



HAL
open science

Le programme HyMeX - connaissances et prévision des pluies intenses et crues rapides en région méditerranéenne

Vincent Ducrocq, B. Boudevillain, C. Bouvier, Isabelle Braud, N. Fourrie, C. Lebeaupin Brossier, P. Javelle, O. Nuissier, O. Payrastre, Hélène Roux, et al.

► To cite this version:

Vincent Ducrocq, B. Boudevillain, C. Bouvier, Isabelle Braud, N. Fourrie, et al.. Le programme HyMeX - connaissances et prévision des pluies intenses et crues rapides en région méditerranéenne. Conférence SHF “ de la prévision des crues à la gestion de crise ”, Nov 2018, Avignon, France. 10 p. hal-02074274

HAL Id: hal-02074274

<https://hal.science/hal-02074274v1>

Submitted on 20 Mar 2019

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.

LE PROGRAMME HYMEX - CONNAISSANCES ET PREVISION DES PLUIES INTENSES ET CRUES RAPIDES EN REGION MEDITERRANENNE

Véronique DUCROCQ⁽¹⁾, Brice BOUDEVILLAIN⁽²⁾, Christophe BOUVIER⁽³⁾,
Isabelle BRAUD⁽⁴⁾, Nadia FOURRIE⁽¹⁾, Cindy LEBEAUPIN-BROSSIER⁽¹⁾,
Pierre JAVELLE⁽⁵⁾, Olivier NUISSIER⁽¹⁾, Olivier PAYRASTRE⁽⁶⁾, Hélène ROUX⁽⁷⁾,
Isabelle RUIN⁽²⁾, Béatrice VINCENDON⁽⁸⁾

(1) CNRM, UMR3589, Météo-France-CNRS, 42 Avenue Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 01, veronique.ducrocq@meteo.fr

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

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

(4) IRSTEA Lyon, Unité de recherche RiverLy, 5 Rue de la Doua, CS 20244, 69625 Villeurbanne Cedex

(5) IRSTEA Aix, Unité de recherche RECOVER, 3275 Route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5

(6) IFSTTAR, Centre de Nantes, Route de Bouaye CS4 44344 Bouguenais cedex

(7) IMFT, UMR5502, CNRS-INP Toulouse-Université de Toulouse 3, 2 Allée du Professeur Camille Soula, 31400 Toulouse

(8) Direction de la Climatologie et des Services Climatiques, Météo-France, 42 Avenue Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 01

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 CLEFS : Pluie intense, Crue rapide, Méditerranée, Prévision, Observations

HyMeX – Advances in Understanding and Forecasting of Heavy precipitation and Flash-floods in 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

52 forecasting methods and systems, in particular short-term hydrometeorological ensemble forecasting systems
53 based on the numerical weather prediction model AROME of Météo-France.

54 **KEY WORDS:** Heavy precipitation, Flash-flood, Mediterranean, Forecasting, Observations

55 I INTRODUCTION

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

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

82 II LES CAMPAGNES DE MESURES ET LES OBSERVATIONS LONG TERME :

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

85 - **SOP (Special Observation Period)**. Il s'agit de campagnes de mesures intensives de quelques mois
86 avec le déploiement de moyens de recherche instrumentés sur le terrain, mobiles pour certains, afin
87 d'observer un phénomène spécifique sur une région ciblée. En particulier, la SOP1 à l'automne 2012 a été
88 dédiée aux événements méditerranéens de pluie intense et crue rapide [Ducrocq *et al.*, 2014]. De nombreux
89 moyens d'observation (avions, navires, ballons, radiosondages, gliders, bouées et flotteurs, radars, profileurs
90 de vent, etc) ont été déployés sur les régions terrestres et marines du pourtour méditerranéen de Valence en
91 Espagne au nord-est de l'Italie afin de documenter simultanément les trois compartiments terrestres
92 (atmosphère, mer, bassins versants).

93 - **EOP (Enhanced Observation Period)**. Ce niveau vise à renforcer, par des mesures sur alerte ou
94 temporaires, les réseaux d'observations opérationnels ou les observatoires de recherche plusieurs années de

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)

95 suite. Le niveau EOP s'est révélé être bien adapté à l'observation des événements rares, comme par exemple
 96 des événements de crues rapides sur des bassins versants ciblés. Une stratégie multi-échelle a en effet été
 97 mise en œuvre tous les automnes de 2012 à 2015 [Braud *et al.*, 2014] sur deux bassins de méso-échelle des
 98 Cévennes - le Gard et l'Ardèche - renforçant l'instrumentation déployée dans le cadre de l'Observatoire
 99 Hydrométéorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais (OHM-CV). Trois échelles spatiales ont été
 100 considérées : 1/ le versant pour la documentation des processus ; 2/ l'échelle du petit bassin (1-100 km²) pour
 101 la description de la variabilité spatiale des paysages et des réponses hydrologiques ; et 3/ l'échelle du bassin
 102 de méso-échelle (100-2000 km²) pertinente pour la gestion et la prévision. Ces observations ont combiné des
 103 mesures en continu sur quatre ans (pluie, hauteur d'eau, débits, humidité des sols) et des mesures sur alerte
 104 durant les quatre automnes du projet : jaugeages en crue, échantillonnage de l'humidité des sols,
 105 échantillonnages géochimiques. Des mesures sur alerte ont ainsi été effectuées pendant tous les épisodes
 106 majeurs de crue sur ces bassins survenus pendant les automnes de 2012 à 2015.

