

# Les vagues de chaleur en France : analyse de l'été 2015 et évolutions attendues en climat futur

## Résumé

Une nouvelle méthode d'identification des vagues de chaleur a été mise au point dans le cadre du projet **Extremoscope pour le recensement des événements aux différentes échelles spatiales et temporelles en France**. Son application sur l'été 2015 permet de mettre en évidence la forte variabilité régionale des vagues de chaleur et l'intérêt de considérer leur dimension spatiale. L'inventaire des vagues de chaleur par département depuis 1959 permet d'établir une climatologie et d'analyser les tendances. En climat futur, l'étude des différents scénarios de concentration de gaz à effet de serre confirme la poursuite et quantifie l'aggravation attendue des vagues de chaleur au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, mais l'intensité de l'évolution dépendra fortement des politiques climatiques mises en œuvre.

## Abstract

### Heat waves in France : Analysis of the summer 2015 and expected evolutions under climate change

A new method for analysing the heat waves in France has been defined in the framework of the **Extremoscope project to identify heat waves at different spatial and temporal scales over France**. Its application on the events of summer 2015 shows a strong spatial variability of the heat wave intensity and the importance to take into account their spatial dimension. The inventory since 1959 of regional heat waves makes it possible to establish climatologie and analyze trends. For the future, whatever the considered scenario about greenhouse gases concentration, the number and the severity of heat waves in France will increase during the 21<sup>st</sup> century but the intensity of the evolution will strongly depend on implemented climate policies.

Jean-Michel Soubeyrou<sup>1</sup>, Gaëlle Ouzeau<sup>2</sup>, Michel Schneider<sup>1</sup>, Olivier Cabanes<sup>3</sup>, Raphaëlle Kounkou<sup>4</sup>

- 1 Direction de la climatologie et des services climatiques, Météo-France, Toulouse
- 2 Centre national de recherche météorologique, Météo-France, Toulouse
- 3 Direction interrégionale Sud-Ouest, Météo-France, Mérignac
- 4 Direction interrégionale Île de France-Centre, Météo-France, Saint-Mandé

jean-michel.soubeyroux@meteo.fr

Les vagues de chaleur font partie des extrêmes climatiques les plus préoccupants au regard de la vulnérabilité de nos sociétés et de l'évolution attendue de leur fréquence et leur intensité au XXI<sup>e</sup> siècle (IPCC, 2013). La France a été particulièrement éprouvée par la canicule de l'été 2003 qui a provoqué une surmortalité d'environ 15 000 décès entre le 4 et le 18 août directement attribuables à la chaleur (Poumadère *et al.*, 2005). Depuis 2003, d'autres vagues de chaleur, moins intenses, se sont produites en métropole (juillet 2006, août 2012, juillet 2013) : elles ont permis de développer les outils de prévention de ces aléas (système de vigilance météorologique, plans de veille sanitaire) et de leur analyse en temps réel. L'été caniculaire 2015, à l'origine d'une surmortalité importante évaluée à 3 300 décès pour la France (note INVS du 15/09/2015) a permis de montrer l'apport de ces nouvelles méthodes de caractérisation des vagues de chaleur dans un contexte de changement climatique.

De nombreuses autres régions du monde ont subi successivement des vagues de chaleur sévères ces dernières années (Russie en 2010, Texas en 2011, Australie en 2012) et leur lien avec le réchauffement climatique global a été démontré (Otto *et al.*, 2012). Il ne fait aucun doute que ces événements extrêmes, dont la probabilité d'occurrence a fortement augmenté avec la hausse des températures

estivales, seront communs en Europe au-delà de 2040 (Christidis *et al.*, 2014). En France, Ouzeau *et al.* (2014) annoncent un doublement possible du nombre de vagues de chaleur estivales en milieu de siècle et une augmentation encore plus importante en fin de siècle.

Ce diagnostic partagé cache cependant une difficulté relative à l'identification précise de ces événements : il n'existe pas de définition universelle des vagues de chaleur. Elles sont habituellement identifiées comme des périodes où des températures anormalement élevées sont observées pendant plusieurs jours consécutifs, mais les critères utilisés pour leur identification et leur qualification sont multiples.

La température considérée peut concerner les données quotidiennes maximales, minimales, moyennes ou une combinaison des trois. Le caractère anormal de la température peut être identifié selon un écart à la moyenne climatologique (de +5 °C pour l'indicateur utilisé dans le projet européen Stardex<sup>1</sup> ou de +6 °C selon les préconisations du projet Clivar<sup>2</sup> de l'Organisation mondiale de la météorologie), le dépassement d'une valeur seuil ciblant les températures maximales extrêmes (30 ou 35 °C selon

1. Stardex (2002-2005) : *Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions*. <https://crudata.uea.ac.uk/projects/stardex/>  
2. Clivar : *Climate and Ocean: Variability, Predictability and Change*. [www.clivar.org](http://www.clivar.org)

les pays et les climats) ou d'un centile<sup>3</sup> de leur distribution. La durée minimale d'un événement peut aussi varier, selon les indices, entre 3 et 6 jours, et une moyenne glissante sur plusieurs jours peut être prise en compte.

