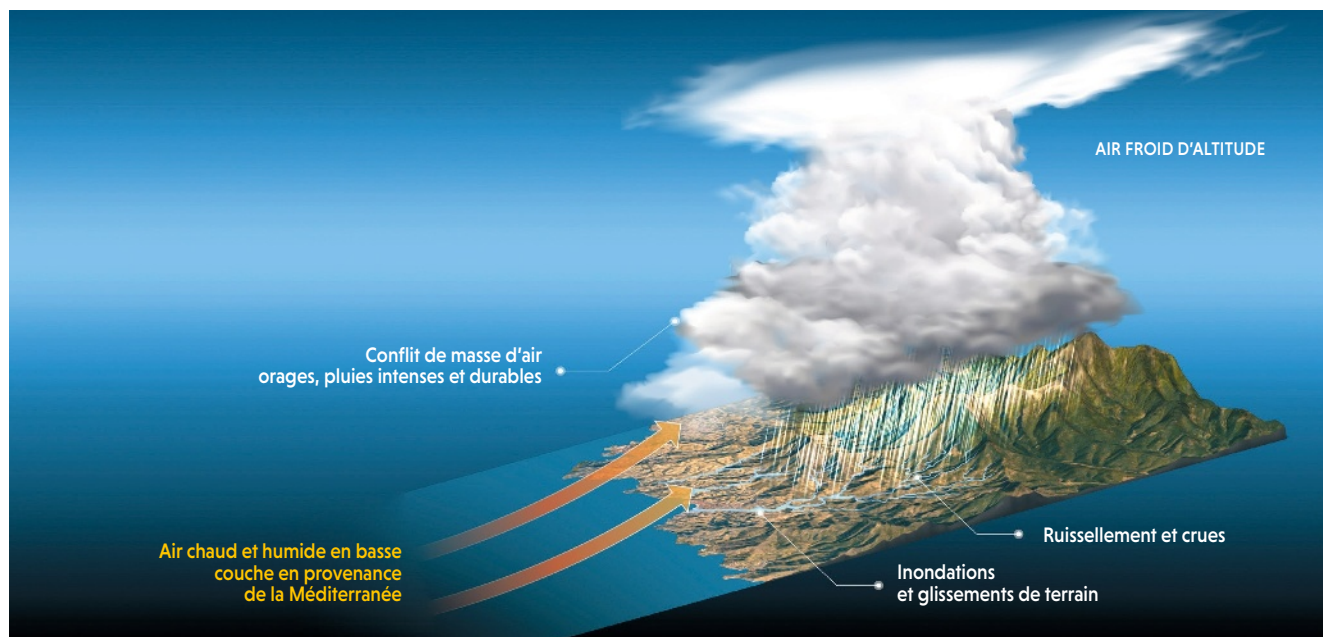




Par le jeu de masses d'air chaudes et froides, des nuages d'orage se forment près des côtes et arroseront l'arrière-pays.

sous-sol, sans contribuer aux écoulements de crue. Les quantités de pluie ainsi captées représentent jusqu'à plusieurs centaines de millimètres lors d'un épisode pluvieux. Mais ces quantités diffèrent fortement selon les bassins-versants, et même selon les événements, car elles dépendent de la couverture et de la nature des sols, ainsi que de l'état d'humidité des sols en début de pluie. Ainsi, certains bassins-versants montrent des comportements à seuil : les crues ne commencent à se former qu'au-delà d'un cumul de pluie très important, pouvant largement dépasser les 100 millimètres. C'est le cas par exemple des bassins karstiques (une structure géomorphologique résultant de l'érosion de toutes les roches solubles, principalement carbonatées et essentiellement des calcaires) qui réagissent souvent tardivement, mais brusquement à la pluie.

Malgré cet effet «tampon» des bassins-versants, les cumuls et intensités pluviométriques très importants observés lors des épisodes pluvieux méditerranéens font que les crues générées sont d'une sévérité rare. Les cellules pluvieuses intenses étant observées sur des surfaces généralement limitées, typiquement de l'ordre de quelques centaines de kilomètres carrés, les crues les plus fortes se forment sur de petits cours d'eau, avec la particularité associée de montées de crues extrêmement rapides, comme ce fut par exemple le cas dans les bassins de la Tinée, la Vésubie et la Roya en octobre 2020 (voir la figure page 84).