107 - **LOP (Long Observation Period)**. La période d'observation longue s'étend sur toute la durée du
 108 programme. Elle consiste à faciliter l'accès aux données des réseaux opérationnels et des observatoires de
 109 recherche ; certains réseaux ont été renforcés ponctuellement par l'ajout de capteurs ou d'instruments.
 110 Également dans le cadre de la LOP, des relevés hydrologiques sur le terrain ont été organisés après les
 111 événements de pluies intenses et de crues éclair les plus remarquables [Payrastra *et al.*, 2012, 2015 ; Lebouc
 112 et Payrastra, 2017 ; Brunet *et al.*, 2018]. Ces relevés ont permis de reconstituer des informations détaillées
 113 sur les débits de pointe des petits cours d'eau non instrumentés lors de ces crues (plus de 160 estimations
 114 réalisées pour le seul territoire Français suite à 6 épisodes remarquables). Ces enquêtes hydrologiques ont été
 115 combinées à des entretiens semi-directifs sociologiques sur la perception et le comportement des citoyens en
 116 matière d'adaptation des mobilités et de mise en protection [Ruin *et al.*, 2014]. Un suivi en continu a
 117 également été mis en place via un questionnaire en ligne depuis l'automne 2014.

118
 119 Le dispositif sur alerte a nécessité l'organisation d'une veille météorologique en continu pendant les SOPs et
 120 l'EOP, grandement facilité par la mise à disposition en temps réel de nombreux produits (observations et
 121 prévisions) de Météo-France sur le site de campagnes (sop.hymex.org), ainsi que la participation de
 122 prévisionnistes de Météo-France pendant la SOP1. Une version dédiée du modèle AROME de Météo-France
 123 a aussi été mise en œuvre en temps réel sur les deux premières SOP afin de fournir des prévisions
 124 météorologiques sur toute la Méditerranée occidentale [Fourrié *et al.*, 2015].

125 II.1 Précipitations intenses

126 La réalisation de climatologies de situations de pluie intense combinant réanalyses atmosphériques et
 127 observations ont permis de synthétiser les caractéristiques à l'échelle synoptique et à méso-échelle des
 128 situations météorologiques propices aux événements de pluie intense dans le Sud de la France [e.g. Ricard et
 129 al., 2012]. L'étude des périodes d'observations intensives (POI) de la SOP1 [Ducrocq *et al.*, 2016], ainsi que
 130 de situations hors SOP1 (inondations de Draguignan en 2010 et de Gênes en 2011 par exemple), a permis de
 131 progresser dans l'identification et la compréhension des mécanismes complexes impliqués dans la formation
 132 des épisodes Méditerranéens. L'interaction de la circulation en basses couches avec les reliefs de tout le
 133 pourtour Méditerranéen est un élément clé dans ces situations. Même si cette interaction dépend des
 134 configurations de la topographie locale, les différents cas étudiés sur les Cévennes, le Var et les Alpes
 135 Maritimes, en Corse, en Ligurie-Toscane, sur le nord-est de l'Italie ou encore la côte est de l'Espagne,
 136 présentent des caractéristiques communes (Figure 1). En plus du mécanisme de soulèvement direct du flux
 137 humide et instable de basses couches lors de sa rencontre avec la chaîne montagneuse, ces études de cas
 138 mettent fréquemment en évidence d'autres sources de soulèvement, comme i) des lignes de convergence,
 139 bien souvent sur mer, induites par l'interaction de la circulation de basses couches avec le relief ou résultant
 140 d'un forçage synoptique de plus grande échelle, ii) un dôme d'air froid en basses couches, induit le plus
 141 souvent par l'évaporation des précipitations du système orageux, iii) des circulations induites par les reliefs et
 142 les îles de la région comme les vents de barrière et la canalisation du flux dans les vallées. L'occurrence et la
 143 combinaison de ces différents mécanismes dépend à la fois des caractéristiques dynamiques et
 144 thermodynamiques de l'environnement sur toute la Méditerranée occidentale et de l'interaction des systèmes
 145 orageux avec cet environnement à méso-échelle.

146 Des progrès ont aussi été réalisés sur les techniques d'observation et de fusion de données, avec la mise au
 147 point de nouvelles méthodes et la réalisation de validation croisée entre les différents systèmes d'observation
 148 déployés. En particulier, une nouvelle méthode de fusion de données pluviométriques et radar a été proposée
 149 et mise en œuvre pour l'établissement de réanalyses pluviométriques améliorant l'estimation de la pluie et
 150 l'enrichissant d'une information sur l'erreur associée, et ce, à des échelles d'espace et de temps fines (1 km²,

151 1h sur les principaux événements en Cévennes-Vivarais depuis 2000) [Delrieu *et al.*, 2014, Boudevillain *et*
 152 *al.*, 2016].
 153

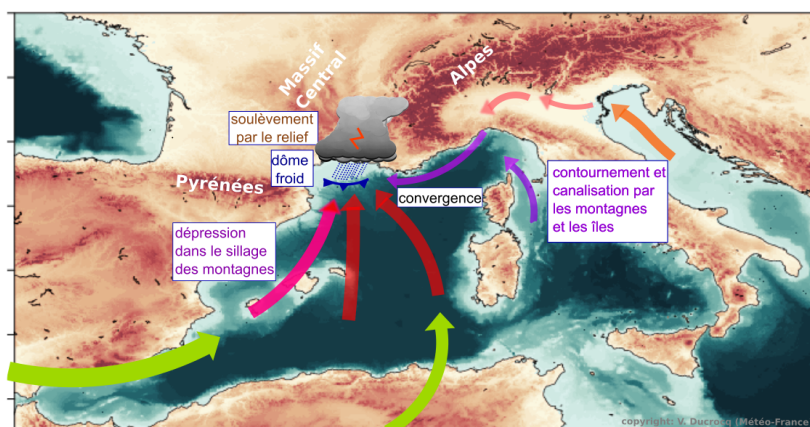


Figure 1. Principaux forçages de basses couches de basses couches intervenant dans la formation des systèmes fortement précipitants en Méditerranée nord-occidentale. D'après Ducrocq *et al.* (2016)