La finalité de l'indicateur a aussi son importance et le système de vigilance météorologique français s'appuie sur des seuils départementaux de température définis par l'Institut national de veille sanitaire correspondant à des niveaux de risque sanitaire pour les populations. D'autres indicateurs tels que le *Heat Wave Magnitude Index* (Russo *et al.*, 2014) ont été proposés pour comparer les vagues de chaleur dans l'espace (toute région du monde) et dans le temps (toute l'année) et analyser les effets du réchauffement climatique.

Un outil d'identification des vagues de chaleur (et de froid) a été mis en place par Météo-France en 2006 (Schneider et Dandin, 2012) pour répondre aux exigences du suivi climatique, c'est-à-dire pour la qualification en temps réel de ces événements. Contrairement à la vigilance météorologique, cet outil vise la caractérisation globale de l'aléa plutôt que celle de ses conséquences dans un domaine particulier. Il s'appuie sur la température moyenne quotidienne en métropole, différents critères permettant d'identifier le début, la fin et l'intensité d'un épisode.

Dans le cadre du projet Extremoscope soutenu par le ministère de l'Environnement (voir encadré), cette méthode a été consolidée pour être applicable à toutes les échelles spatiales, tant en climat présent qu'en climat futur, et de nouveaux jeux de données ont été sélectionnés pour son application.

## Méthode et jeux de données pour l'analyse des vagues de chaleur

### Évolution de la méthode d'identification des vagues de chaleur

L'identification opérationnelle des vagues de chaleur à Météo-France s'appuie aujourd'hui sur l'indicateur thermique national issu de la moyenne

## Le projet Extremoscope (2013-2016)

### Objectifs

L'objectif général de ce projet est d'accroître la connaissance des événements extrêmes et de leur lien au changement climatique, grâce aux développements récents de la recherche. Les objectifs spécifiques sont :

- de développer et d'évaluer de nouvelles méthodes d'attribution pour les événements extrêmes ;
- de développer des indicateurs permettant une meilleure interprétation des événements extrêmes dans un cadre climatique, et une méthodologie permettant de replacer les événements dans les contextes climatiques passés, présent et projetés pour le XXI<sup>e</sup> siècle selon plusieurs scénarios ;
- de décrire de nouvelles méthodes et nouveaux modes de visualisation pouvant être mis en œuvre, à la suite du projet, au sein de services climatiques nationaux, avec des échelles de temps allant de quelques jours à un an.

### Description du projet

L'ensemble des travaux est mené en partenariat entre l'IPSL (Institut

Pierre-Simon Laplace) et Météo-France. Ils se répartissent en trois volets :

- développement de nouvelles méthodes pour l'attribution d'événements singuliers. Ces méthodes sont destinées à évaluer dans quelle mesure la probabilité d'occurrence d'un événement climatique a pu et/ou pourra évoluer sous l'influence d'un forçage anthropique ;
- développement de diagnostics pour l'interprétation. Le choix des diagnostics analysés dans le projet est guidé par la possibilité de leur calcul à partir des observations ou de réanalyses d'une période couvrant au moins les cinquante dernières années, et par une évaluation de la capacité des modèles climatiques et des méthodes de descente d'échelle à les reproduire sur cette période ;
- développement d'un démonstrateur. Celui-ci concernera les événements extrêmes principaux les plus récents, comprendra le développement d'un site internet et résultera dans une proposition d'organisation d'une activité de service de type pérenne.

des mesures quotidiennes de température moyenne de l'air dans 30 stations météorologiques réparties de manière équilibrée sur le territoire métropolitain et sélectionnées à partir des travaux sur l'homogénéisation (Gibelin *et al.*, 2014).

La méthode comporte trois paramètres (figure 1), dont les valeurs ont été déterminées de manière experte :

- *Spic*, seuil de pic de chaleur servant à détecter un événement (26 °C sur 1 jour ou 25 °C sur 3 jours) ;

- *Sdeb*, seuil de démarrage et fin de la vague de chaleur (23 °C, sans période de 3 jours consécutifs en dessous du seuil)

- *Sint*, seuil d'interruption (20 °C) interrompant un épisode si la température descend sous ce seuil, même une seule journée.

Ainsi définie, cette approche événementielle permet un inventaire détaillé des différentes vagues de chaleur rencontrées en France depuis 1947 (figure 2) avec pour chaque

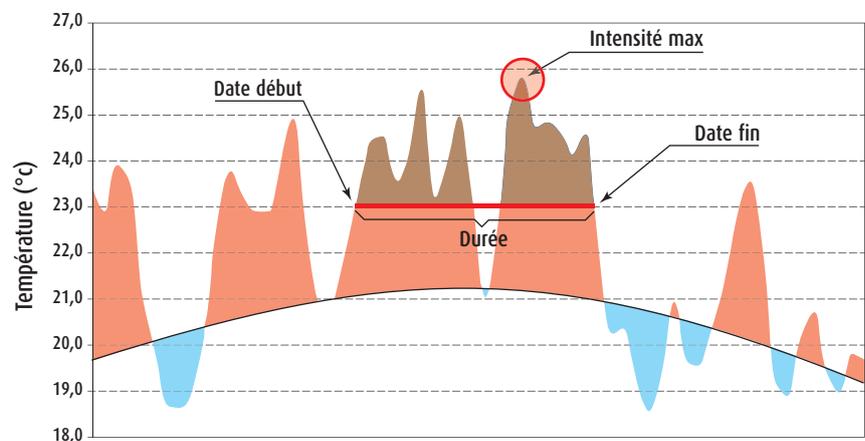


Figure 1. Caractérisation d'une vague de chaleur à partir de l'indicateur thermique quotidien sur la France en durée (date de début et de fin), intensité maximum (cercle rouge) et sévérité (aire colorisée en marron).

