeX repose sur trois niveaux imbriqués de périodes d'observations avec des objectifs propres à chacun :

- **SOP (Special Observation Period)**. Il s'agit de campagnes de mesures intensives de quelques mois avec le déploiement de moyens de recherche instrumentés sur le terrain, mobiles pour certains, afin d'observer un phénomène spécifique sur une région ciblée. En particulier, la SOP1 à l'automne 2012 a été dédiée aux événements méditerranéens de pluie intense et crue rapide (Ducrocq *et al.*, 2014). De nombreux moyens d'observation (avions, navires, ballons, radiosondages, gliders, bouées et flotteurs, radars, profileurs de vent, etc.) ont été déployés sur les régions terrestres et marines du pourtour méditerranéen de Valence en Espagne au nord-est de l'Italie afin de documenter simultanément les trois compartiments terrestres (atmosphère, mer, bassins versants) ;
- **EOP (Enhanced Observation Period)**. Ce niveau vise à renforcer, par des mesures sur alerte ou temporaires, les réseaux d'observations opérationnels ou les observatoires de recherche plusieurs années de suite. Le niveau EOP s'est révélé être bien adapté à l'observation des événements rares, comme par exemple des événements de crues rapides sur des bassins versants ciblés. Une stratégie multi-échelle a en effet été mise en œuvre tous les automnes de 2012 à 2015 (Braud *et al.*, 2014) sur deux bassins de méso-échelle des Cévennes – le Gard et l'Ardèche – renforçant l'instrumentation déployée dans le cadre de l'Observatoire hydrométéorologique méditerranéen Cévennes-Vivarais (OHM-CV). Trois échelles spatiales ont été considérées : (1) le versant pour la documentation des processus ; (2) l'échelle du petit bassin (1–100 km²) pour la description de la variabilité spatiale des paysages et des réponses hydrologiques ; et (3) l'échelle du bassin de méso-échelle (100–2000 km²) pertinente pour la gestion et la prévision. Ces observations ont combiné des mesures en continu sur quatre ans (pluie, hauteur d'eau, débits, humidité des sols) et des mesures sur alerte durant les quatre automnes du projet : jaugeages en crue, échantillonnage de l'humidité des sols, échantillonnages géochimiques. Des mesures sur alerte ont ainsi été effectuées pendant tous les épisodes majeurs de crue sur ces bassins survenus pendant les automnes de 2012 à 2015 ;
- **LOP (Long Observation Period)**. La période d'observation longue s'étend sur toute la durée du programme. Elle consiste à faciliter l'accès aux données des réseaux opérationnels et des observatoires de recherche ; certains réseaux ont été renforcés ponctuellement par l'ajout de capteurs ou d'instruments. Également dans le cadre de la LOP, des relevés hydrologiques sur le terrain ont été organisés après les événements de pluies intenses et de crues éclair les plus remarquables (Payrastré *et al.*, 2012 ;

¹ MISTRALS – Mediterranean Integrated Studies at Regional and Local Scales (www.mistrals-home.org).

² MEDUP – Forecast and projection in climate scenario of Mediterranean intense events: uncertainties and propagation on environment (2008–2011).

³ IODA-MED – Innovative Observing and Data Assimilation Systems for severe weather events in the Mediterranean (2011–2015).

⁴ FLOODSCALE – Multi-scale hydrometeorological observation and modelling for flash floods understanding and simulation (2012–2016), <https://floodscale.irstea.fr/>.

⁵ MOBICLIMEX – Dynamique des mobilités quotidiennes et résidentielles face aux extrêmes hydrométéorologiques en contexte de changement climatique (2013–2017).

⁶ MUSIC – Multiscale process studies of intense convective precipitation events in Mediterranean (2014–2018).

⁷ PICS – Prévision immédiate Intégrée des Impacts des Crues Soudaines (2018–2021).