154
 155 Les observations de la SOP1servent aussi à valider et améliorer la modélisation des précipitations aux
 156 résolutions kilométriques et hectométriques [e.g. Augros *et al.*, 2016], avec notamment la mise au point de
 157 nouvelles paramétrisations physiques des modèles atmosphériques en termes de représentation des processus
 158 microphysiques et de la turbulence [e.g. Taufour *et al.*, 2018]
 159

160 II.2 Crues rapides

161 L'analyse des observations recueillies, combinée à une modélisation à échelle fine, ont permis de progresser
 162 sur les questions de changement d'échelle et de prédiction en bassins non jaugés. Ces deux problématiques
 163 sont particulièrement pertinentes pour les crues rapides qui affectent souvent de petits bassins sans mesure
 164 des débits et peuvent concerner de larges étendues, nécessitant une compréhension et une modélisation à
 165 échelle fine et sur de vastes territoires. En particulier, différentes méthodes de mesures sans contact des
 166 débits en crue (radars de vitesse, méthode LS-PIV⁸, exploitation de vidéos sur YouTube) ont été mises au
 167 point et validées [e.g. Welber *et al.*, 2016 ; Le Boursicaud *et al.*, 2016]. Ces mesures, qui permettent de
 168 documenter les débits de crue, améliorent la qualité des courbes de tarage et diminuent l'incertitude sur les
 169 débits. Ces estimations sont réalisées par un outil bayésien appelé BaRatin [Le Coz *et al.*, 2014], disponible
 170 pour les services opérationnels. Une méthode permet aussi de propager aux hydrogrammes, les erreurs sur la
 171 courbe de tarage et la mesure de hauteur [Hornere *et al.*, 2018]. L'impact important de la géologie sur la
 172 différenciation des réponses hydrologiques, notamment en crue, et de la forte capacité de stockage des
 173 horizons de roches altérées (notamment les karsts) ont été mis en évidence [Vannier *et al.*, 2016], et ont été
 174 confirmés à plusieurs reprises par les relevés hydrologiques post-crue [e.g. Payrastra *et al.*, 2012 ; Brunet
 175 et Bouvier, 2017]. Les flux de sub-surface ont été quantifiés, notamment grâce aux essais sur versants sous
 176 pluie artificielle ou naturelle et aux analyses géochimiques réalisées [Bouvier *et al.*, 2018]. Différents outils
 177 de modélisation ont été produits ou améliorés, entre autres pour les bassins versants français : modèle M7
 178 dans la plateforme ATHYS, modèle CVN dans la plateforme LIQUID®, modèle SIMPLEFLOOD dans la
 179 plateforme JAMS, modèle MARINE, modèle ISBA-TOP dans la plateforme SURFEX, générateur
 180 stochastique de champs de pluie SAMPO⁹.

181 Les relevés hydrologiques post-crue ont également permis de consolider la position des courbes enveloppes
 182 des débits en région Méditerranéenne, et de confirmer la présence de fortes hétérogénéités régionales de ces
 183 débits de crues, les valeurs les plus importantes restant observées dans le secteur des Cévennes en France
 184 (Fig. 2). Des comparaisons avec les débits de la méthode d'avertissement sur les bassins non-jaugés AIGA

⁸ Large Scale Particule Image Velocimetry

⁹ L'ensemble des résultats du projet FLOODSCALE est disponible dans le rapport scientifique: Braud, I., Andrieu, J., Ayral, 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 pp, <https://floodscale.irstea.fr/donnees/rapports-finaux-floodscale> .

185 ont également été réalisées, notamment pour l'évènement de juin 2010 dans le Var, confirmant les ordres de
 186 grandeurs calculés en temps réels [Javelle *et al.*, 2014]).
 187

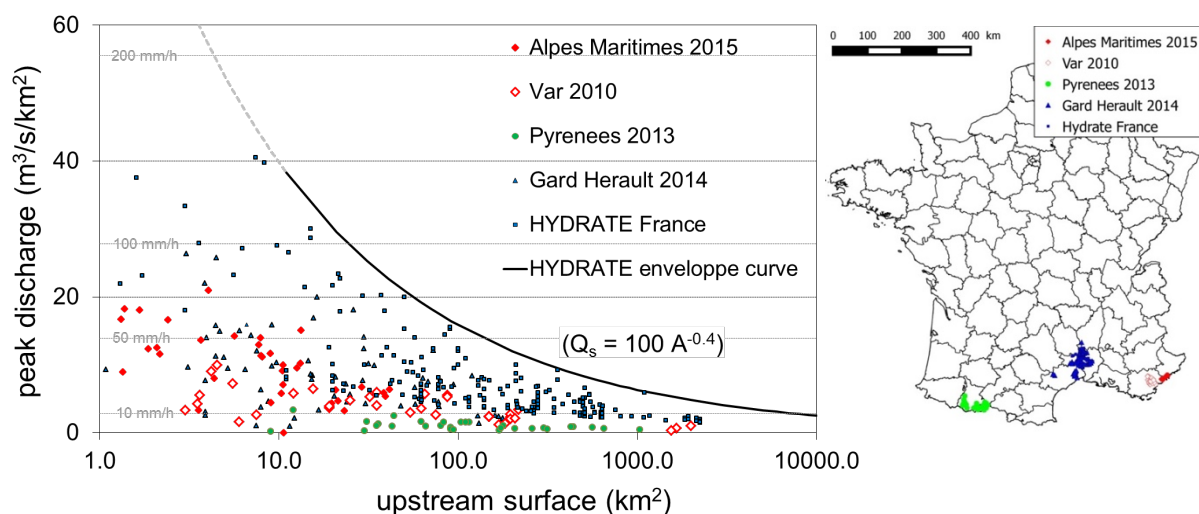


Figure 2. Position des débits estimés lors des enquêtes post crue HyMeX par rapport aux courbes enveloppes proposées par le projet européen Hydrate