3. Par exemple, le centile 99 correspond à la valeur supérieure à 99 % de la distribution : seules 1 % des valeurs lui sont supérieures.

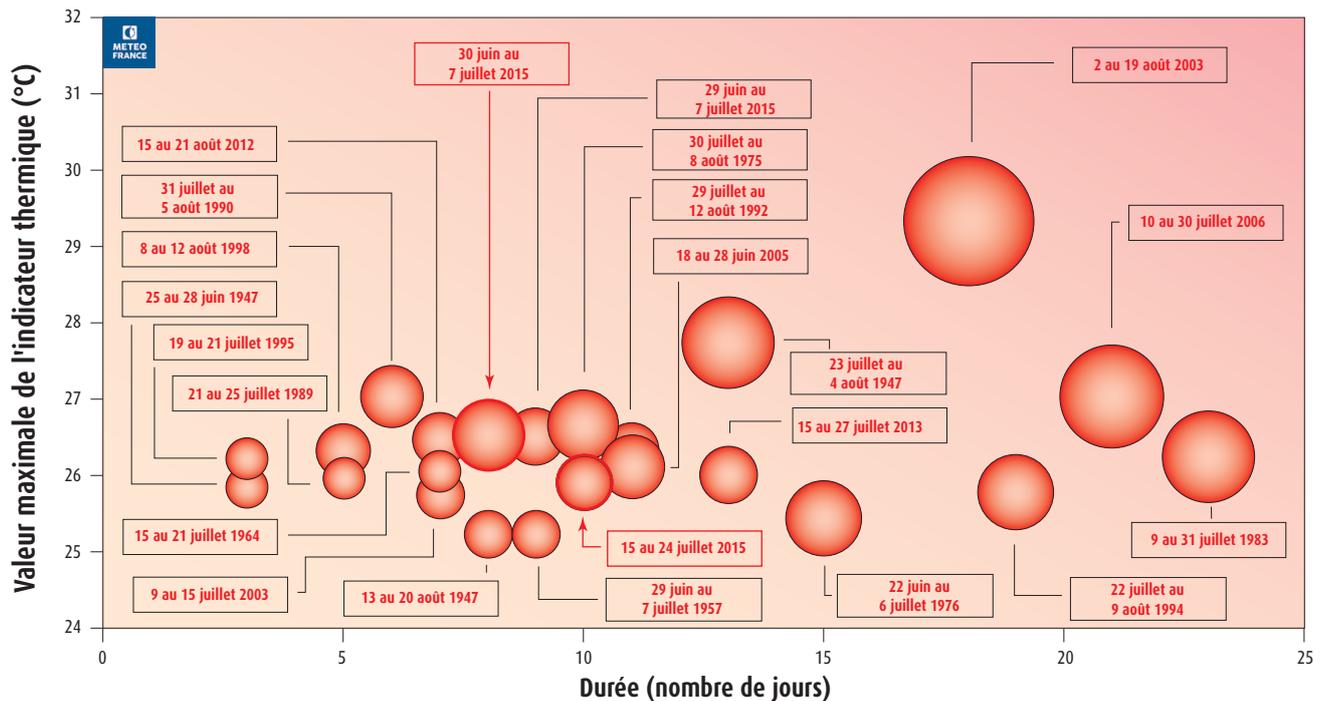


Figure 2. Recensement national des vagues de chaleur en France de 1947 à 2015 selon la méthode opérationnelle basée sur l'indicateur thermique national. La surface des bulles indique la sévérité des vagues de chaleur. Les deux vagues de chaleur de l'été 2015 sont mises en exergue par un cercle rouge.

épisode la durée en jours de l'épisode (ainsi que le début et la fin), l'intensité maximum (valeur quotidienne maximale de la température moyenne) et la sévérité (somme des écarts positifs entre températures moyennes quotidiennes pendant la vague de chaleur et le seuil de démarrage *Sdeb*).

La figure 2 met en évidence à l'échelle nationale les vagues de chaleur les plus longues (le long de l'axe des abscisses) – respectivement juillet 1983, juillet 2006 et juillet 1994 –, les plus intenses (le long de l'axe des ordonnées) – août 2003, juillet 1947 et juillet 2006 – et les plus sévères (taille des bulles) : août 2003, juillet 2006 et juillet 1947. Les deux vagues de chaleur de l'été 2015 (du 30 juin au 7 juillet, puis du 15 au 24 juillet) sont mises en évidence. Cependant, l'utilisation de seuils absolus limite l'application de cette méthode au seul niveau national et ne permet pas d'analyse spatiale des événements.