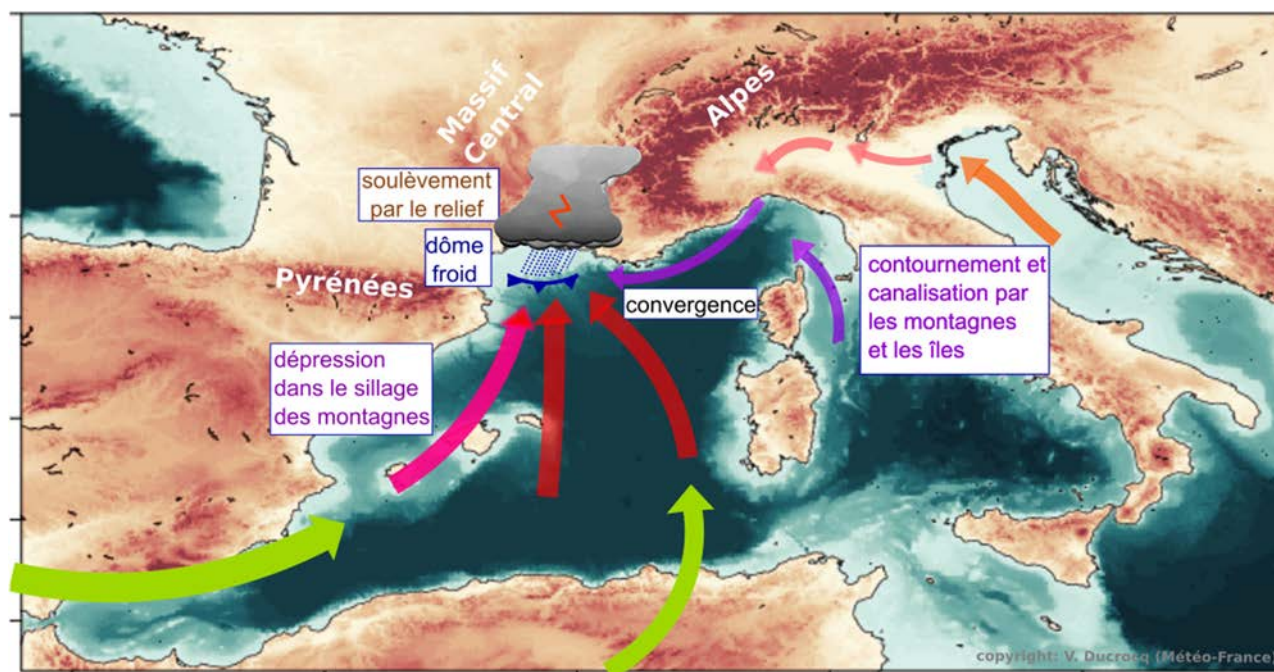


Fig. 1. Principaux forçages de basses couches intervenant dans la formation des systèmes fortement précipitants en Méditerranée nord-occidentale. D'après Ducrocq *et al.* (2016).

Payrastré, 2015 ; Lebouc et Payrastré, 2017 ; Brunet *et al.*, 2018). Ces relevés ont permis de reconstituer des informations détaillées sur les débits de pointe des petits cours d'eau non instrumentés lors de ces crues (plus de 160 estimations réalisées pour le seul territoire français suite à 6 épisodes remarquables). Ces enquêtes hydrologiques ont été combinées à des entretiens semi-directifs sociologiques sur la perception et le comportement des citoyens en matière d'adaptation des mobilités et de mise en protection (Ruin *et al.*, 2014). Un suivi en continu a également été mis en place via un questionnaire en ligne depuis l'automne 2014.

Le dispositif sur alerte a nécessité l'organisation d'une veille météorologique en continu pendant les SOPs et l'EOP, grandement facilité par la mise à disposition en temps réel de nombreux produits (observations et prévisions) de Météo-France sur le site de campagnes (sop.hymex.org), ainsi que la participation de prévisionnistes de Météo-France pendant la SOP1. Une version dédiée du modèle AROME de Météo-France a aussi été mise en œuvre en temps réel sur les deux premières SOP afin de fournir des prévisions météorologiques sur toute la Méditerranée occidentale (Fourrié *et al.*, 2015).

3 Amélioration des connaissances et de la modélisation

3.1 Précipitations intenses

La réalisation de climatologies de situations de pluie intense combinant réanalyses atmosphériques et observations ont permis de synthétiser les caractéristiques à l'échelle synoptique et à méso-échelle des situations météorologiques propices aux événements de pluie intense dans le Sud de la France (*e.g.* Ricard *et al.*, 2012). L'étude des périodes

d'observations intensives (POI) de la SOP1 (Ducrocq *et al.*, 2016), ainsi que de situations hors SOP1 (inondations de Draguignan en 2010 et de Gênes en 2011 par exemple), a permis de progresser dans l'identification et la compréhension des mécanismes complexes impliqués dans la formation des épisodes méditerranéens. L'interaction de la circulation en basses couches avec les reliefs de tout le pourtour méditerranéen est un élément clé dans ces situations. Même si cette interaction dépend des configurations de la topographie locale, les différents cas étudiés sur les Cévennes, le Var et les Alpes Maritimes, en Corse, en Ligurie-Toscane, sur le nord-est de l'Italie ou encore la côte est de l'Espagne, présentent des caractéristiques communes (Fig. 1). En plus du mécanisme de soulèvement direct du flux humide et instable de basses couches lors de sa rencontre avec la chaîne montagneuse, ces études de cas mettent fréquemment en évidence d'autres sources de soulèvement, comme : (i) des lignes de convergence, bien souvent sur mer, induites par l'interaction de la circulation de basses couches avec le relief ou résultant d'un forçage synoptique de plus grande échelle ; (ii) un dôme d'air froid en basses couches, induit le plus souvent par l'évaporation des précipitations du système orageux ; (iii) des circulations induites par les reliefs et les îles de la région comme les vents de barrière et la canalisation du flux dans les vallées. L'occurrence et la combinaison de ces différents mécanismes dépendent à la fois des caractéristiques dynamiques et thermodynamiques de l'environnement sur toute la Méditerranée occidentale et de l'interaction des systèmes orageux avec cet environnement à méso-échelle.

Des progrès ont aussi été réalisés sur les techniques d'observation et de fusion de données, avec la mise au point de nouvelles méthodes et la réalisation de validation croisée entre les différents systèmes d'observation déployés. En particulier, une nouvelle méthode de fusion de données pluviométriques et

