Été 2021 : des phénomènes météorologiques marquants dans le monde

Michaël Kreitz¹, Matthieu Sorel²

1. École nationale de la météorologie, Météo-France

2. Direction de la climatologie et des services climatiques, Météo-France

Bien que considéré comme maussade voire « pourri » sur la France (anomalie thermique de +0,4 °C et anomalie pluviométrique de +23 %), l'été 2021 est marqué par de nombreux nouveaux records absolus de températures à travers le monde.

Sur notre territoire (se référer aux résumés climatiques dans ce numéro), le mois de juin connaît une forte anomalie chaude, alors que juillet et août sont en déficit de température. Toutefois, sur la saison complète de l'été météorologique, 2021 est plus chaud que la normale. Mais le climat évolue : il faut remonter à 2014 pour retrouver un été plus froid, les six derniers étés ayant été particulièrement chauds, voire exceptionnels. Ainsi, l'été 2021 se situe presque au niveau du fameux été 1976 (figure 1).

Figure 1. Anomalie de température moyenne estivale en France entre 1947 et 2021, la normale étant calculée sur la période 1981-2010. Source : Météo-France.

Plusieurs records nationaux battus

Côté froid, seulement trois records mensuels nationaux sont battus en juin, juillet et août et aucun record mensuel national absolu. Côté chaud, de très nombreux records mensuels nationaux sont battus sur la période estivale et plusieurs records nationaux absolus battus (tableau 1 et figure 2).

1. <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualitesclimat/ete-2021-en-france-et-dans-le-monde-un-ete-dextremes>

Figure 2. Principaux records nationaux de chaleur battus dans le monde. Source : Météo-France¹.

Tableau 1. Principaux records de températures battus durant l'été 2021. Il s'agit de températures maximales absolues sauf pour quelques cas de températures minimales chaudes absolues signalées par Tn. Les records sont classés par ordre chronologique. Source : <http://www.geoclimat.org/>

Pays	Station	Valeur	Date	Commentaire
Émirats arabes unis	Sweihan	51,8 °C	6 juin	
Oman	Joba	51,6 °C	16 juin	
Canada	Lytton, BC	49,6 °C	29 juin	Maximale absolue au nord de 45° N
Canada	Vancouver, BC	29,0 °C (Tn)	29 juin	Plus haute température minimale jamais enregistrée au Canada. Valeur arrondie à 0,5 °C
Tunisie	Tataouine	35,5 °C (Tn)	30 juin	Plus haute température minimale jamais enregistrée en Tunisie
États-Unis d'Amérique	Furnace Creek, CA	54,4 °C 130°F	9 juillet	Record mondial fiable, non officiel. Selon l'OMM ² le record mondial est de 56,7 °C le 10 juillet 1913, valeur contestée par de nombreux climatologues. Le 16 août 2020, 54,4 °C avaient déjà été relevés (Renaut, 2020) mais il s'agissait de 129,9 °F contre 130,0 °F ici !
Maroc	Sidi Slimane	49,6 °C	10 juillet	Record national fiable égalé
États-Unis d'Amérique	Stovepipe Wells, CA	42,1 °C (Tn)	12 juillet	Plus haute température minimale jamais enregistrée aux États-Unis et en Amérique du Nord. Record mensuel mondial.
Turquie	Cizre	49,1 °C	20 juillet	
Irlande du Nord	Armagh	31,4 °C	22 juillet	
Taiwan	Taimalee	40,6 °C	25 juillet	
Tunisie	Kariouan	50,3 °C	11 août	
Italie	Syracuse, Sicile	48,8 °C	11 août	Ancien record officiel de l'OMM ³ de 48,0 °C à Athènes, Grèce le 10 juillet 1977.
Dominique	Canefield	35,8 °C	12 août	