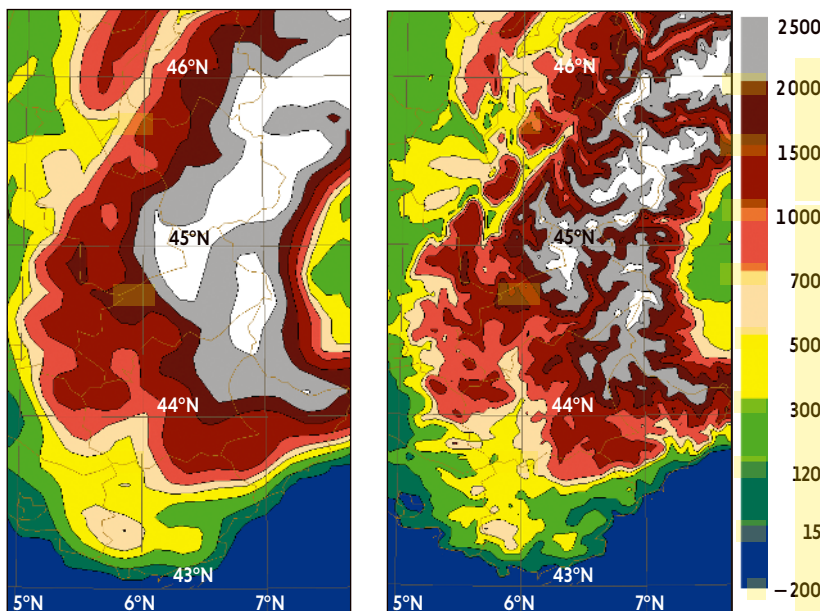
En France, des montées de niveau d'eau de plus de 5 mètres en 1 heure ont parfois été observées. Par ailleurs, les débits spécifiques, c'est-à-dire par unité de surface drainée, des crues observées dans le secteur des Cévennes

détiennent des records à l'échelle européenne et méditerranéenne : des crues atteignant des débits spécifiques de $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^2$ ont déjà été observées sur de petits bassins de quelques kilomètres carrés de surface drainée. Cette valeur représente l'équivalent d'une intensité pluviométrique de 108 millimètres par heure sur l'intégralité de la surface du bassin-versant.

Lorsque ces crues méditerranéennes, rapides et intenses, se forment, il est souvent trop tard pour s'en protéger efficacement. D'où l'importance de systèmes d'alerte permettant d'anticiper le plus possible la réaction des cours d'eau. Le développement de ces systèmes s'est longtemps heurté à plusieurs difficultés. La première, celle de localiser précisément les pluies intenses, a été résolue progressivement au cours des trente dernières années avec le développement des radars météorologiques. La seconde concerne la modélisation de la réaction hydrologique complexe des petits bassins-versants, une difficulté largement liée au manque d'observations du comportement de ces bassins.

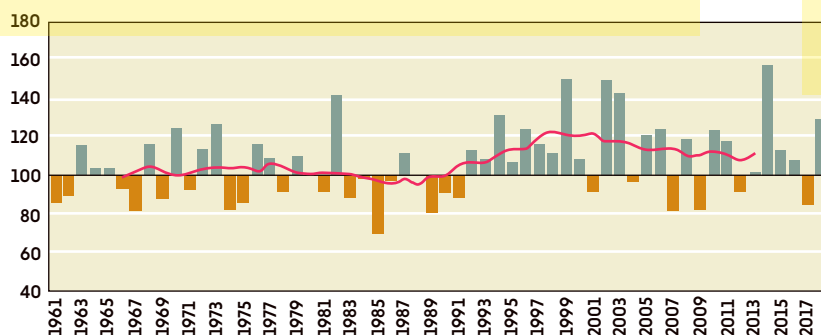
OBSERVER, OBSERVER, TOUJOURS OBSERVER

Durant la dernière décennie, le projet HyMeX, lancé par Météo France et le CNRS, a néanmoins beaucoup contribué à documenter et comprendre la formation des crues sur les petits cours d'eau méditerranéens. Avec comme objectif une meilleure compréhension du cycle de l'eau dans le bassin méditerranéen et une amélioration de la prévision des risques hydrométéorologiques (pluies intenses, crues rapides, vents violents, sécheresses), HyMeX repose sur des observations menées dans trois



Le modèle climatique Arome (à droite) prend en compte de façon beaucoup plus précise le relief que son prédécesseur Arpege (à gauche).