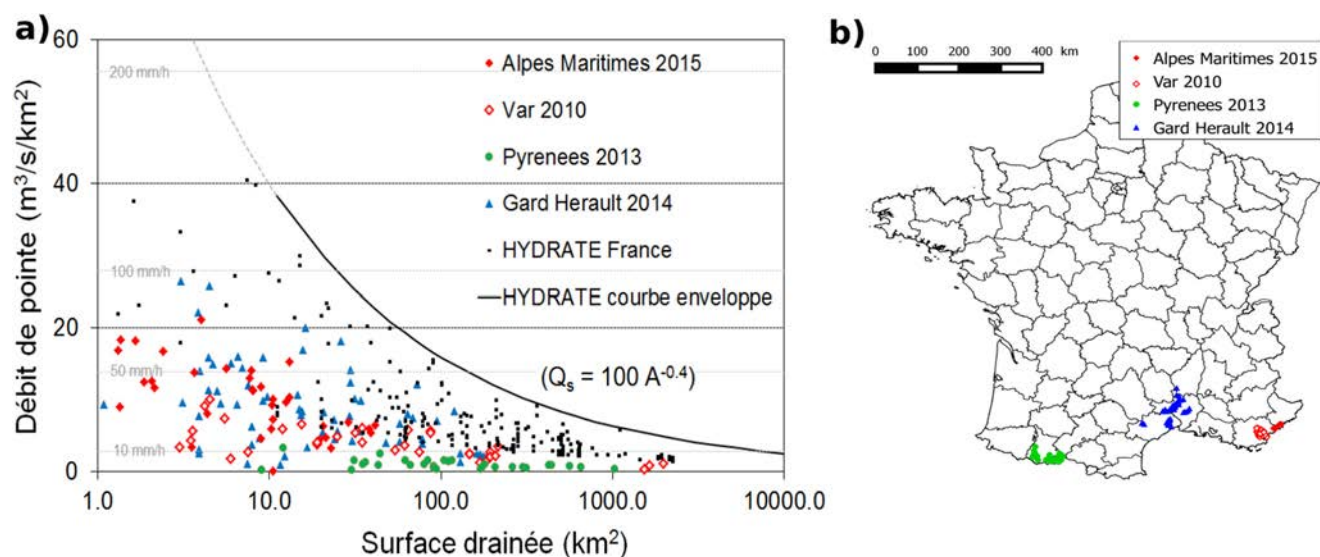


Fig. 2. a) Comparaison des débits estimés en France lors des enquêtes post crue HyMeX, avec les données de débits collectées en France lors du projet européen Hydrate (inventaire des plus fortes crues-éclair connues sur les 50 dernières années, réalisé en 2009 à l'échelle Européenne (Gaume *et al.*, 2009), et à la courbe enveloppe Européenne établie lors du même projet. b) Localisation des enquêtes post crue HyMeX (Alpes maritimes en 2015, Gard-Hérault en 2014, Pyrénées en 2013, Var en 2010).

radar a été proposée et mise en œuvre pour l'établissement de réanalyses pluviométriques améliorant l'estimation de la pluie et l'enrichissant d'une information sur l'erreur associée, et ce, à des échelles d'espace et de temps fines (1 km^2 , 1 h sur les principaux événements en Cévennes-Vivarais depuis 2000) (Delrieu *et al.*, 2014; Boudevillain *et al.*, 2016).

Les observations de la SOP1 servent aussi à valider et améliorer la modélisation des précipitations aux résolutions kilométriques et hectométriques, avec notamment la mise au point de nouvelles paramétrisations physiques des modèles atmosphériques en termes de représentation des processus microphysiques et de la turbulence.

3.2 Crues rapides

L'analyse des observations recueillies, combinée à une modélisation à échelle fine, ont permis de progresser sur les questions de changement d'échelle et de prédiction en bassins non jaugés. Ces deux problématiques sont particulièrement pertinentes pour les crues rapides qui affectent souvent de petits bassins sans mesure des débits et peuvent concerner de larges étendues, nécessitant une compréhension et une modélisation à échelle fine et sur de vastes territoires. En particulier, différentes méthodes de mesures sans contact des débits en crue (radars de vitesse, méthode LS-PIV⁸, exploitation de vidéos sur YouTube) ont été mises au point et validées (*e.g.* Le Boursicaud *et al.*, 2016; Welber *et al.*, 2016). Ces mesures, qui permettent de documenter les débits de crue, améliorent la qualité des courbes de tarage et diminuent l'incertitude sur les débits. Ces estimations sont réalisées par un outil bayésien appelé BaRatin (Le Coz *et al.*, 2014), disponible pour les services opérationnels. Une méthode permet aussi de propager aux hydrogrammes, les erreurs sur la courbe de tarage et la mesure de hauteur

(Horner *et al.*, 2018). L'impact important de la géologie sur la différenciation des réponses hydrologiques, notamment en crue, et de la forte capacité de stockage des horizons de roches altérées (notamment les karsts) ont été mis en évidence (Vannier *et al.*, 2016), et ont été confirmés à plusieurs reprises par les relevés hydrologiques post-crue (*e.g.* Payrastré *et al.*, 2012; Brunet et Bouvier, 2017). Les flux de sub-surface ont été quantifiés, notamment grâce aux essais sur versants sous pluie artificielle ou naturelle et aux analyses géochimiques réalisées (Bouvier *et al.*, 2018). Différents outils de modélisation ont été produits ou améliorés, entre autres pour les bassins versants français: modèle M7 dans la plateforme ATHYS, modèle CVN dans la plateforme LIQUID[®], modèle SIMPLEFLOOD dans la plateforme JAMS, modèle MARINE, modèle ISBA-TOP dans la plateforme SURFEX, générateur stochastique de champs de pluie SAMPO⁹.