2. <https://wmo.asu.edu/content/world-highest-temperature>

3. <https://wmo.asu.edu/content/europe-highest-temperature>

Un dôme de chaleur exceptionnel au Canada

L'ouest du Canada (Colombie Britannique) et le nord-ouest des États-Unis (Oregon, Washington) connaissent une vague de chaleur sans précédent en cette fin juin 2021. La mise en place de cet épisode est complexe et sa compréhension nécessite d'examiner la situation météorologique en amont de quelques jours. L'évacuation d'une masse d'air très humide en provenance d'Asie a renforcé le *jet* d'ouest du Pacifique Nord. Sur la figure 3, cela se traduit par un fort gradient de géopotential et d'iso-épaisseur le 23 juin au sud des îles Aléoutiennes. Ce *jet* engendre lui-même une cyclogenèse explosive au large de l'Amérique du Nord jusqu'à l'Alaska, que l'on retrouve autour du 25 juin. En aval du flux, cette cyclogenèse engendre un déferlement anticyclonique d'ondes de Rossby prenant la forme d'un *breaking event* (figure 4). Concrètement, une dorsale de hautes valeurs (pression, géopotential, température) se met en place à tous les niveaux (on la devine dès le 25 juin sur les côtes ouest américaines et canadiennes) avant de se positionner sur l'ouest du Canada et des États-Unis. Le géopotential est extrêmement élevé en altitude, approchant même la valeur de 6 000 mètres géopotentiels (mgp), ainsi que les iso-épaisseurs (valeurs supérieures à 5 920 mgp) selon les analyses des 27 et 29 juin : un « dôme de

chaleur » (encadré 1) se crée et persiste plusieurs jours sur cette région d'Amérique du Nord. La pression n'est pas si élevée en surface car l'effet thermique peut jouer (l'air chaud est plus léger et donc la pression réduite au niveau de la mer est moins élevée).

Les rétro-trajectoires (figure 5a, Stein *et al.*, 2015) confirment effectivement ces évolutions successives. Pour ce faire, des particules sont placées le 29 juin à 23 h TU sur la ville de Vernon (Colombie britannique) aux altitudes de 500, 1 000 et 2 000 mètres.

Figure 3. Pression réduite au niveau de la mer (Pmer, isolignes blanches), Géopotential au niveau 500 hPa (plages de couleurs), épaisseur 500-1 000 hPa (décimètres géopotentiels, damgp, isolignes noires) analysées du 23 au 29 juin 2021 par le modèle américain GFS (Global Forecasting System) sur l'ouest de l'Amérique du Nord. Source : <http://www1.wetter3.de/>

1. Dôme de chaleur

Le terme « dôme de chaleur », arrivé cet été dans les médias n'est pas une appellation météorologique, ni un phénomène nouveau. Il s'agit d'une vaste zone anticyclonique (surtout en altitude) en période estivale persistant plusieurs jours. Concrètement, l'anticyclone est stable et très puissant. Les perturbations et le courant jet sont rejetés plus au nord du dôme formant une circulation de blocage, dite en oméga. Une puissante subsidence (réchauffement adiabatique par compression) a lieu, accentuant chaque jour la température.

En remontant le temps, leur origine est mise en évidence. Provenant du Pacifique Est où le courant perturbé sévissait quelques jours avant, elles franchissent ensuite les montagnes Rocheuses avec une évidente courbure anticyclonique. De plus, il ressort bien que ces particules proviennent

d'altitudes bien plus élevées (plus de 6 000 mètres quelques jours avant). Elles subissent une subsidence progressive qui s'accroît durant les 48 dernières heures, au franchissement du relief. Il y a donc probablement une double cause à cette très nette et durable subsidence. Le radiosondage de Vernon (à quelques dizaines de kilomètres de Lytton seulement) illustre cette subsidence par une courbe d'état (courbe des températures) qui vient s'aligner sur une adiabatique sèche (courbes inclinées à environ 45°) jusqu'à 650, voire même 500 hPa (figure 5b) !

La présence de ce dôme de chaleur exceptionnel se traduit par de nombreux records absolus de températures au Canada et aux États-Unis. Le record national du Canada est battu plusieurs jours de suite pour finalement arriver à la valeur finale

de 49,6 °C à la station de Lytton (figure 6) en Colombie Britannique (le précédent record absolu national était de 45,0 °C enregistré à Midale et Yellow Grass, État de Saskatchewan, en 1937). Cette valeur est saisissante de par la différence avec le précédent record et par sa proximité avec la barre symbolique des 50 °C, alors que cette station est proche des 50° N de latitude. D'ailleurs, cette valeur est un record pour l'ensemble des régions situées au nord du 45° parallèle. Pour replacer cette valeur dans son contexte, le record absolu de température au Canada est le même que celui du Maroc, lui aussi battu au cours de cet été 2021. Le 1^{er} juillet, cette même ville de Lytton a été partiellement dévastée par un incendie. Ironie du

4. <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>
5. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Figure 4. Schémas types de déferlement d'ondes de Rossby illustrant la distribution des hautes (high) et basses (low) pressions de part et d'autre du courant jet. Source : Mansouri Daneshvar et Freund, 2019.