Afin d'être généralisable à toute série climatologique de température moyenne, les trois paramètres de la méthode ont été recalés sur les centiles de la distribution annuelle, établis pour une période trentenaire de référence. Il a été déterminé que les seuils empiriques définis au niveau national correspondaient (aux arrondis près) aux centiles extrêmes suivants de la distribution quotidienne de température moyenne pour la période de

référence 1981-2010 : centile 99,5 pour *Spic*, centile 97,5 pour *Sdeb* et centile 90 pour *Sint*.

### Évaluation et sensibilité de la nouvelle méthode à la période de référence utilisée

La validation objective d'une méthode d'identification des vagues de chaleur est difficile en l'absence de données permettant d'établir l'occurrence d'un événement. L'objectif de la méthode étant d'identifier des événements aux échelles régionales, des validations expertes ont été menées sur deux zones du territoire métropolitain (Sud-Ouest et Nord) disposant d'un indicateur thermique quotidien depuis 1947, issu d'un sous-ensemble de stations utilisées pour l'indicateur thermique national. Pour la généralisation de la méthode, des améliorations ont été apportées pour mieux cibler les événements extrêmes :  
 – une réévaluation du paramètre *Sint* : utilisation du centile 95 (plutôt que 90) pour être toujours supérieur à la normale quotidienne des températures moyennes ;  
 – un filtrage sur la durée des événements (5 jours minimum) ;  
 – la normalisation de la sévérité (par l'écart entre les seuils *Spic* et *Sdeb*) afin de pouvoir comparer les différentes séries.

Le recensement proposé par la nouvelle méthode est comparé avec une extraction de l'ensemble des épisodes ayant occasionné des records mensuels de chaleur (rangs 1 à 3) sur les différentes séries longues de températures maximales et minimales disponibles sur la zone : environ 40 stations sur la période 1981-2010. L'objectif principal est de vérifier la bonne détection des événements significatifs au niveau régional.

Pour le sud-ouest de la France, vingt-deux événements sont identifiés par notre nouvelle méthode statistique, dont sept épisodes sont identifiés pour avoir généré des records de chaleur simultanés sur un nombre important de stations (au moins dix records par épisode) : cinq de ces sept épisodes correspondent à des vagues de chaleur recensées par la nouvelle méthode. Les deux autres ne correspondent pas aux critères qui définissent une vague de chaleur : durée inférieure à 5 jours pour le premier (juillet 1968) et température minimale fraîche pour le second (septembre 1987).

Le même travail mené pour le nord de la France (y compris Paris) amène à des conclusions proches : vingt-et-un événements sont identifiés par la méthode statistique. Les épisodes ayant généré un nombre important de records non compris dans la sélection précédente

Tableau 1. Température moyenne, seuil *Spic* et nombre de vagues de chaleur identifiées avec l'indicateur thermique national sur la période 1947-2014 selon quatre périodes de référence prises en compte.

| Référence                        | 1951-1980 | 1961-1990 | 1971-2000 | 1981-2010 |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Température moyenne              | 11,7 °C   | 11,8 °C   | 12,2 °C   | 12,6 °C   |
| Seuil <i>Spic</i> (centile 99,5) | 24,1 °C   | 24,4 °C   | 24,8 °C   | 25,3 °C   |
| Nombre de vagues de chaleur      | 56        | 50        | 41        | 18        |

ont connu des durées inférieures à 5 jours ou des températures minimales non exceptionnelles. L'épisode de juin-juillet 1952 présente de fortes températures minimales et maximales qui ne sont pas concomitantes, ce qui ne permet pas de remplir les conditions identifiant une vague de chaleur.

En période de réchauffement climatique, le choix de la période de référence pour le calcul d'un indicateur peut influencer significativement sur les résultats. Une étude de sensibilité de notre méthode à la période de référence choisie pour le calcul des centiles a été menée en comparant pour l'indicateur thermique national les résultats sur la période 1947-2014 selon l'utilisation de la référence climatologique 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000 ou 1981-2010 (tableau 1). On constate que le seuil *Spic* (centile 99,5 de la distribution) augmente plus vite que la moyenne de la distribution (+1,2 °C contre +0,9 °C), tandis que le choix de la période de référence influence d'un facteur proche de trois le nombre d'événements détectés (56 avec la référence 1951-1980 et 18 seulement selon 1981-2010). L'identification d'une vague de chaleur est donc relative à la période considérée. Par la suite, nous utiliserons la référence 1981-2010, norme climatologique actuelle.

### Sélection et qualification des jeux de données

Les approches événementielles qui s'appuient sur des seuils appliqués aux données quotidiennes de température

nécessitent d'évaluer la qualité des séries climatologiques utilisées, de façon à s'assurer que le diagnostic ne soit pas influencé par une évolution des conditions locales de mesure (travaux d'homogénéisation).

