

- > que la mer est encore chaude, favorisant une forte évaporation. Ce conflit de masses d'air est source d'instabilité, à l'origine de mouvements verticaux intenses: les masses d'air chaud et humide des basses couches s'élèvent et se refroidissent entraînant la condensation de la grande quantité de vapeur d'eau qu'elles contiennent en nuages d'orage, sources possibles de fortes pluies. Les très forts cumuls de précipitations observés lors des épisodes méditerranéens s'expliquent par la quasi-immobilité des systèmes orageux qui se régénèrent pendant plusieurs heures au-dessus de la même région. Une situation due à plusieurs mécanismes de soulèvement de l'air chaud en altitude.

TROIS SOULÈVEMENTS

Le premier est d'ordre orographique, c'est-à-dire lié aux montagnes. Le Massif central, les Pyrénées, les Alpes ou les sommets corses sont autant de barrières sur lesquelles la masse d'air chaud vient buter et s'élever. Les épisodes cévenols, comme celui de novembre 2011 pendant lequel 1000 millimètres de pluie sont tombés sur l'Ardèche, sont un exemple typique de ce phénomène avec de très forts cumuls de précipitations en quelques jours. Le qualificatif «cévenol», normalement réservé à ce type de soulèvement, est d'ailleurs souvent employé abusivement pour caractériser tout épisode de pluies diluviennes touchant le sud-est de la France.

Le soulèvement résulte aussi parfois de la convergence de vents près de la surface, engendrant des mouvements ascendants stationnaires. Enfin, des bulles d'air froid de surface qui apparaissent essentiellement en raison de l'évaporation des précipitations sous l'orage lui-même ont le même effet. Ces dômes froids agissent comme un relief en soulevant la masse d'air toujours au même endroit. Les orages associés à ce dernier cas se traduisent par de très fortes précipitations, pouvant dépasser les 100 millimètres par heure. Ces deux derniers mécanismes correspondent à des systèmes orageux que l'on rencontre dans des zones de plaine, dès le littoral.

Où en est la prévision des épisodes méditerranéens? Encore délicate parfois en termes de localisation précise et d'intensité, elle s'est améliorée ces dernières années grâce à une meilleure compréhension des phénomènes et l'évolution des outils numériques de prévision et de suivi de ces épisodes.

Une avancée importante a eu lieu en 2008 avec l'utilisation à Météo France d'un modèle de prévision à très haute résolution, Arome, développé suite aux épisodes méditerranéens dramatiques survenus dans les années 1990,

notamment celui qui a entraîné le débordement de l'Ouvèze, à Vaison-la-Romaine, dans le Vaucluse, en 1992. Grâce à la finesse de sa résolution spatiale sur l'hexagone, avec des mailles aujourd'hui de 1,3 kilomètre contre 10 pour son prédécesseur Aladin, Arome est capable de modéliser les mouvements verticaux locaux, et ainsi de mieux simuler les orages.

En pratique, les prévisionnistes peuvent reconnaître une situation atmosphérique favorable à la survenue d'un épisode méditerranéen environ une semaine à l'avance, mais sans pouvoir donner plus de précision à ce stade. Au fil des jours et des sorties de modèles, le scénario se précise. Dans le cas d'un épisode cévenol où le relief, un paramètre stable, joue un rôle prépondérant, la prévisibilité est souvent plus grande. Dans les autres situations, ce n'est qu'à 48 heures d'échéance que la localisation et cumuls attendus se préciseront.