Rapport à la référence 1961-1990
du maximum annuel du cumul
quotidien de précipitations



Le suivi de l'intensité des pluies extrêmes en région méditerranéenne de 1961 à 2017 montre qu'elle augmente (en marron, la moyenne glissante sur 11 ans).

► «compartiments» (air, mer et terre) et à leurs interfaces, ainsi que sur des études dans le domaine des sciences humaines et sociales. La stratégie a été construite autour de périodes de relevés imbriquées à trois niveaux dans le temps et l'espace.

D'abord, une période d'observations à long terme, de 2010 à 2020, sur tout le bassin méditerranéen afin d'étudier le bilan hydrologique et sa variabilité interannuelle. Dans ce cadre, des retours d'expériences hydrologiques et sociologiques sont organisés après des événements majeurs de crues rapides et inondations. Ensuite, durant des périodes d'observations renforcées, les scientifiques se sont concentrés sur des études de bilan d'eau et de certains processus susceptibles de jouer un rôle important dans la formation de phénomènes hydrométéorologiques extrêmes. Par exemple, une première série d'observations de ce type s'est déroulée tous les automnes de 2012 à 2015 sur les bassins du Gard et de l'Ardèche afin de documenter les crues rapides affectant ces bassins. Enfin, des périodes d'observations spéciales de quelques

mois, mobilisant des moyens instrumentaux déployés sur terre, dans les airs et en mer, ont été dédiées à l'étude détaillée des processus clés dans la formation d'événements hydrométéorologiques intenses.

Pendant que HyMeX se déployait, un premier système d'avertissement opérationnel dédié aux crues soudaines a vu le jour en France en 2017. Ce système, Vigicrues Flash, couvre actuellement 30 000 kilomètres de petits cours d'eau. Il repose sur la combinaison des observations pluviométriques des radars météorologiques, et d'un modèle hydrologique reliant pluie et débit afin d'anticiper la réaction des cours d'eau. Par ailleurs, des efforts de recherche importants sont toujours en cours pour rendre les modélisations des petits cours d'eau plus précises et détaillées, ceci afin d'améliorer le niveau d'anticipation des crues rapides méditerranéennes. Ces progrès reposent par exemple sur l'utilisation de modèles météorologiques plus performants, comme Arome, avec lesquels on espère prévoir la localisation des pluies violentes à des échéances de quelques heures.

UNE INTENSIFICATION EN COURS

Ces nouveaux outils seront d'autant plus utiles que, à en croire plusieurs travaux, les épisodes de pluies extrêmes dans le sud de la France vont s'intensifier dans l'avenir en raison du réchauffement climatique. En fait, c'est déjà le cas depuis la décennie 1980. Ainsi, il a été estimé qu'entre le début des années 1960 et la fin des années 2010, les pluies extrêmes se sont accrues de près de 22% dans les régions Méditerranéennes françaises.

Ces travaux se basent sur un très grand nombre de données recueillies par les stations météorologiques de Météo France, offrant un suivi de l'évolution du climat sur le long terme. C'est indispensable, car l'analyse des extrêmes nécessite de longues séries de données pour détecter un éventuel changement, étant donné que ces extrêmes, rares par leur nature, ne représentent que quelques jours par an. On attribue aujourd'hui ces changements d'intensité des pluies extrêmes à l'augmentation des températures, celle-ci étant par ailleurs très nettement détectable dans toutes les régions méditerranéennes. La relation de Clausius-Clapeyron stipule que la quantité maximale d'eau sous forme de vapeur dans l'atmosphère augmente avec la température. Plus précisément, le contenu en vapeur d'eau disponible pour des précipitations augmente en moyenne de 7% par degré Celsius. Cette relation se vérifie tant dans les observations météorologiques que dans les modèles numériques utilisés pour la prévision du climat.

Grâce aux modèles, les chercheurs simulent le climat futur en prenant en compte différents ►