Notre objectif d'analyse des vagues de chaleur à l'échelle régionale impose de sélectionner de nouveaux jeux de données et d'en vérifier la qualité. Nous avons choisi d'utiliser les données de la base Safran de Météo-France, issue d'une méthode d'interpolation optimale des paramètres météorologiques à échelle fine tenant compte de la climatologie comme ébauche (Durand *et al.*, 1993). Ces données, qui bénéficient d'une ré-analyse depuis 1958, ont fait l'objet d'une évaluation climatologique (Vidal *et al.*, 2010) et sont depuis plusieurs années utilisées en opérationnel pour les applications hydroclimatologiques (Soubeyroux *et al.*, 2008). Notre étude a bénéficié d'une amélioration récente de la ré-analyse Safran des températures prenant en compte les températures extrêmes quotidiennes des postes du réseau climatologique d'État (Besson *et al.*, 2014).

Des indicateurs thermiques quotidiens agrégés fondés sur la ré-analyse Safran ont été calculés à l'échelle des 96 départements de la métropole. Une comparaison à l'échelle nationale de la moyenne de ces indicateurs à l'indicateur thermique national opérationnel a montré des scores statistiques satisfaisants (absence de biais, écart type annuel de l'ordre de

0,1 °C, tendances linéaires identiques). Une action est en cours pour une qualification complète à l'échelle régionale à partir des nouvelles séries homogénéisées disponibles sur la période 1950-2010 (Gibelin *et al.*, 2014).

En climat futur, les projections climatiques prises en compte sont celles du modèle Aladin Climat version 5 du CNRM disponibles sur le portail Drias ([www.drias-climat.fr](http://www.drias-climat.fr)). Ces données bénéficient d'une correction statistique selon la méthode quantile/quantile (Déqué, 2007) appliquée sur la base Safran. Trois scénarios relatifs à l'évolution des concentrations en gaz à effet de serre au XXI<sup>e</sup> siècle (*Representative Concentration Pathway*) ont été considérés en regard des incertitudes liées aux politiques climatiques pouvant être mises en œuvre (Moss *et al.*, 2010) : RCP 2.6 (pic, puis déclin), RCP 4.5 (stabilisation) et RCP 8.5 (croissance continue).

## Caractérisation des vagues de chaleur de l'été 2015 à l'échelle régionale

### Climatologie régionale des vagues de chaleur en France

Un recensement des vagues de chaleur a été établi à partir de l'indicateur thermique Safran à l'échelle départementale depuis 1959. Les paramètres de la méthode (*Spic*, *Sdeb* et *Sint*) ont été recalés pour chaque distribution sur la période de référence 1981-2010.

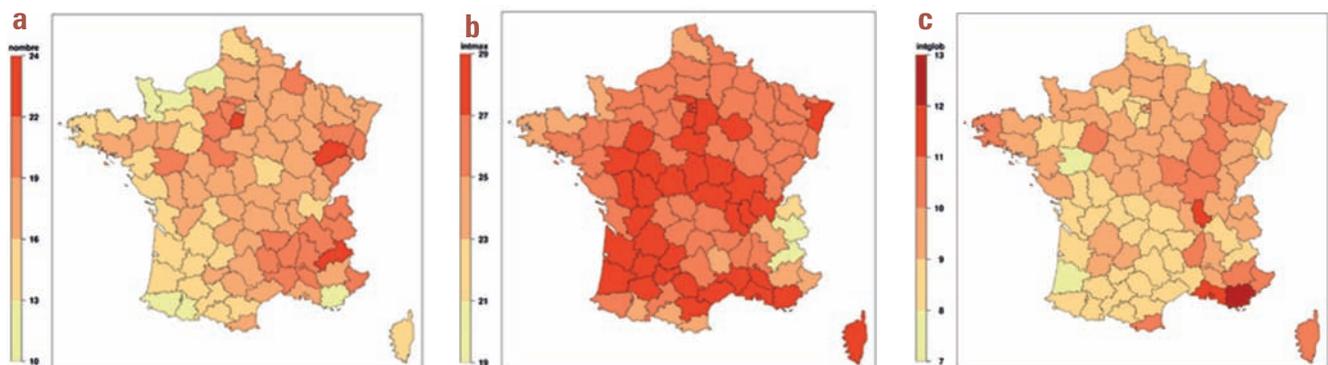


Figure 3. Climatologie des caractéristiques des vagues de chaleur en France sur la période 1959-2015 fondée sur l'indicateur thermique départemental Safran : a) nombre cumulé d'événements ; b) intensité maximale moyenne ; c) sévérité moyenne (normalisée).

Une climatologie de la typologie des vagues de chaleur en France sur la période 1959-2015 peut ainsi être établie. La figure 3 en présente les résultats principaux :

- le nombre d'événements de vagues de chaleur évolue entre 10 et 23 avec un minimum en climat océanique (notamment Cotentin et Aquitaine Sud) et un maximum dans l'Est (Rhône-Alpes) et le Centre ;
- l'intensité maximale moyenne (calculée pour tous les événements) varie entre 20 °C (zones de montagne) et plus de 28 °C (régions méditerranéennes, Sud-Ouest et Centre) ;
- la sévérité moyenne normalisée (calculée pour tous les événements) est assez contrastée sur le territoire : le minimum se situe sur littoral atlantique (Landes) ; le maximum en Méditerranée (Provence) et sur le Rhône.