Figure 6. Station de Lytton en Colombie britannique. Source : Thierry Goose.

Figure 5. (a) rétrotrajectoires calculées à la verticale de Vernon, en partant d'une altitude de 500 m (rouge), 1 000 m (bleu) et 2 000 m (vert) le 29 juin 2021 à 23 h TU. Source : NOAA Air Resources Laboratory⁴. (b) Radiosondage réalisé à Vernon le 30 juin 2021 à 0 h TU. Source : université du Wyoming⁵.

sort, la station météorologique enregistrant ce record a été épargnée par les flammes.

La nuit du 29 juin, la station Burnaby de l'université SFU dans l'agglomération de Vancouver enregistre une température minimale nocturne de 29,0 °C (valeur arrondie à 0,5 °C), nouveau record absolu de température minimale pour le Canada. La station de Quillayute (État de Washington, États-Unis) pulvérise son record absolu de plus de 6,1 °C. Selon Maximiliano Herrera, un célèbre climatologue, il s'agit de la plus grosse différence au niveau mondial entre la première et la seconde plus haute valeur mesurée par une station détenant une longue période de données, *ex aequo* avec la station de Steel

Tableau 2. Inondations les plus coûteuses en Europe sur la période 1980-2020. Source : Munich Re.

Date	Phénomènes	Pays concernés	Pertes (milliards d'euros)	Bien assurés (milliards d'euros)	Victimes
Août 2002	Inondations et crues éclair	Allemagne, Autriche, République Tchèque, Hongrie, Suisse, Slovaquie	22,496	4,916	39
Octobre 2000	Inondations et glissements de terrain	Italie et Suisse	13,518	0,799	38
Novembre 1994	Inondations et crues éclair	Italie	12,591	0,088	68
Juillet et août 1997	Inondations	Pologne, République Tchèque, Allemagne, Autriche Slovaquie	10,437	1,444	118
Mai et juin 2013	Inondations	Allemagne, Autriche, République Tchèque, Suisse, Hongrie	10,219	2,424	25

Figure 7. Régions d'Europe les plus concernées par les inondations du 14 juillet avec bilan provisoire en date du 16 juillet 2021 et esquisse des cumuls de précipitations sur trois jours. Source : JRC pour l'Union européenne.

Figure 8. Anomalies de précipitations mensuelles (en mm/jour) de mai à juillet 2021. Source : <https://climate.copernicus.eu/>

(Dakota du Nord, États-Unis). La station de Montpellier-Fréjorgues avait battu son record absolu de $+5,8^{\circ}\text{C}$ lors de la canicule de juin 2019 et arrive pour l'instant au 4^e rang mondial de ce classement déconcertant. Les villes de Seattle (mesures depuis 1870) et de Portland (mesures depuis 1890) battent elles aussi leur record absolu avec respectivement $42,2^{\circ}\text{C}$ (station très proche de la mer) et $46,7^{\circ}\text{C}$.

Inondations en Allemagne autour de la mi-juillet

Au-delà des valeurs remarquables de températures, l'été s'est accompagné d'épisodes pluvieux intenses, aboutissant à des inondations exceptionnelles. Les images venant d'Allemagne et du Benelux ont marqué les esprits. En effet, le 14 juillet, des pluies abondantes se déversent entre le nord-est de la France, l'Allemagne et le Benelux. Il est relevé pour ce jour-là jusqu'à 150, voire 200 mm en Allemagne, dans les régions de Rhénanie-du-Nord-Westphalie et Rhénanie-Palatinat au-

Figure 9. Géopotential (isolignes bleues en dampp), températures (couleurs) à 500 hPa et Pmer (isolignes marrons) analysées par Arpège le 14 juillet 2021 à 18 h TU. Source : Météo-France.

tour de la ville de Cologne et, dès la veille, plus de 80 mm sont tombés localement. Les records de pluie en 24 heures sont pulvérisés. La figure 7 donne une représentation des régions les plus touchées, du bilan provisoire, ainsi que des moyens d'intervention mis à disposition par l'Union européenne en date du 16 juillet.

Le bilan définitif est extrêmement lourd avec près de 200 victimes en Allemagne et 40 en Belgique. Les dégâts sont difficilement chiffrables et aujourd'hui estimés à plus de 30 milliards d'euros. Selon la compagnie d'assurances Munich Re, il s'agirait des inondations les plus coûteuses en Europe depuis 1980 (tableau 2).

