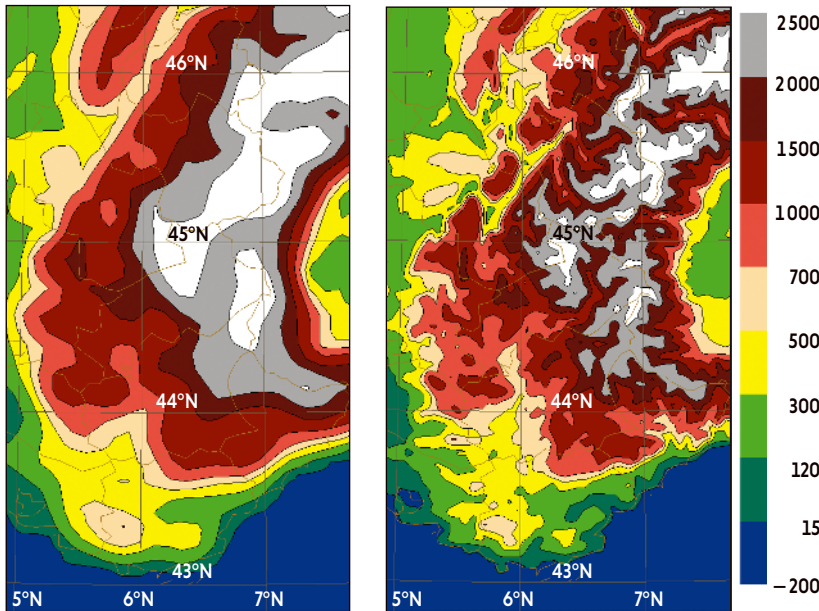
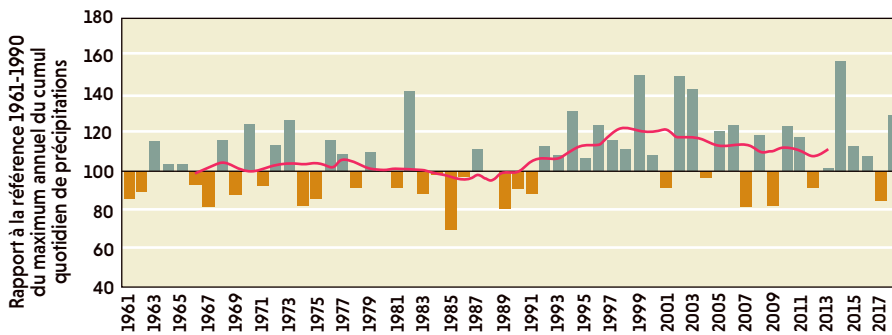




Le modèle climatique Arome (à droite) prend en compte de façon beaucoup plus précise le relief que son prédécesseur Arpege (à gauche).



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.

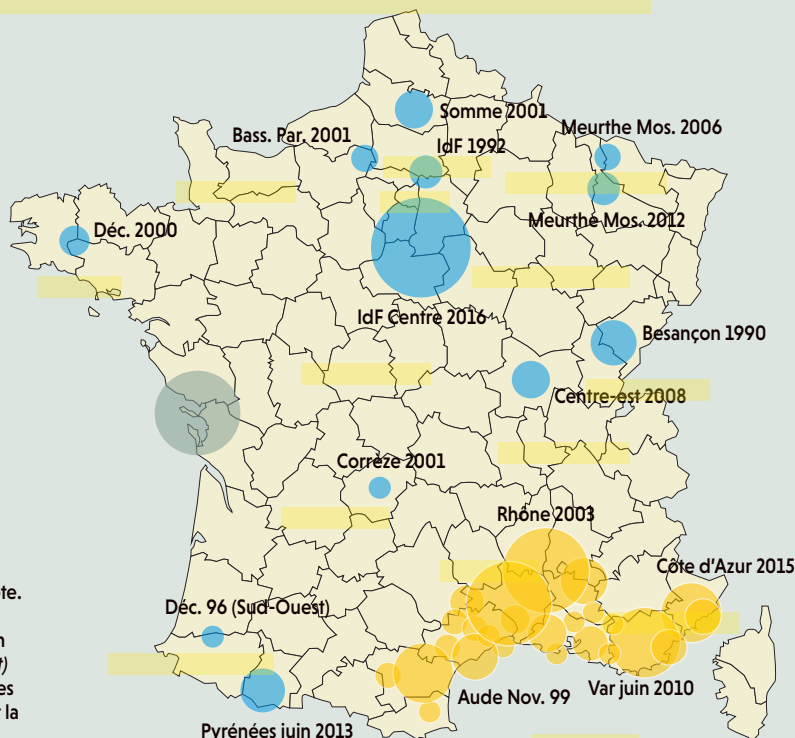
Grâce aux modèles, les chercheurs simulent le climat futur en prenant en compte différents

PLUIES INTENSES ET CRUES EN MÉDITERRANÉE: QUEL BILAN ?