### Caractérisation des vagues de chaleur de l'été 2015

À l'échelle nationale, deux épisodes principaux de canicule ont concerné la France au cours de l'été 2015 (Note Météo-France, 2015) du 30 juin au 7 juillet, puis du 15 au 22 juillet<sup>4</sup> ; de nombreux records absolus de chaleur ont été battus dans différentes régions : par exemple 39,4 °C le 1<sup>er</sup> juillet à Melun, 41,1 °C le 7 juillet à Saint-Étienne ou 41,4 °C le 16 juillet à Brive.

L'analyse des vagues de chaleur à l'échelle départementale permet d'affiner ce diagnostic. On dénote en fait quatre événements d'extension très variable (figure 4) :

- le premier, du 29 juin au 7 juillet, qui a touché plus de 80 départements les 3 et 4 juillet ;
- le deuxième, du 11 au 24 juillet, ayant touché plus de 50 départements du 16 au 21 juillet ;
- le troisième, du 3 au 9 août, limité les 6 et 7 août à 14 départements du quart sud-est du pays ;
- un quatrième, du 27 au 31 août, pour seulement trois départements (Côte d'Or, Nièvre et Vosges).

On note également qu'il n'y a pas eu d'interruption entre les deux premiers événements pour quatre départements du sud-est de la France (Alpes de Haute-Provence, Alpes-Maritimes, Bouches du Rhône et Var).

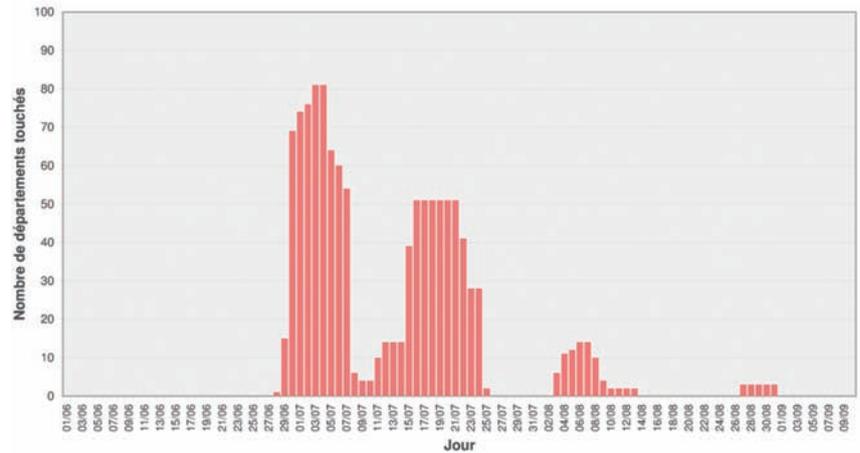


Figure 4. Chronologie quotidienne du nombre de départements en situation de vague de chaleur au cours de l'été 2015 (du 1<sup>er</sup> juin au 30 septembre) en France.

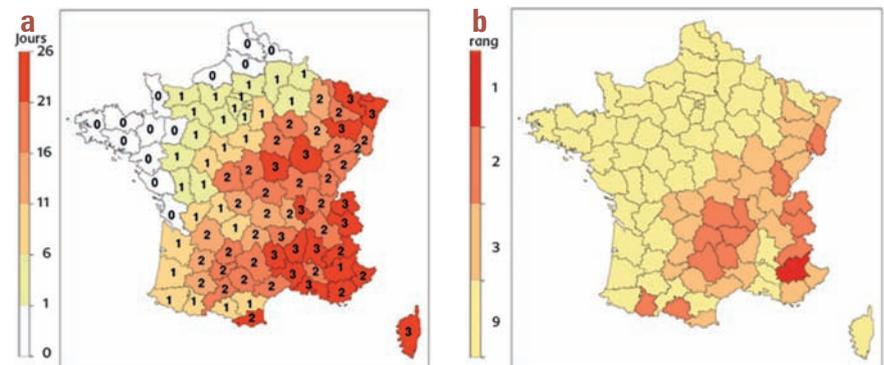


Figure 5. Caractérisation spatiale des vagues de chaleur de l'été 2015 en France : a) nombre de vagues de chaleur (chiffres à l'intérieur de chaque département) et durée totale en jours (échelle de couleur) ; b) rang depuis 1959 des vagues de chaleur de l'été 2015 en termes de sévérité.

La figure 5 confirme la forte variabilité spatiale des vagues de chaleur de l'été 2015 qui ont épargné la façade nord-ouest du pays et fortement touché le quart sud-est (Méditerranée et Alpes), avec un maximum de 29 jours sur les Alpes-Maritimes et le Var. Sur

un historique depuis 1959, ces vagues de chaleur apparaissent souvent au 2<sup>e</sup> ou 3<sup>e</sup> rang en termes de sévérité sur la moitié sud-est du pays (y compris Massif central et Jura). Seul le département des Alpes-de-Haute-Provence la classe au premier rang.