Les relevés hydrologiques post-crue ont également permis de consolider la position des courbes enveloppes des débits en région méditerranéenne, et de confirmer la présence de fortes hétérogénéités régionales de ces débits de crues, les valeurs les plus importantes restant observées dans le secteur des Cévennes en France (Fig. 2). Des comparaisons avec les débits de la méthode d'avertissement sur les bassins non jaugés AIGA ont également été réalisées, notamment pour l'évènement de juin 2010 dans le Var, confirmant les ordres de grandeurs calculés en temps réels (Javelle *et al.*, 2014).

⁹ L'ensemble des résultats du projet FLOODSCALE est disponible dans le rapport scientifique: Braud I, Andrieu J, Ayrat P-A, Bouvier C, Branger F, Carreau J, Delrieu G, Douvinet J, Freydier R, Leblois E, Le Coz J, Martin Ph, Nord G, Patris N, Perez S, Renard B, Seidel J-L, Vandervaere J-P. 2016. FloodScale: Observation et modélisation hydro-météorologique multi-échelles pour la compréhension et la simulation des crues éclairs, Rapport scientifique final du projet, ANR-2011 BS56 027 01, 149 p., <https://floodscale.irstea.fr/donnees/rapports-finaux-floodscale>.

⁸ Large Scale Particule Image Velocimetry.

Tableau 1. Chaînes opérationnelles de prévision numérique de Météo-France sur l'Europe occidentale basées sur le modèle AROME.

| | Résolution horizontale | Fréquence d'assimilation des observations | Réseaux de prévision et échéances |
|-----------------------------|------------------------|---|--|
| AROME-France déterministe | Avant 2015 : 2,5 km | 3 h | Réseaux : 00UTC,06UTC,12UTC,18UTC, jusque des échéances de +36 h à +42 h |
| | Après 2015 : 1,3 km | 1 h | Réseaux : 00UTC, 03UTC, 06UTC, 12UTC, 18UTC, jusque des échéances de +36 h à +42 h |
| PEARO Ensemble (12 membres) | 2,5 km | 1 h (assimilation par AROME-France) | 09 UTC, 18 UTC, jusque l'échéance +45 h |
| AROME-PI | 1,3 km | 1 h | Prévision toutes les heures jusque 6 heures d'échéance |

3.3 Vulnérabilité, exposition et adaptation aux crues rapides

Les recherches dans cette thématique visent à mieux documenter et comprendre la vulnérabilité des populations et territoires méditerranéens et les stratégies d'adaptation développées pour faire face aux événements météorologiques intenses.

Un premier axe consiste à collecter des données sur les événements extrêmes hydrométéorologiques et les impacts et perturbations socio-économiques à l'échelle des régions ou pays méditerranéens à partir de diverses sources (bases de données nationales et internationales, presse écrite, services opérationnels...), ainsi que des informations sur les comportements individuels à l'échelle d'un événement au moyen d'entretiens semi-directifs sur le terrain réalisées dans le cadre de la LOP, de questionnaires en ligne, ou plus récemment, de l'analyse des réseaux sociaux (Twitter). Pour la France, les événements qui ont été tout particulièrement documentés sont les inondations catastrophiques des 8–9 septembre 2002 dans le Gard, du 10 juin 2010 et 4–6 novembre 2011 dans le Var, de l'automne 2014 dans le Gard et l'Hérault et du 3 octobre 2015 dans la région de Cannes. Ces données sont exploitées pour analyser les réactions des personnes en fonction de l'alerte et de la chronologie de l'évènement hydrométéorologique. À partir des données socio-hydrologiques du cas du Var de juin 2010, il a par exemple été mis en évidence la difficulté de basculer d'une activité quotidienne à des actions de mise en protection (Ruin *et al.*, 2014 ; Durand et Ruin, 2018). Ceci traduit aussi une difficulté à interpréter les signes alarmants dans l'environnement de l'individu lorsque l'alerte officielle est insuffisamment précise. Cette étude montre également que le timing de l'évènement hydrométéorologique, sa sévérité, et l'expérience d'un évènement passé pour l'individu sont des facteurs influençant fortement la capacité des personnes à reconnaître une situation dangereuse et à adapter leurs activités à la situation. Ces enquêtes sur les comportements face à l'alerte ont montré que, même si des améliorations sont notables, le message associé au niveau de vigilance orange ne suffit pas à susciter une prudence généralisée de la part du grand public au contraire du niveau de vigilance rouge. Il s'agit donc maintenant de mieux étudier : i) comment les messages de vigilance et d'alerte actuels sont compris au regard des différentes situations dans lesquels ils surviennent et ; ii)

comment ils pourraient être améliorés sur le plan du fond et de la forme pour susciter des comportements plus avisés. À ce titre l'apport des réseaux sociaux qui jouent déjà un rôle non négligeable en matière de comportements de crise devrait également être pris en compte dans ce type d'étude.

Un second axe de recherche a visé à étudier l'évolution de la vulnérabilité et de l'exposition aux crues rapides sous l'angle des mobilités (Lutoff et Durand, 2018). Le terrain d'étude est le département du Gard, pour lequel ont été analysées : i) la relation, d'une part, entre dynamique résidentielle (occupation des sols) et, d'autre part, l'occurrence d'inondations, l'évolution du cadre réglementaire sur les risques (PPRI entre-autres), et le marché de l'immobilier ; ii) l'exposition des automobilistes Gardois dans leurs trajets quotidiens, sachant qu'environ la moitié des victimes dues aux crues rapides sont des automobilistes. Pour évaluer l'exposition des automobilistes aux crues rapides, une modélisation statistique de la mobilité quotidienne a été développée croisant une information spatiale et dynamique sur les coupures de route par inondation et les trajets quotidiens types des principales catégories de population du département (Shabou *et al.*, 2017).