188

189 II.3 Vulnérabilité, exposition et adaptation aux crues rapides

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

193 Un premier axe consiste à collecter des données sur les événements extrêmes hydrométéorologiques et les
 194 impacts et perturbations socio-économiques à l'échelle des régions ou pays méditerranéens à partir de
 195 diverses sources (bases de données nationales et internationales, presse écrite, services opérationnels,...),
 196 ainsi que des informations sur les comportements individuels à l'échelle d'un événement au moyen
 197 d'entretiens semi-directifs sur le terrain réalisées dans le cadre de la LOP, de questionnaires en ligne, ou plus
 198 récemment, de l'analyse des réseaux sociaux (Twitter). Pour la France, les événements qui ont été tout
 199 particulièrement documentés sont les inondations catastrophiques des 8-9 septembre 2002 dans le Gard, du
 200 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
 201 2015 dans la région de Cannes. Ces données sont exploitées pour analyser les réactions des personnes en
 202 fonction de l'alerte et de la chronologie de l'évènement hydrométéorologique. A partir des données socio-
 203 hydrologiques du cas du Var de juin 2010, il a par exemple été mis en évidence la difficulté de basculer
 204 d'une activité quotidienne à des actions de mise en protection [Ruin *et al.*, 2014 ; Durand et Ruin, 2018].
 205 Ceci traduit aussi une difficulté à interpréter les signes alarmants dans l'environnement de l'individu lorsque
 206 l'alerte officielle est insuffisamment précise. Cette étude montre également que le timing de l'évènement
 207 hydrométéorologique, sa sévérité, et l'expérience d'un événement passé pour l'individu sont des facteurs
 208 influençant fortement la capacité des personnes à reconnaître une situation dangereuse et à adapter leurs
 209 activités à la situation.

210 Un second axe de recherche a visé à étudier l'évolution de la vulnérabilité et de l'exposition aux crues
 211 rapides sous l'angle des mobilités [Lutoff et Durand, 2018]. Le terrain d'étude est le département du Gard,
 212 pour lequel ont été analysées : i) la relation, d'une part, entre dynamique résidentielle (occupation des sols)
 213 et, d'autre part, l'occurrence d'inondations, l'évolution du cadre réglementaire sur les risques (PPRI entre-
 214 autres), et le marché de l'immobilier ; ii) l'exposition des automobilistes Gardois dans leurs trajets
 215 quotidiens, sachant qu'environ la moitié des victimes dues aux crues rapides sont des automobilistes. Pour
 216 évaluer l'exposition des automobilistes aux crues rapides, une modélisation statistique de la mobilité
 217 quotidienne a été développée croisant une information spatiale et dynamique sur les coupures de route par
 218 inondation et les trajets quotidiens types des principales catégories de population du département [Debionne
 219 *et al.*, 2016 ; Shabou *et al.*, 2017].

220 **III PREVISIONS METEOROLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES**

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

225 Globalement, les différents résultats obtenus au sein d'HyMeX, en termes d'impacts de l'assimilation de
 226 données et de prévisibilité aux résolutions kilométriques, montrent une sensibilité importante aux conditions
 227 initiales. La sensibilité aux paramétrisations physiques du modèle ou à la résolution horizontale (par exemple
 228 500 m par rapport à ~2 km) est moins importante. Les observations dans le flux amont alimentant les
 229 systèmes convectifs sont celles qui potentiellement ont le plus d'impact sur la prévision à courte échéance,
 230 les observations décrivant les circulations (vent, humidité) à mésoéchelle dans les basses couches au-dessus
 231 de la mer sont celles qui apparaissent faire le plus défaut pour contraindre le modèle. Compte-tenu du rôle de
 232 la mer Méditerranée dans ces épisodes de pluie intense, des systèmes couplés océan-atmosphère-vagues-
 233 fleuves sont développés afin d'évaluer le bénéfice de tels systèmes pour la prévision des épisodes
 234 Méditerranéens [e.g. Rainaud *et al.*, 2017]

235 HyMeX a aussi offert un cadre pour le développement de la prévision d'ensemble AROME (Tab. 1) et
 236 son évaluation pour la prévision des pluies intenses et des crues rapides. Une des caractéristiques et
 237 difficultés pour la définition d'une prévision d'ensemble à ces résolutions est le petit nombre de membres de
 238 l'ensemble contraint par la puissance de calcul disponible. La question était donc d'identifier les sources
 239 d'incertitudes essentielles à considérer (conditions initiales, conditions aux limites, erreurs de modélisation)
 240 et de concevoir des méthodes de perturbations qui permettent d'échantillonner les principales erreurs en une
 241 douzaine de réalisations. Un système de prévision d'ensemble basé sur les méthodes de perturbations
 242 développées (conditions initiales, conditions aux limites et erreurs de modélisation) et pour un domaine
 243 AROME couvrant la Méditerranée nord-occidentale a été mis en œuvre en temps réel pendant la SOP1. Ce
 244 système a été comparé au système italien de prévision d'ensemble à la résolution kilométrique (COSMO-H2-
 245 EPS) sur la période de la SOP1, avec des scores globalement meilleurs pour la prévision d'ensemble
 246 AROME [Nuissier *et al.*, 2016]. La haute densité des observations en France, Italie et Espagne disponibles
 247 sur la période de la SOP1 a permis d'évaluer la première version du système de prévision d'ensemble
 248 AROME sur l'Europe occidentale, telle que mise en œuvre opérationnellement à partir de 2016 [Bouttier *et*
 249 *al.*, 2016]. Il a été montré que la prévision d'ensemble AROME était supérieure à la prévision d'ensemble du
 250 modèle ARPEGE (PEARP) et à la prévision déterministe du modèle AROME pour la prévision des fortes
 251 précipitations. Ces travaux ont aussi montré que la petite taille de l'ensemble était un facteur très limitant
 252 pour ces épisodes de pluie extrême. Une augmentation du nombre de membres et de réseaux de la prévision
 253 d'ensemble AROME est prévue au cours de l'année 2018 (16 membres par réseaux et 4 réseaux par jour).
 254