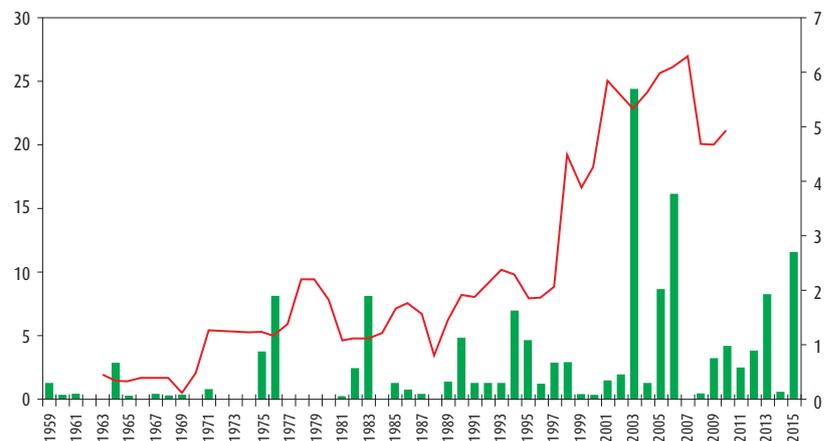


Figure 6. Évolution depuis 1959 du nombre moyen annuel de journées de vague de chaleur (référence climatologique 1981-2010) par département en France (échelle des ordonnées à gauche) et moyenne décennale glissante correspondante (échelle des ordonnées à droite).

4. [www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/bilan-2015/bilan-climatique-de-l-ete](http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/bilan-2015/bilan-climatique-de-l-ete)

## Évolution constatée et prévue des vagues de chaleur

### Hausse importante de la fréquence des vagues de chaleur depuis 1959

Un recensement des vagues de chaleur à l'échelle nationale depuis 1947 a été précédemment réalisé et analysé comme indicateur des effets du changement climatique en France dans la nouvelle application ClimatHD ouverte par Météo-France à l'automne 2015<sup>5</sup> (Note Météo-France, 2015b).

Les nouvelles données produites dans le cadre de cette étude permettent d'affiner ce diagnostic. Considéré à l'échelle départementale avec la référence 1981-2010 (figure 6), le

5. [www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd](http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd)

nombre moyen de jours de vague de chaleur en France depuis 1959 est très variable d'une année à l'autre avec un record en 2003 de 24,2 jours suivi de 2006 avec 16 jours, tandis que l'été 2015 avec 12,4 jours se situe au 3<sup>e</sup> rang. En moyenne décennale glissante, le nombre annuel de jours de vague de chaleur est passé de 1 à 5 jours de 1959 à 2015.

### Projections sur l'évolution des vagues de chaleur en France au XXI<sup>e</sup> siècle

La méthode a ensuite été appliquée aux données corrigées du modèle Aladin Climat, à la fois pour une simulation dite « historique » concernant la période 1971-2005 et pour les trois scénarios RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5, en considérant trois périodes temporelles : le climat de référence 1976-2005, le futur proche 2021-2050 et la fin de siècle 2071-2100 (figure 7).

La figure 7 permet de vérifier sur la période de référence 1971-2005 que le modèle Aladin Climat simule correctement les événements de vague de chaleur en France tant en nombre (14 avec Safran et 12 avec Aladin) qu'en durée et sévérité. L'analyse de l'évolution de l'aléa en fonction des scénarios RCP, des horizons temporels et des caractéristiques des événements en nombre et sévérité conduit aux résultats principaux suivants (figure 7) :

- avec un scénario RCP2.6, le nombre de vagues de chaleur augmente fortement entre la période de référence (1976-2005) et le futur proche (2021-2050) (passage de 12 à 34 événements par an), puis se stabilise en fin de siècle. Le modèle simule des événements notablement plus longs (jusqu'à 30 à 40 jours) et plus intenses dès le futur proche ;
- avec un scénario RCP4.5, le nombre de vagues de chaleur est légèrement supérieur à celui du RCP 2.6 en futur proche (38 événements par an au lieu de 32), mais leur nombre continue à augmenter en fin de siècle 2071-2100