Figure 10. Analyse sur l'Europe et l'Atlantique Nord de la situation : (a) du 7 juillet 2001, (b) du 21 mai 2012. Source : www.wetterzentrale.de

Figure 11. Géopotential à 500 hPa (isolignes bleues), Pmer (isolignes jaunes), vent au niveau 850 hPa (symboles) et eau précipitable analysés par Arpège le 14 juillet 2021 à 18 h TU. Source : Météo-France.

Ces inondations se produisent à la suite d'une succession de situations météorologiques favorables. Déjà, les mois de mai et juin sont particulièrement arrosés en Allemagne et sur les pays limitrophes, surtout ceux situés

en amont du bassin-versant complet du Rhin (figure 8). Le mois de juillet, en incluant ces précipitations, ne déroge pas. À grande échelle, les excédents sont souvent entre +20 et +40 % pour chacun de ces mois, avec des excédents nettement plus marqués localement.

Mais dans un contexte où les sols sont déjà humides, c'est un événement météorologique particulier qui est à l'origine de ces inondations. Il s'agit d'une goutte froide. Ce terme est employé pour décrire une dépression d'altitude (on parle de bas géopotential) qui s'isole du courant perturbé circulant vers des latitudes plus hautes. On peut également parler de *cut-off*. D'un point de vue physique, un bas géopotential est associé à de l'air froid d'altitude. Ici, la goutte froide est étendue et marquée, bloquée sur l'arc alpin entre une dorsale sur les îles Britanniques et une autre sur l'Europe de l'Est (figure 9). Elle est caractérisée par un bas géopotential de 568 damgp et une température inférieure à -16°C à 500 hPa.

En saison estivale, cet air froid d'altitude entraîne un temps souvent instable. Bloquée entre des valeurs de géopotential plus élevées, une goutte

froide engendre des précipitations notables sur plusieurs jours. En particulier, ses quadrants nord à ouest sont à surveiller attentivement au regard de cet enjeu. En effet, si la goutte froide est suffisamment étendue, elle va réussir à advecter de l'air chaud des latitudes plus au sud qui va venir la contourner jusqu'à son flanc ouest. Ce type de configuration est à l'origine de précipitations historiques exceptionnelles en France (figure 10) :

- nuit du 6 au 7 juillet 2001⁶ : 110 mm relevés en 24 heures à la station de Paris-Montsouris, dont 85,0 mm en 6 heures, 50,2 mm en 2 heures et 33,3 mm en 1 heure, ou encore 121 mm à Bagneux ;
- 21 mai 2012⁷ : la station de Nancy enregistre 25,6 mm en 15 minutes, 43,0 mm en 30 minutes, 49 mm en 1 heure et 94,9 mm en 3 heures ;
- fin mai 2016⁸ : inondations remarquables au nord de la Loire avec plus de 80 mm relevés en 4 jours sur Paris-Montsouris et 130 mm sur Orléans.

6. <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Orage-sur-Paris-et-la-Petite-Couronne.html>

7. <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Orage-violent-sur-Nancy.html>

8. <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Inondations-sur-Paris-et-en-region-Centre.html>

Figure 12. Profil vertical réalisé sur le flanc ouest de la goutte froide, là où les cumuls de précipitations sont les plus intenses, pour le 14 juillet 2021 à 18 h TU, base Arpège de 0 h TU. Source : Météo-France.

Figure 13. Lames d'eau radar quotidiennes (à droite) et cumulées sur trois jours (à gauche) du 12 au 14 juillet 2021 en Allemagne. Source : DWD.

Pour la situation de l'été 2021, les valeurs d'eau précipitable s'enroulent autour du minimum (figure 11) et sont exceptionnelles pour la région, dépassant les 40 mm. En raison d'un flux plus modéré en altitude et d'une dépression en surface sur ce secteur (décalage habituel des centres d'action entre surface et altitude), des précipitations pluvio-instables à caractère durable sont à redouter, souvent modulées par l'évolution diurne.

Les profils verticaux (figure 12) ne semblent pas élevés d'un point de vue thermique seul. Il faut alors regarder la température potentielle pseudo-adiabatique T'_w ou la température du point de rosée T_d , qui comparées à la température, donnent une indication de l'humidité relative. On voit alors un profil effectivement instable et saturé sur presque toute l'épaisseur en réponse à l'advection chaude et au long soulèvement synoptique

autour de la goutte froide, confirmant le potentiel précipitant de la masse d'air.