4 Prévisions météorologiques et hydrologiques

Au sein d'HyMeX, les recherches en France visent essentiellement à améliorer les prévisions de précipitations aux courtes échéances (0–48 h) basée sur le modèle opérationnel AROME de Météo-France (Tab. 1) et à exploiter ces prévisions de précipitations pour forcer des modèles de prévision hydrologique adaptés aux crues rapides.

Globalement, les différents résultats obtenus au sein d'HyMeX, en termes d'impacts de l'assimilation de données et de prévisibilité aux résolutions kilométriques, montrent une sensibilité importante aux conditions initiales. La sensibilité aux paramétrisations physiques du modèle ou à la résolution horizontale (par exemple 500 m par rapport à ~2 km) est moins importante. Les observations dans le flux amont alimentant les systèmes convectifs sont celles qui potentiellement ont le plus d'impact sur la prévision à courte échéance, les observations décrivant les circulations (vent, humidité) à mésoéchelle dans les basses couches au-dessus de la mer sont celles qui apparaissent faire le plus défaut pour contraindre le modèle.

Compte-tenu du rôle de la mer Méditerranée dans ces épisodes de pluie intense, des systèmes couplés océan-atmosphère-vagues-fleuves sont développés afin d'évaluer le bénéfice de tels systèmes pour la prévision des épisodes méditerranéens (*e.g.* Rainaud *et al.*, 2017).

HyMeX a aussi offert un cadre pour le développement de la prévision d'ensemble AROME (Tab. 1) et son évaluation pour la prévision des pluies intenses et des crues rapides. Une des caractéristiques et difficultés pour la définition d'une prévision d'ensemble à ces résolutions est le petit nombre de membres de l'ensemble contraint par la puissance de calcul disponible. La question était donc d'identifier les sources d'incertitudes essentielles à considérer (conditions initiales, conditions aux limites, erreurs de modélisation) et de concevoir des méthodes de perturbations qui permettent d'échantillonner les principales erreurs en une douzaine de réalisations. Un système de prévision d'ensemble basé sur les méthodes de perturbations développées (conditions initiales, conditions aux limites et erreurs de modélisation) et pour un domaine AROME couvrant la Méditerranée nord-occidentale a été mis en œuvre en temps réel pendant la SOP1. Ce système a été comparé au système italien de prévision d'ensemble à la résolution kilométrique (COSMO-H2-EPS) sur la période de la SOP1, avec des scores globalement meilleurs pour la prévision d'ensemble AROME (Nuissier *et al.*, 2016). La haute densité des observations en France, Italie et Espagne disponibles sur la période de la SOP1 a permis d'évaluer la première version du système de prévision d'ensemble AROME sur l'Europe occidentale, telle que mise en œuvre opérationnellement à partir de 2016 (Bouttier *et al.*, 2016). Il a été montré que la prévision d'ensemble AROME était supérieure à la prévision d'ensemble du modèle ARPEGE (PEARP) et à la prévision déterministe du modèle AROME pour la prévision des fortes précipitations. Ces travaux ont aussi montré que la petite taille de l'ensemble était un facteur très limitant pour ces épisodes de pluie extrême. Une augmentation du nombre de membres et de réseaux de la prévision d'ensemble AROME est prévue au cours de l'année 2018 (16 membres par réseaux et 4 réseaux par jour).

Les nouveaux systèmes de prévision d'ensemble à la résolution kilométrique ont été évalués également d'un point de vue hydrologique, en forçant des modèles hydrologiques avec les précipitations prévues par les membres des prévisions d'ensemble météorologiques pour des cas de crue rapide (*e.g.* Vié *et al.*, 2012, Fig. 3). Une méthode de perturbations *a posteriori* des prévisions de précipitation d'AROME a également été conçue (Vincendon *et al.*, 2011). Les perturbations introduites pour produire un ensemble d'une cinquantaine de champs de précipitation échantillonnent la distribution des erreurs en localisation et en intensité du modèle AROME sur les bassins méditerranéens. Le modèle ISBA-TOP a été forcé, en temps réel pendant la SOP1 et en temps différé sur les épisodes de l'automne 2014, d'une part, avec les membres des ensembles de précipitations produit par cette méthode, et, d'autre part, avec les membres de la prévision d'ensemble AROME, pour produire des prévisions d'ensemble des débits jusque 30 heures d'échéance. Les deux méthodes montrent généralement des performances extrêmement proches et la combinaison des deux méthodes conduit à

des scores probabilistes meilleurs que ceux obtenus par les deux méthodes prises séparément sur les cas de l'automne 2014 sur les bassins cévenols. Des méthodes de perturbations des conditions initiales en humidité des sols et des paramètres du modèle ISBA-TOP ont aussi été conçues et évaluées (Edouard *et al.*, 2018)