Montant des indemnités versées
(en euros constants 2016)



Le coût des dégâts dus aux inondations pour les assureurs entre 1989 et 2016. Seuls les sinistres supérieurs à 50 millions d'euros sont pris en compte. Les crues sous climat tempéré (*en bleu*) tiennent compte notamment des tempêtes Lothar et Martin de décembre 1999. La submersion marine (*en vert*) est le fait de la tempête Xynthia en février 2010. Les crues méditerranéennes (*en orange*) représentent la majorité des indemnités.



Les phénomènes pluviométriques intenses en Méditerranée engendrent des dommages humains et matériels considérables. À l'échelle du bassin, les rives nord et sud de la Méditerranée sont touchées. Si les bilans par événements se sont réduits dans la partie nord, le Sud est marqué par des événements récents particulièrement meurtriers : crues de l'Ourika, au Maroc en 1995, crues de Bab el Oued, en Algérie en 2001... Selon l'International Disaster Database, entre 1950 et 2020, 29 406 personnes seraient décédées lors d'inondations en Afrique dont 8 281 en Afrique du Nord. En France, la carte du coût économique des crues en Méditerranée est sans appel : 66 % des remboursements des assureurs dans le cadre de la garantie « catastrophes naturelles » ont été versés dans les départements du sud-est de la France entre 1989 et 2016, soit 5,8 milliards d'euros (euros constants 2016). Ces remboursements couvrent les dommages aux logements, aux entreprises et aux automobiles. Il faut doubler la note si l'on prend en compte les dommages agricoles et ceux infligés aux infrastructures : ponts, routes, réseaux d'eau potable, assainissement, réseaux électriques et téléphoniques... On peut donc estimer à 11 milliards d'euros au minimum le coût des crues méditerranéennes en France en vingt-huit ans, soit près de 400 millions d'euros par an. Ce bilan s'explique en partie par le pouvoir destructeur des crues. Entre les crues lentes du nord de l'Europe et les crues torrentielles méditerranéennes, les processus et les effets sont radicalement différents. Les processus à l'œuvre lors des crues méditerranéennes ne sont pas seulement hydrologiques, mais aussi géomorphologiques. Par son débit et la vitesse de son courant, le cours d'eau en crue érode, transporte et dépose une charge alluviale et des embâcles, ce qui se traduit par des ruptures d'ouvrage d'art

(routes, ponts...), des champs de cultures emportés, des habitations détruites. Ainsi a-t-on pu observer dans les Alpes-Maritimes en octobre 2020, des habitations perchées sur des terrasses alluviales à près de 10 mètres au-dessus du lit mineur s'effondrer suite au sapement de la berge. Si de tels événements sont rares en un lieu donné, ils ne sont pas exceptionnels. Ils existent de tout temps et font partie du fonctionnement naturel des zones montagneuses méditerranéennes. En revanche l'augmentation constatée des dégâts est intimement liée à l'augmentation des enjeux dans les zones à risque. Depuis une soixantaine d'années, habitations, zones d'activités et réseaux se sont développés en fond de vallée, accompagnant l'augmentation de la population. Autour du bassin méditerranéen, la population des pays riverains est passée de 281 millions en 1970 à 472 millions en 2010. Et les prévisions atteignent 572 millions en 2030, surtout sur la rive sud et en Turquie. Ce doublement de la population s'est accompagné d'un développement des infrastructures touristiques. Les progrès de la prévention ont du mal à enrayer l'augmentation des dommages. Si l'amélioration de l'habitat et de meilleures prévisions et gestions de crise limitent les impacts humains dans les pays du nord de la Méditerranée, ce n'est pas toujours le cas dans certains pays du sud confrontés à des blocages administratifs et une urbanisation plus anarchique que dans les pays de la rive nord. Pourtant les « gisements préventifs » sont nombreux : la planification urbaine en zone à risque, la réduction des vulnérabilités, l'adaptation du bâti à l'inondation, la généralisation des plans locaux de gestion de crise offrent des perspectives intéressantes de réduction des impacts des crues en Méditerranée. Encore faut-il s'en inspirer.