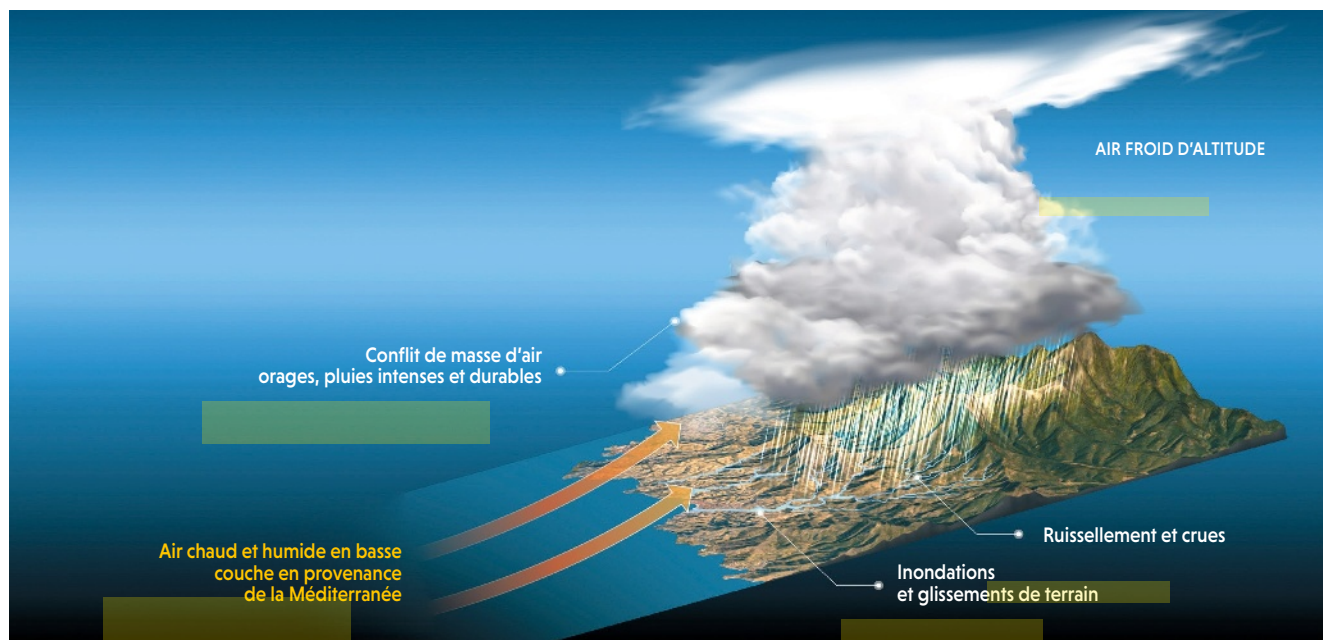
Établie en lien avec le Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations (Schapi) pour la prévision des crues, la carte de vigilance permet d'avertir la population et les services de la sécurité civile si la situation le nécessite. Enfin, lorsque l'événement se met en place, les prévisionnistes assurent le suivi en temps réel grâce aux images satellites, aux radars météorologiques et aux cumuls de précipitations mesurés dans les stations au sol afin d'affiner la prévision.

DU CIEL À LA TERRE

De nouveaux progrès sont attendus dans les années à venir grâce à l'amélioration continue des modèles avec notamment une meilleure intégration des observations ainsi que de nouveaux outils. Les prévisionnistes commencent à utiliser une «prévision d'ensemble» avec le modèle Arome: l'idée est d'utiliser plusieurs scénarios de prévision issus de ce modèle pour mieux caractériser la «prévisibilité» des situations plusieurs jours à l'avance et délivrer des informations probabilistes. De la sorte, les populations et les autorités seront mieux informées pour réagir et éviter les drames survenant essentiellement quand les pluies intenses se transforment en crues. De fait, dans quelle mesure peut-on prévoir le comportement des cours d'eau pour alerter et mettre les personnes en sécurité?

Les réactions des cours d'eau soumis aux pluies intenses méditerranéennes varient notablement dans le temps et l'espace. D'une façon générale, les bassins-versants, c'est-à-dire les surfaces drainées par les cours d'eau, jouent un rôle atténuateur important: ils absorbent une part significative de la pluie, qui s'infiltre et reste provisoirement stockée dans les sols et le

**En France,
des montées de
niveau d'eau de plus
de 5 mètres en
1 heure ont parfois
été observées**



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