5 Vers une prévision intégrée des pluies intenses aux impacts

Les progrès réalisés en termes de connaissances et modélisation des phénomènes hydrométéorologiques méditerranéens, ainsi que le cadre multidisciplinaire apporté par HyMeX nous permettent désormais d'aborder des questions transverses à plusieurs domaines scientifiques, comme celles de la prévision intégrée des pluies intenses aux impacts. Une première chaîne de prévision des impacts des crues éclair a été proposée et testée sur deux études de cas dans les bassins versants du Gard et de l'Argens (Le Bihan *et al.*, 2017). Les résultats de cette chaîne ont pu être évalués à partir des emprises inondées réelles et des sinistres d'assurance observés pour les crues de septembre 2002 (Gard) et juin 2010 (Argens). Une base de données géoréférencée a également été constituée sur le sud de la France pour les principaux événements survenus depuis 2011 afin de collecter des données de validation sur les impacts liés aux crues rapide (Saint-Martin *et al.*, 2018a). À partir de ces premiers résultats, le projet ANR PICS a été lancé afin de concevoir et tester de façon plus large des chaînes de prévision immédiate intégrée des impacts des crues soudaines. Le premier maillon de la chaîne de prévision porte sur la prévision immédiate des pluies et des débits, où notamment il s'agira d'évaluer les prévisions opérationnelles de précipitation disponibles pour les échéances 0 h à 6 h, incluant notamment les prévisions du système de prévision immédiate AROME-PI de Météo-France (Auger *et al.*, 2015) (Tab. 1) et le produit de prévision de précipitation PIAF de Météo-France qui fusionne les prévisions d'AROME-PI aux prévisions de la méthode d'extrapolation 2PIR de la mosaïque de lame d'eau radar PANTHERE.

Remerciements. Les scientifiques ayant contribué en France à la thématique « pluie intense et crues rapides » du programme HyMeX sont nombreux et ne peuvent être tous cités ici. Ils sont rattachés aux laboratoires et organismes suivants : CNRS, Météo-France, IRSTEA, INRA, IFSTTAR, CNES, IRD, IGN, CEA, ONERA, Mercator-Océan, Universités d'Aix-Marseille, Avignon, Clermont-Ferrand, Corse, Grenoble, Littoral Côte d'Opale, Montpellier, Perpignan, Pierre et Marie Curie, Sud Toulon-Var, Toulouse, Versailles-Saint Quentin ainsi que l'Ecole des Mines d'Alès, INP Toulouse et Grenoble INP.

La thématique « pluie intense et crues rapides » du programme HyMeX est financée, entre autres, par : MISTRALS/HyMeX (CNRS, Météo-France, IRSTEA, INRA), ANR MEDUP (ANR-07-VULN-0006), ANR FLOODSCALE (ANR-11-BS56-027), ANR IODA-MED (ANR-11-BS56-0005), ANR MOBICLIMEX (ANR-12-SENV-0002), ANR MUSIC (ANR-14-CE01-0014), ANR PICS (ANR-17-CE03-0011), CNES.