Les dégâts d'une crue
à Breil-sur-Roya.

► scénarios d'émissions de gaz à effet de serre par les activités humaines. Le Giec en distingue quatre, nommés RCP (pour *representative concentration pathways*) suivi d'un nombre (+ 2,6; + 4,5; + 6; + 8,5) traduisant la modification du bilan radiatif de la Terre par les activités humaines, ce bilan correspondant à la différence entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement infrarouge réémis par la planète.

À l'échelle des bassins-versants méditerranéens, l'augmentation probable des pluies extrêmes est visible et robuste pour le sud de la France, le nord de l'Italie et les côtes Adriatiques, avec un ordre de grandeur des changements projetés qui varie selon les différents modèles de climat et les bassins.

Si l'on peut désormais quantifier l'évolution des cumuls de pluie sur une journée, il est probable que la hausse des températures implique également des changements importants sur les intensités de précipitations horaires liées à des épisodes convectifs orageux. Pour étudier ces phénomènes atmosphériques de petite échelle, de nouveaux modèles climatiques sont en cours de développement. Avec des résolutions spatiales jusqu'alors inédites, ils reproduiront mieux la répartition géographique des précipitations et les extrêmes. Ainsi, dans un avenir proche, des scénarios beaucoup plus précis sur l'évolution possible de ces pluies intenses et de leur localisation seront disponibles.

Concernant les crues, dans le sud de la France, l'augmentation des événements de précipitations extrêmes ne se traduirait pas par une hausse généralisée des épisodes de crues. À l'inverse, à part pour quelques bassins-versants, les simulations révèlent une tendance globale vers une diminution du nombre de crues par an. Pour quelles raisons? La cause serait la diminution de

l'humidité des sols, favorisant l'infiltration de l'eau et compensant ainsi l'augmentation des précipitations extrêmes: la transformation d'un épisode de pluie intense en ruissellement de surface puis en crue est freinée. En effet, dans tous les bassins, une augmentation de la température et de l'évapotranspiration a asséché les sols depuis les années 1950.

DES EFFETS CONTRADICTOIRES

Cependant, lorsque le sol est déjà saturé en eau ou lors de cumuls de pluie très importants sur des courtes périodes, la capacité d'infiltration du sol est fortement réduite. Ainsi pour des changements climatiques comparables à l'échelle régionale (en termes de température et de précipitations extrêmes), les tendances sur les crues dans différents bassins-versants varient selon leur topographie, la végétation, la géologie et le type de sol. Des bassins urbanisés, avec des sols en majeure partie imperméables, ou encore des bassins montagneux avec des fortes pentes favorisant le ruissellement, ne vont pas réagir de la même manière à un épisode de pluie intense que des bassins situés en plaine avec une couverture végétale importante ou des terres agricoles.

Face à l'augmentation de l'urbanisation et de la population habitant dans les régions exposées, il est impératif de mieux comprendre la mécanique des épisodes de pluies extrêmes et des crues qui s'ensuivent. Les efforts déployés par les scientifiques vont dans ce sens et s'accroîtront. Même s'ils doivent s'accompagner d'indispensables nouvelles pratiques en termes d'urbanisme, ils aideront à mieux anticiper les catastrophes et, qui sait, éviter que les drames de Vaison-la-Romaine ou de Saint-Martin-Vésubie ne se reproduisent. ■

BIBLIOGRAPHIE

Q. FUMIÈRE ET AL., Extreme rainfall in Mediterranean France during the fall: added value of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model, *Climate Dynamics*, vol. 55, pp. 77-91, 2020.

A. RIBES ET AL., Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean, *Climate Dynamics*, vol. 52, pp. 1095-1114, 2019.

Y. TRAMBLAY ET S. SOMOT, Future evolution of extreme precipitation in the Mediterranean, *Climatic Change*, vol. 151 (2), pp. 289-302, 2018.

Y. TRAMBLAY ET AL., Detection and attribution of flood trends in Mediterranean basins, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 23 (11), pp. 4419-4431, 2019.

THE MEDITERRANEAN REGION UNDER CLIMATE CHANGE: A SCIENTIFIC UPDATE, Marseille, IRD Éditions, 2016.

L'International Disaster Database: www.emdat.be