Les cumuls quotidiens de précipitations marquent bien l'évolution du temps pluvio-instable autour de la goutte froide durant les trois jours (figure 13). D'abord sur la vallée du Rhin vers l'Alsace, les précipitations les plus fortes ceignent ensuite une tranche centrale du pays,

Figure 14. Suivi tri-horaire des réflectivités radar le 14 juillet de 6 h à 15 h TU. Source : Météo-France.

Figure 15. Trajectoire suivie par *Ida* et intensité associée. Source : Plymouth State Weather Center.

avant de redescendre vers le sud-ouest. La faible mobilité de ces pluies instables vient accentuer les cumuls de précipitations sur la période, de même que la présence probable d'orages avec des quantités localement plus élevées.

Enfin, en suivant la journée du 14 juillet à l'aide des images radar (figure 14), le retour pluvio-instable est étendu et très actif. Il ne se décale que très lentement vers le sud-ouest en suivant l'enroulement cyclonique des vents autour de la goutte froide. Puis, à 12 et 15 h TU, des réflectivités plus intenses (couleur rouge) sont noyées dans la masse. Il s'agit d'orages apparaissant au cœur de ce retour pluvieux par (petite) évolution diurne.

Figure 17. Données de stations météorologiques dans une partie de l'est des États-Unis, incluant les températures du point de rosée le 2 septembre 2021 à 0 h TU. Source : Météo-France.

Figure 18. Records de pluies horaires à New York, station de Central Park. Source : Source : NOAA/NWS.

Figure 16. Pmer (isolignes marron), vent à 10 mètres (symboles) et eau précipitable (couleurs, échelle proposée en figure 11). Analyses Arpège du 29 août au 3 septembre 2021. Source : Météo-France.

Ida : pluies record sur New York

Dans les phénomènes précipitants extrêmes de l'été, le cyclone *Ida* tient une place à part. Ce système tropical se forme dans les Caraïbes, à proximité de la Jamaïque. Le stade de tempête tropicale est atteint le 26 août (figure 15). *Ida*

remonte vers le nord-nord-ouest en se renforçant. C'est en traversant le golfe du Mexique que son creusement devient brutal en atteignant la catégorie 4 et une valeur au centre estimée à 929 hPa juste avant de toucher terre en Louisiane. *Ida* perd ses caractéristiques de système tropical au fur et à mesure de sa progression dans les terres en remontant le Mississippi.

Même si la dépression associée aux restes d'*Ida* est très peu profonde (et donc peu venteuse), il s'agit avant tout d'une remontée d'air très chaud et humide, avec un fort potentiel précipitant. Les valeurs d'eau précipitable dépassent même les 50 mm sur une grande partie de l'Est américain (figure 16). De même, les observations enregistrées indiquent des points de rosée compris entre 22 et 24 °C (figure 17) !

Figure 19. Cumuls de pluie observés en 48 heures au passage des restes d'*Ida* autour de New York. L'échelle de couleur des précipitations est en pouces (1 pouce = 25,4 mm). Source : Noaa/NWS.

Ainsi, lorsque les « restes » d'*Ida* traversent la région et la ville de New York, les pluies sont intenses. Les cumuls de pluie sur une heure pulvérisent les records (figure 18) avec 3,15 pouces (80 mm) alors que l'ancien record n'était que de 1,94 pouce (49 mm). De plus, parmi les dix records de pluie en une heure, trois proviennent de l'année 2021 et la plupart se sont produits durant les dernières années. Ainsi, dans une période où les sols sont déjà bien humides, ces intensités record entraînent des inondations et des débordements en toutes zones (rurales et urbaines). Sur l'État de New York, les cumuls au passage d'*Ida* avoisinent les 250 mm (figure 19). Entre le passage cyclonique sur la Louisiane, les inondations et la présence de tornades, les dégâts sont estimés à plus de 50 milliards de dollars.

Bibliographie

Mansouri Daneshvar M.R., Freund F., 2019. Examination of a relationship between atmospheric blocking and seismic events in the Middle East using a new seismo-climatic index. *Swiss Journal of Geosciences*, 112. doi: 10.1007/s00015-019-00343-4

Renaut D., 2020. 54,4 °C : la vallée de la Mort mérite bien son nom. *La Météorologie*, 111. doi:10.37053/lameteorologie-2020-0082

Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F., 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 2059-2077. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1