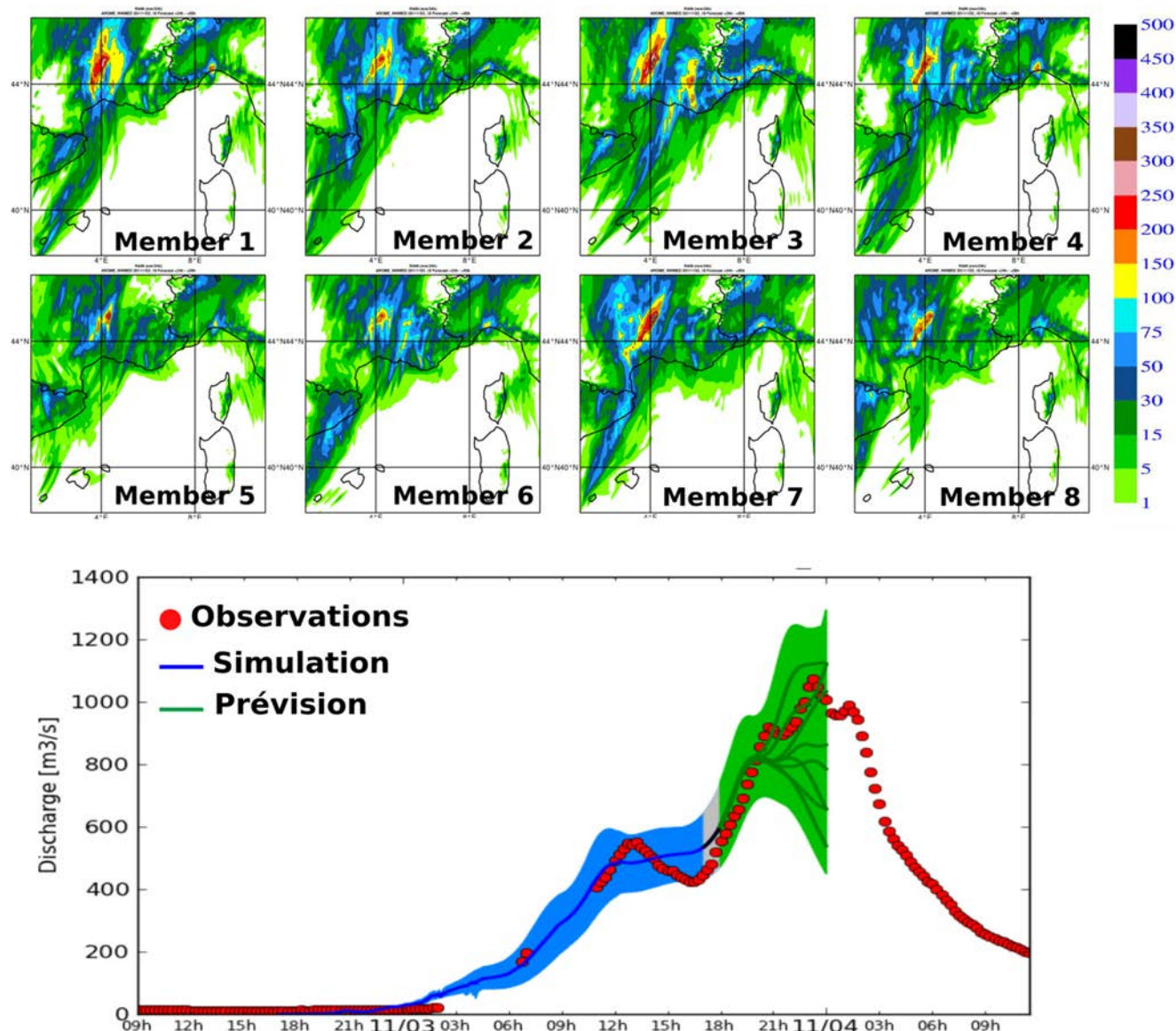


Fig. 3. Exemple d'évaluation de la prévision d'ensemble AROME pour la prévision des débits avec le modèle MARINE pour l'évènement du 03/11/2011 sur le bassin versant du Gardons à Anduze. En haut : cumuls quotidiens de précipitation (mm) prévus par les 8 membres du prototype de système de prévision d'ensemble AROME sur un domaine couvrant la Méditerranée Nord-occidentale mis en œuvre en temps réel pendant la SOP1 (Nuissier *et al.*, 2016). En bas : débit simulé à partir du forçage observé (trait bleu) avec incertitudes paramétriques du modèle hydrologique (zone bleue) ; débit prévu à partir des 8 membres de la prévision d'ensemble AROME (traits verts) avec incertitudes paramétriques du modèle hydrologique (zone verte) (Garambois, 2012).

Références

Auger L, Dupont O, Hagelin S, Brousseau P, Brovelli P. 2015. AROME-NWC: A new nowcasting tool based on an operational mesoscale forecasting system. *Q J R Meteorol Soc* 141: 1603–1611. DOI: [10.1002/qj.2463](https://doi.org/10.1002/qj.2463).

Boudevillain B, Delrieu G, Wijbrans A, Confoland A. 2016. A high-resolution rainfall re-analysis based on radar-raingauge merging in the Cévennes-Vivarais region, France. *J Hydrol* 541: 14–23.

Bouttier F, Raynaud L, Nuissier O, Ménétrier B. 2016. Sensitivity of the AROME ensemble to initial and surface perturbations during HyMeX. *Q J R Meteorol Soc* 142: 390–403.

Bouvier C, Patris N, Freyrier R, *et al.* 2018. The floodscale experiment in the small catchment of Valescure, France: An overview of the isotopic and geochemical database. *Geosci Data J* 5: 14–27. DOI: [10.1002/gdj3.57](https://doi.org/10.1002/gdj3.57).

Braud I, Ayrat P-A, Bouvier C, *et al.* 2014. Multi-scale hydrometeorological observation and modelling for flash-flood understanding. *Hydrol Earth Syst Sci* 18: 3733–3761.

Brunet P, Bouvier C. 2017. Retour d'expérience sur la crue du 12 septembre 2015 à Lodève (Hérault, France) : influence du karst sur les débits de pointe de crue. *La Houille Blanche* 3: 39–46. DOI: [10.1051/lhb/2017020](https://doi.org/10.1051/lhb/2017020).

Brunet P, Bouvier C, Neppel L. 2018. Retour d'expérience sur les crues des 6 et 7 octobre 2014 à Montpellier-Grabels (Hérault,