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

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

255 Les nouveaux systèmes de prévision d'ensemble à la résolution kilométrique ont été évalués également
 256 d'un point de vue hydrologique, en forçant des modèles hydrologiques avec les précipitations prévues par les
 257 membres des prévisions d'ensemble météorologiques pour des cas de crue rapide [e.g. Vié *et al.*, 2012, Fig.

258 3]. Une méthode de perturbations a posteriori des prévisions de précipitation d'AROME a également été
 259 conçue [Vincendon *et al.*, 2011]. Les perturbations introduites pour produire un ensemble d'une cinquantaine
 260 de champs de précipitation échantillonnent la distribution des erreurs en localisation et en intensité du
 261 modèle AROME sur les bassins Méditerranéens. Le modèle ISBA-TOP a été forcé, en temps réel pendant la
 262 SOP1 et en temps différé sur les épisodes de l'automne 2014, d'une part avec les membres des ensembles de
 263 précipitations produit par cette méthode, et d'autre-part, avec les membres de la prévision d'ensemble
 264 AROME, pour produire des prévisions d'ensemble des débits jusque 30 heures d'échéance. Les deux
 265 méthodes montrent généralement des performances extrêmement proches et la combinaison des deux
 266 méthodes conduit à des scores probabilistes meilleurs que ceux obtenus par les deux méthodes prises
 267 séparément sur les cas de l'automne 2014 sur les bassins cévenols. Des méthodes de perturbations des
 268 conditions initiales en humidité des sols et des paramètres du modèle ISBA-TOP ont aussi été conçues et
 269 évaluées [Edouard *et al.*, 2018]

270

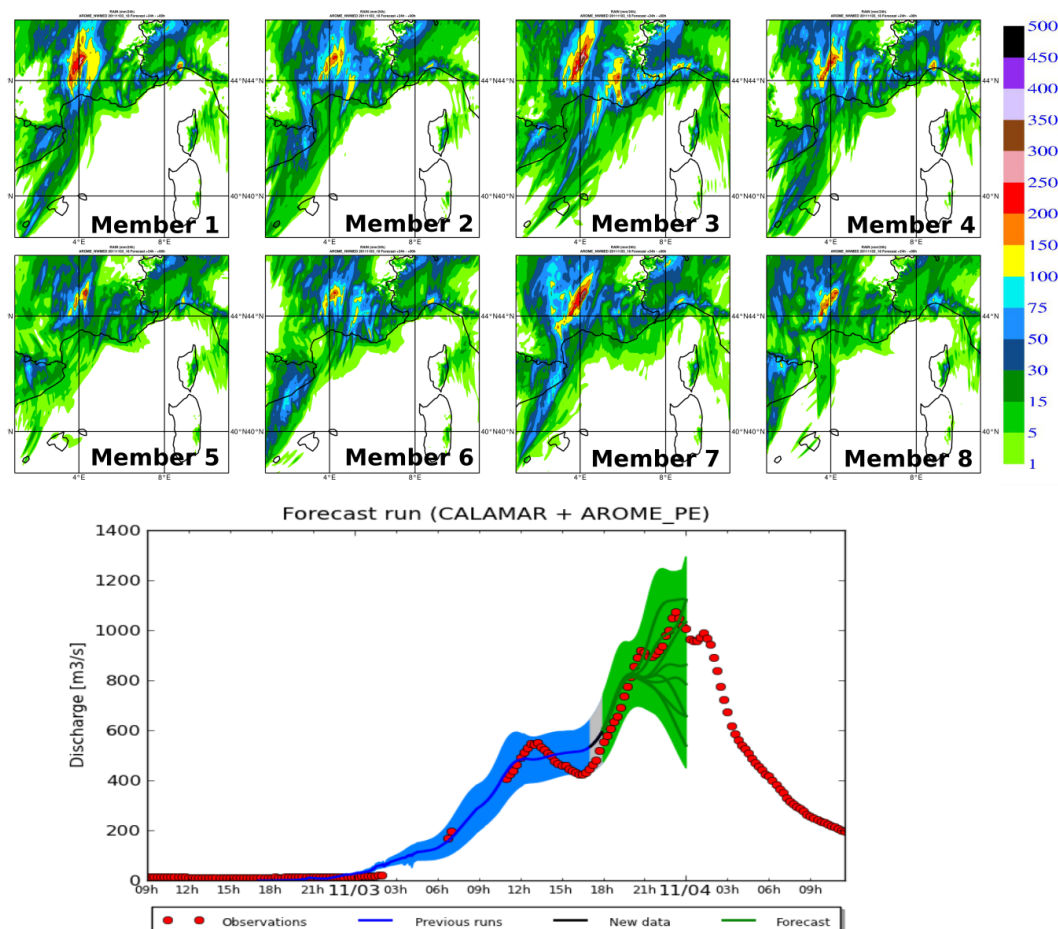


Figure3. Exemple d'évaluation de la prévision d'ensemble AROME pour la prévision des débits avec le modèle MARINE pour l'évènement du 03/11/2011 sur le bassin versant du Gardons à Anduze. En haut : cumuls quotidiens de précipitation (mm) prévus par les 8 membres du prototype de système de prévision d'ensemble 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)

271

272 IV VERS UNE PREVISION INTEGREE DES PLUIES INTENSES AUX IMPACTS

273 Les progrès réalisés en termes de connaissances et modélisation des phénomènes hydrométéorologiques
 274 méditerranéens, ainsi que le cadre multidisciplinaire apporté par HyMeX nous permettent désormais

275 d'aborder des questions transverses à plusieurs domaines scientifiques, comme celles de la prévision intégrée
 276 des pluies intenses aux impacts. Une première chaîne de prévision des impacts des crues éclair a été
 277 proposée et testée sur deux études de cas dans les bassins versants du Gard et de l'Argens [Le Bihan *et al.*,
 278 2017]. Les résultats de cette chaîne ont pu être évalués à partir des emprises inondées réelles et des sinistres
 279 d'assurance observés pour les crues de septembre 2002 (Gard) et juin 2010 (Argens). Une base de données
 280 géoréférencée a également été constituée sur le sud de la France pour les principaux événements survenus
 281 depuis 2011 afin de collecter des données de validation sur les impacts liés aux crues rapide [Saint-Martin *et*
 282 *al.*, 2018a]. A partir de ces premiers résultats, le projet ANR PICS a été lancé afin de concevoir et tester de
 283 façon plus large des chaînes de prévision immédiate intégrée des impacts des crues soudaines. Le premier
 284 maillon de la chaîne de prévision porte sur la prévision immédiate des pluies et des débits, où notamment il
 285 s'agira d'évaluer les prévisions opérationnelles de précipitation disponibles pour les échéances 0h à 6h,
 286 incluant notamment les prévisions du système de prévision immédiate AROME-PI de Météo-France [Auger
 287 *et al.*, 2015] (Tab. 1) et le produit de prévision de précipitation PIAF de Météo-France qui fusionne les
 288 prévisions d'AROME-PI aux prévisions de la méthode d'extrapolation 2PIR de la mosaïque de lame d'eau
 289 radar PANTHERE.

290 REMERCIEMENTS

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

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

301 V REFERENCES¹⁰

- 302 Auger, L., Dupont, O., Hagelin, S., Brousseau, P. and Brovelli, P. (2015). - AROME-NWC: a new
 303 nowcasting tool based on an operational mesoscale forecasting system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, **141**:
 304 1603-1611. doi:10.1002/qj.2463
- 305 Augros, C., Caumont, O., Ducrocq, V., Gaussiat, N. and Tabary, P. (2016). - Comparisons between S-, C-,
 306 and X-band polarimetric radar observations and convective-scale simulations of the HyMeX first
 307 special observing period. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **142**: 347-362.
- 308 Boudevillain, B., Delrieu, G., Wijbrans, A., Confoland, A. (2016). - A high-resolution rainfall re-analysis
 309 based on radar-raingauge merging in the Cévennes-Vivarais region, France. *J. Hydrol.*, **541**: 14-23.
- 310 Bouttier, F., Raynaud, L., Nuissier, O. and Ménétrier, B. (2016) - Sensitivity of the AROME ensemble to
 311 initial and surface perturbations during HyMeX. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,
 312 **142**: 390-403.
- 313 Bouvier, C., Patris N., Freydier R., Guilhe-Batiot C., Seidel J.-L., Taupin J.-D., Brunet P., Remes-
 314 Busiau A. (2018). - The floodscale experiment in the small catchment of Valescure, France: an
 315 overview of the isotopic and geochemical database. *Accepté par Geoscience Data Journal*
- 316 Braud I., Ayrat P.-A., Bouvier C., Branger F., Delrieu G., Le Coz J., Nord G., Vandervaere J.-P., Anquetin
 317 S., Adamovic M., Andrieu J., Batiot C., Boudevillain B., Brunet, P., Carreau J., Confoland A., Didon-
 318 Lescot J.-F., Domergue J.-M., Douvinet J., Dramais G., Freydier R., Gérard S., Huza J., Leblois E., Le
 319 Bourgeois O., Le Boursicaud R., Marchand P., Martin P., Nottale L., Patris N., Renard B., Seidel J.-L.,
 320 Taupin J.-D., Vannier O., Vincendon B. and Wijbrans A. (2014). - Multi-scale hydrometeorological
 321 observation and modelling for flash-flood understanding, *Hydrology and Earth System Sciences*, **18**:
 322 3733-3761.
- 323 Brunet P., Bouvier C. et Neppel L. (2018) - Retour d'expérience sur les crues des 6 et 7 octobre 2014 à
 324 Montpellier-Grabels (Hérault, France) : caractéristiques hydro-météorologiques et contexte historique
 325 de l'épisode, *Physio-Géo*, **12**: DOI : 10.4000/physio-geo.5710

¹⁰ liste complète des publications du projet : www.hymex.org/?page=publications/publications