- France): caractéristiques hydro-météorologiques et contexte historique de l'épisode. *Physio-Géo* 12: DOI: [10.4000/physio-geo.5710](https://doi.org/10.4000/physio-geo.5710).
- Delrieu G, Wijbrans A, Boudevillain B, Faure D, Bonnifait L, Kirstetter P-E. 2014. Geostatistical radar-raingauge merging: A novel method for the quantification of rain estimation accuracy. *Adv Water Resour* 71(0): 110–124.
- Drobinski P, Ducrocq V, Alpert P, *et al.* 2014. HyMeX: A 10-year multidisciplinary program on the Mediterranean water cycle. *Bull Am Meteorol Soc* 95: 1063–1082.
- Ducrocq V, Braud I, Davolio S, *et al.* 2014. HyMeX-SOP1, the field campaign dedicated to heavy precipitation and flash flooding in the northwestern Mediterranean. *Bull Am Meteorol Soc* 95: 1083–1100.
- Ducrocq V, Davolio S, Ferretti R, *et al.* 2016. Introduction to the HyMeX Special Issue on “Advances in understanding and forecasting of heavy precipitation in the Mediterranean through the HyMeX SOP1 field campaign”. *Q J R Meteorol Soc* 142: 1–6.
- Durand S, Ruin I. 2018. Social effects of floods on mobilities. A comparison between short-term and long-term perspectives. In: Lutoff C, Durand S, eds. *Mobility facing hydrometeorological extremes events 1: Defining the relevant scales of analysis*. United Kingdom: ISTE Editions.
- Edouard S, Vincendon B, Ducrocq V. 2018. Ensemble-based flash-flood modelling: Taking into account hydrodynamic parameters and initial soil moisture uncertainties. *J Hydrol* 560: 480–494.
- Fourié N, Bresson E, Nuret M, *et al.* 2015. AROME-WMED, a real-time mesoscale model designed for the HyMeX special observation periods. *Geosci Model Dev* 8: 1919–1941.
- Garambois P-A. 2012. Étude régionale des crues éclair de l'arc méditerranéen français. Élaborations de méthodologies de transfert à des bassins versants non jaugés. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.
- Gaume E, Bain V, Bernardara P, *et al.* 2009. A compilation of data on European flash flood. *J Hydrol* 367: 70–78. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2008.12.028](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028).
- Horner I, Renard B, Le Coz J, Branger F, McMillan HK, Pierrefeu G. 2018. Impact of stage measurement errors on streamflow uncertainty. *Water Resour Res* 54(3): 1952–1976. DOI: [10.1002/2017wr022039](https://doi.org/10.1002/2017wr022039).
- Javelle P, Demargne J, Defrance D, Pansu J, Arnaud P. 2014. Evaluating flash-flood warnings at ungauged locations using post-event surveys: A case study with the AIGA warning system. *Hydrol Sci J* 1–13. DOI: [10.1080/02626667.2014.923970](https://doi.org/10.1080/02626667.2014.923970).
- Le Bihan G, Payrastre O, Gaume E, Moncoulon D, Pons F. 2017. The challenge of forecasting impacts of flash floods: Test of a simplified hydraulic approach and validation based on insurance claim data. *Hydrol Earth Syst Sci* 21: 5911–5928. DOI: [10.5194/hess-21-5911-2017](https://doi.org/10.5194/hess-21-5911-2017).
- Lebouc L, Payrastre O. 2017. Reconstitution et analyse des débits de pointe des crues du 3 octobre 2015 dans les Alpes Maritimes. Convention DGPR-Ifsttar 2016 n°2201030666 du 14 octobre 2016 – Action 14, 18 p. Disponible sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01589775>.
- Le Boursicaud R, Pénard L, Hauet A, Thollet F, 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(1): 90–105. DOI: [10.1002/hyp.10532](https://doi.org/10.1002/hyp.10532).
- Le Coz J, Renard B, Bonnifait L, Branger F, Le Boursicaud R. 2014. Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *J Hydrol* 509(0): 573–587. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2013.11.016](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.016).
- Lutoff C, Durand S. (Eds) 2018. *Mobility facing hydrometeorological extremes events 1: Defining the relevant scales of analysis*. United Kingdom: ISTE Editions.
- Nuissier O, Marsigli C, Vincendon B, *et al.* 2016. Evaluation of two convection-permitting ensemble systems in the HyMeX Special Observation Period (SOP1) framework. *Q J R Meteorol Soc* 142: 404–418.
- Payrastre O. 2015. Estimation des débits de pointe des crues de l'automne 2014 dans le Gard et l'Hérault. Convention DGPR-Ifsttar 2014 n°2101388232 du 10 septembre 2014, Action 4 : appui au SCHAPI, 27 p. Disponible sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01677170>.
- Payrastre O, Naulin JP, Nguyen CC, Gaume E. 2012. Analyse hydrologique des crues de juin 2010 dans le Var, 33 p. Disponible sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01272025>.
- Rainaud R, Lebeaupin Brossier C, Ducrocq V, Giordani H. 2017. High-resolution air–sea coupling impact on two heavy precipitation events in the Western Mediterranean. *Q J R Meteorol Soc* 143: 2448–2462.
- Ricard D, Ducrocq V, Auger L. 2012. A climatology of the mesoscale environment associated with heavily precipitating events over a Northwestern Mediterranean area. *J Appl Meteor Climatol* 5: 468–488.
- Ruin I, Lutoff C, Boudevillain B, *et al.* 2014. Social and hydrological responses to extreme precipitations: An interdisciplinary strategy for postflood investigation. *Weather Clim Soc* 6: 135–153.
- Saint-Martin C, Javelle P, Vinet F. 2018a. DamaGIS: A multisource geodatabase for collection of flood-related damage data. *Earth Syst Sci Data* 10: 1019–1029. DOI: [10.5194/essd-10-1019-2018](https://doi.org/10.5194/essd-10-1019-2018).
- Shabou S, Ruin I, Lutoff C, *et al.* 2017. MobRISK: A model for assessing the exposure of road users to flash flood events. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 17(9): 1631–1651.
- Vannier O, Anquetin S, Braud I. 2016. Investigating the role of geology in the hydrological response of Mediterranean catchments prone to flash-floods: Regional modelling study and process understanding. *J Hydrol*. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2016.04.001](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.001).
- Vié B, Molinié G, Nuissier O, *et al.* 2012. Hydro-meteorological evaluation of a convection-permitting ensemble prediction system for Mediterranean heavy precipitating events. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 12: 2631–2645.
- Vincendon B, Ducrocq V, Nuissier O, Vié B. 2011. Perturbation of convection-permitting NWP forecasts for flash-flood ensemble forecasting. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11: 1529–1544.
- Welber M, Le Coz J, Laronne JB, *et al.* 2016. Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). *Water Resour Res* 52(2): 1108–1126. DOI: [10.1002/2015WR017906](https://doi.org/10.1002/2015WR017906).

Citation de l'article : Ducrocq V, Boudevillain B, Bouvier C, Braud I, Fourie N, Lebeaupin-Brossier C, Javelle P, Nuissier O, Payrastre O, Roux H, Ruin I, Vincendon B. 2019. Le programme HYMEX – Connaissances et prévision des pluies intenses et crues rapides en région méditerranéenne. *La Houille Blanche* 3-4: 5–12.