- 326 Brunet, P, Bouvier, C., (2017). - Retour d'expérience sur la crue du 12 septembre 2015 à Lodève (Hérault,
327 France) : influence du karst sur les débits de pointe de crue. *La Houille Blanche*, **3**: 39-46. DOI
328 10.1051/lhb/2017020
- 329 Debionne, S., Ruin, I., Shabou, S., Lutoff, C., Creutin, J.-D. (2016). - Assessment of commuters' daily
330 exposure to flash flooding over the roads of the Gard region, France. *J. Hydrol.* **541(A)**, 636-648.
331 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.064>
- 332 Delrieu, G., Wijbrans, A., Boudevillain, B., Faure, D., Bonnifait, L., Kirstetter, P.-E., 2014b. Geostatistical
333 radar-rain gauge merging: A novel method for the quantification of rain estimation accuracy. *Advances in*
334 *Water Resources*, 71(0): 110-124.
- 335 Drobinski, P., Ducrocq, V., Alpert, P., Anagnostou, E., Béranger, K., Borga, M., Braud, I., Chanzy, A.,
336 Davolio, S., Delrieu, G., Estournel, C., Filali Boubrahmi, N., Font, J., Grubisic, V., Gualdi, S., Homar,
337 V., Ivančan-Picek, B., Kottmeier, C., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Lionello, P., Llasat, M. C., Ludwig,
338 W., Lutoff, C., Mariotti, A., Richard, E., Romero, R., Rotunno, R., Roussot, O., Ruin, I., Somot, S.,
339 Taupier-Letage, I., Tintoré, J., Uijlenhoet, R. and Wernli, H. (2014) - HyMeX: a 10-year
340 multidisciplinary program on the Mediterranean water cycle. *Bulletin of the American Meteorological*
341 *Society*, **95**:1063-1082.
- 342 Ducrocq, V., Braud, I., Davolio, S., Ferretti, R., Flamant, C., Jansà, A., Kalthoff, N., Richard, E., Taupier-
343 Letage, I., Ayrat, P.-A., Belamari, S., Berne, A., Borga, M., Boudevillain, B., Bock, O., Boichard, J.-L.,
344 Bouin, M.-N., Bousquet, O., Bouvier, C., Chiggiato, J., Cimini, D., Corsmeier, U., Coppola, L.,
345 Cocquerez, P., Defer, E., Delanoë, J., Di Girolamo, P., Doerenbecher, A., Drobinski, P., Dufournet, Y.,
346 Fourrié, N., Gourley, J. J., Labatut, L., Lambert, D., Le Coz, J., Marzano, F. S., Molinié, G., Montani,
347 A., Nord, G., Nuret, M., Ramage, K., Rison, B., Roussot, O., Said, F., Schwarzenboeck, A., Testor, P.,
348 Van-Baelen, J., Vincendon, B., Aran, M. and Tamayo, J. (2014). - HyMeX-SOP1, the field campaign
349 dedicated to heavy precipitation and flash flooding in the northwestern Mediterranean, *Bulletin of the*
350 *American Meteorological Society*, **95**: 1083-1100
- 351 Ducrocq, V., Davolio, S., Ferretti, R., Flamant, C., Homar Santaner, V., Kalthoff, N., Richard, E. and
352 Wernli, H. (2016). - Introduction to the HyMeX Special Issue on 'Advances in understanding and
353 forecasting of heavy precipitation in the Mediterranean through the HyMeX SOP1 field campaign'.
354 *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **142**: 1-6.
- 355 Durand, S., Ruin, I. (2018). - Social effects of floods on mobilities. A comparison between short-term and
356 long-term perspectives. In Lutoff et Durand. (Eds), *Mobility Facing Hydrometeorological Extremes*
357 *Events I*. ISTE Press Elsevier, in print.
- 358 Edouard, S., Vincendon, B., Ducrocq, V. (2018). - Ensemble-based flash-flood modelling: Taking into
359 account hydrodynamic parameters and initial soil moisture uncertainties, *Journal of Hydrology*, **560**:
360 480-494.
- 361 Fourrié, N., Bresson, E., Nuret, M., Jany, C., Brousseau, P., Doerenbecher, A., Kreitz, M., Nuissier, O.,
362 Sevault, E., Bénichou, H., Amodei, M. and Pouponneau, F. (2015). -
363 AROME-WMED, a real-time mesoscale model designed for the HyMeX special observation periods.
364 *Geoscientific Model Development*, **8**: 1919-1941.
- 365 Garambois, P.-A. (2012). - Étude régionale des crues éclair de l'arc méditerranéen français. Élaborations de
366 méthodologies de transfert à des bassins versants non jaugés. Thèse de doctorat, Institut National
367 Polytechnique de Toulouse, France
- 368 Horner, I., Renard, B., Le Coz, J., Branger, F., McMillan, H.K., Pierrefeu, G., (2018) - Impact of Stage
369 Measurement Errors on Streamflow Uncertainty. *Water Resources Research*, **54(3)**: 1952-1976.
370 DOI:10.1002/2017wr022039.
- 371 Javelle, P., Demargne, J., Defrance, D., Pansu, J., Arnaud, P. (2014). - Evaluating flash-flood warnings at
372 ungauged locations using post-event surveys: a case study with the AIGA warning system. *Hydrological*
373 *Sciences Journal*, 1-13. Doi:10.1080/02626667.2014.923970
- 374 Le Bihan, G., Payrastra, O., Gaume, E., Moncoulon, D., and Pons, F (2017). - The challenge of forecasting
375 impacts of flash floods: test of a simplified hydraulic approach and validation based on insurance claim
376 data, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **21**: 5911-5928, <https://doi.org/10.5194/hess-21-5911-2017>.
- 377 Lebouc, L., Payrastra, O., (2017). - Reconstitution et analyse des débits de pointe des crues du 3 octobre
378 2015 dans les Alpes Maritimes. Convention DGPR-Ifsttar 2016 n°2201030666 du 14 octobre 2016 -
379 Action 14, 18p, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01589775>

- 380 Le Boursicaud, R., Pénard, L., Hauet, A., Thollet, F., Le Coz, J., (2016). - Gauging extreme floods on
 381 YouTube: application of LSPIV to home movies for the post-event determination of stream discharges.
 382 *Hydrological Processes*, **30(1)**: 90-105. DOI:10.1002/hyp.10532
- 383 Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., Le Boursicaud, R. (2014). - Combining hydraulic
 384 knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach.
 385 *Journal of Hydrology*, **509(0)**: 573-587. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.016
- 386 Lutoff, C., Durand, S. (Eds) (2018). *Mobility Facing Hydrometeorological Extremes Events 1*. ISTE Press
 387 Elsevier, in print.
- 388 Nuissier, O., Marsigli, C., Vincendon, B., Hally, A., Bouttier, F., Montani, A. and Paccagnella, T. (2016). -
 389 Evaluation of two convection-permitting ensemble systems in the HyMeX Special Observation Period
 390 (SOP1) framework. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **142**: 404-418.
- 391 Payrastré O., Gaume, E., Javelle, P., Janet, B., Fourmigué, P., Lefort, Ph., Martin, A., Boudevillain, B.,
 392 Brunet, P., Delrieu, G., Marchi, L., Aubert, Y., Dautrey, E., Durand, L., Lang, M., Boissier, L.,
 393 Douvinet, J., Martin, C., Ruin, I. (2012). - Hydrological analysis of the catastrophic flash flood of 15th
 394 June 2010 in the area of Draguignan (Var, France)-TTO2D d'HYMEX, SHF conference "Evénements
 395 extrêmes Fluviaux et Maritimes", Paris, 1-2 février 2012.
- 396 Payrastré, O., Naulin, J.P., Nguyen, C.C., Gaume, E. (2012). - Analyse hydrologique des crues de juin 2010
 397 dans le Var, 33p, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01272025>
- 398 Payrastré, O. (2015). - Estimation des débits de pointe des crues de l'automne 2014 dans le Gard et l'Hérault.
 399 Convention DGPR-Ifsttar 2014 n°2101388232 du 10 septembre 2014, Action 4: Appui au SCHAPI,
 400 27p, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01677170>
- 401 Rainaud, R., Lebeau-pin Brossier, C., Ducrocq, V. and Giordani, H., (2017). - High-resolution air-sea
 402 coupling impact on two heavy precipitation events in the Western Mediterranean. *Quarterly Journal of*
 403 *the Royal Meteorological Society*, **143**: 2448-2462.
- 404 Ricard, D., Ducrocq, V. and Auger, L. (2012). - A Climatology of the Mesoscale Environment Associated
 405 with Heavily Precipitating Events over a Northwestern Mediterranean Area. *J. Appl. Meteor. Climatol.*,
 406 **5** : 468-488.
- 407 Ruin I., Lutoff, C., Boudevillain, B., Creutin, J.-D., Anquetin, S., Bertran Rojo, M., Boissier, L., Bonnifait,
 408 L., Borga, M., Colbeau-Justin, L., Créton-Cazanave, L., Delrieu, G., Douvinet, J., Gaume, E., Grunfest,
 409 E., Naulin, J.-P., Payrastré, O. and Vannier, O., (2014). - Social and Hydrological Responses to Extreme
 410 Precipitations: An Interdisciplinary Strategy for Postflood Investigation. *Weather, Climate, and Society*,
 411 **6**: 135-153.
- 412 Saint-Martin, C., Javelle, P., and Vinet, F. (2018a). - DamaGIS: a multisource geodatabase for collection of
 413 flood-related damage data, *Earth Syst. Sci. Data*, **10**: 1019-1029, [https://doi.org/10.5194/essd-10-1019-](https://doi.org/10.5194/essd-10-1019-2018)
 414 2018.
- 415 Shabou, S., Ruin, I., Lutoff, C., Debionne, S., Anquetin, S., Creutin, J. - D., et al. (2017). - MobRISK: a
 416 model for assessing the exposure of road users to flash flood events. *Natural Hazards and Earth System*
 417 *Sciences*, **17(9)**: 1631-1651.
- 418 Taufour, M., Vié, B., Augros, C., Boudevillain, B., Delanoë, J., Delautier, G., Ducrocq, V., Lac, C., Pinty,
 419 J.P. and Schwarzenböck, A. (2018). - Evaluation of the two-moment scheme LIMA based on
 420 microphysical observations from the HyMeX campaign. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, in press,
 421 doi:10.1002/qj.3283
- 422 Vannier, O., Anquetin, S., Braud, I. (2016). - Investigating the role of geology in the hydrological response of
 423 Mediterranean catchments prone to flash-floods: Regional modelling study and process understanding. *Journal of*
 424 *Hydrology*. DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.04.001
- 425 Vié, B., Molinié, G., Nuissier, O., Vincendon, B., Ducrocq, V., Bouttier, F. and Richard, E. (2012). - Hydro-
 426 meteorological evaluation of a convection-permitting ensemble prediction system for Mediterranean
 427 heavy precipitating events. *Natural Hazards and Earth System Science*, **12**: 2631-2645.
- 428 Vincendon, B., Ducrocq, V., Nuissier, O. and Vié, B. (2011). - Perturbation of convection-permitting NWP
 429 forecasts for flash-flood ensemble forecasting. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **11**: 1529-
 430 1544.
- 431 Welber, M., Le Coz, J., Laronne, J.B., Zolezzi, G., Zamler, D., Dramais, G., Hauet, A., Salvaro, M., (2016). -
 432 Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). *Water*
 433 *Resources Research*, **52(2)**: 1108-1126. DOI:10.1002/2015WR017906
- 434