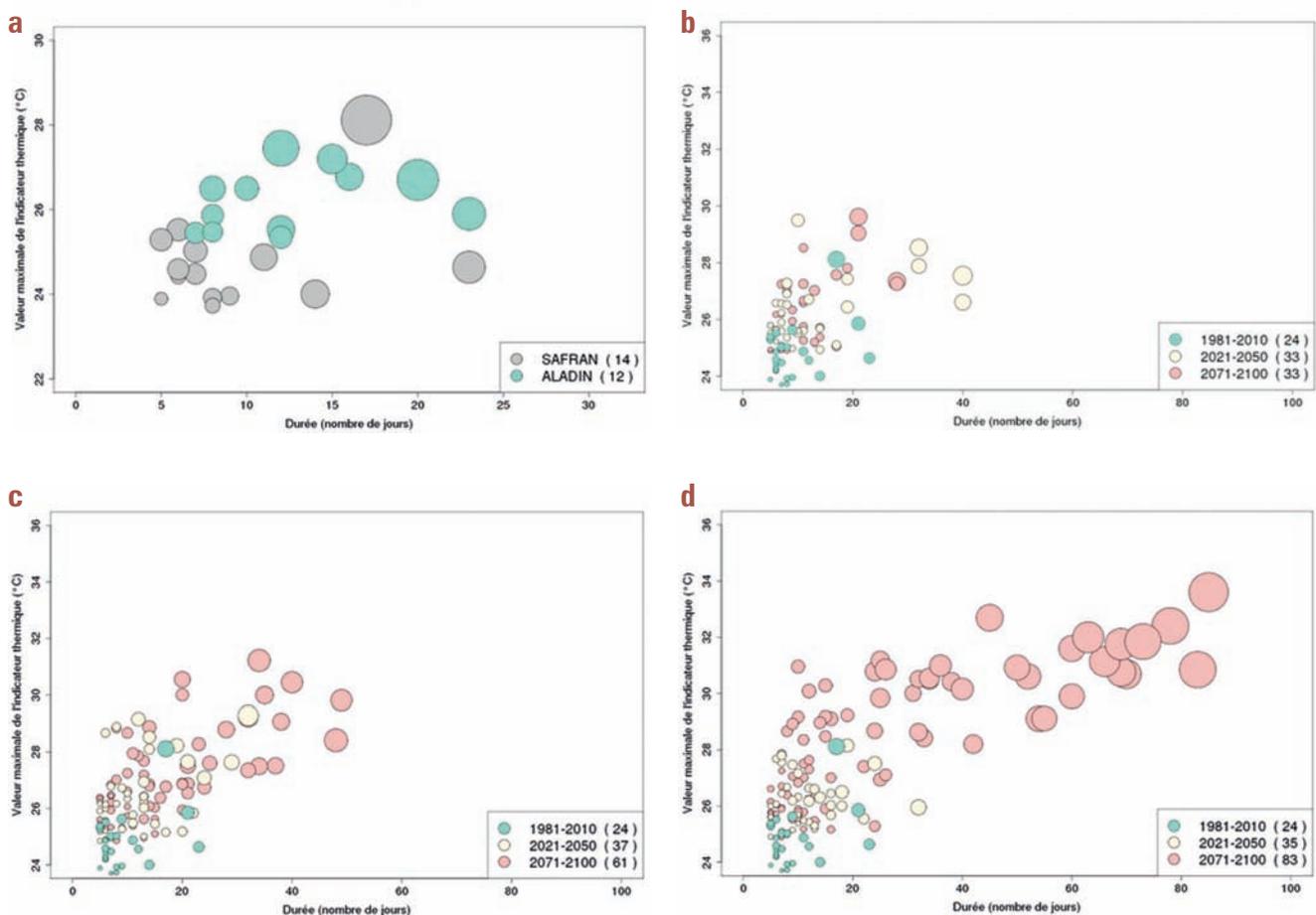


Figure 7. Représentation de l'évolution projetée des vagues de chaleur en France avec le modèle Aladin Climat en termes de durée (abscisse), d'intensité maximale (ordonnée) et de sévérité (représentée par la taille des bulles) : a) comparaison entre la simulation historique et la réanalyse Safran sur la période 1971-2005 ; b) projection avec le scénario RCP2.6 (en vert la période actuelle 1981-2010, en jaune futur proche 2021-2050, en rouge fin de siècle 2071-2100) ; c) idem avec le scénario RCP4.5 ; d) idem avec le scénario RCP8.5

(62 événements par an), accompagné d'une augmentation en intensité et durée (jusqu'à 60 jours) ;

– avec un scénario RCP8.5, le nombre de vagues de chaleur en futur proche est comparable à celui obtenu avec le scénario RCP4.5. L'augmentation du nombre et de toutes les caractéristiques des vagues de chaleur est plus importante en fin de siècle, où l'on atteint 84 vagues de chaleur par an, avec certaines vagues pouvant durer près de trois mois.

## Conclusion

La nouvelle méthode développée pour l'analyse des vagues de chaleur permet de caractériser l'intensité et l'extension spatiale des événements en temps réel, et de les qualifier de manière homogène par rapport aux épisodes passés et ceux attendus dans les climats futurs. Elle est applicable sur tout indicateur thermique agrégé ou même toute série climatologique de qualité connue. Elle a été mise en œuvre pour cette étude à partir de nouveaux indicateurs thermiques départementaux fondés sur la réanalyse Safran. Les résultats obtenus permettent d'établir une

climatologie spatialisée originale des vagues de chaleur en France en tenant compte à la fois de la durée, de l'intensité maximum et de la sévérité. L'importance de la prise en compte de l'occurrence locale des vagues de chaleur est démontrée par l'application aux événements de l'été 2015. Cette méthode peut aussi s'appliquer pour caractériser les effets du changement climatique en climat passé (augmentation de 1 à 5 du nombre moyen de jours de vague de chaleur entre 1959 et 2015) et climat futur. Les projections climatiques issues du modèle Aladin Climat et trois scénarios RCP apportent un diagnostic très clair sur les évolutions attendues en climat futur. À l'horizon 2021-2050, la multiplication des vagues de chaleur est annoncée avec les trois scénarios RCP étudiés tout en restant dans des gammes d'intensité maximale et de sévérité proches des événements maximaux des 30 dernières années. Tel n'est pas le cas des projections attendues à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle avec le scénario RCP4.5 et plus encore RCP8.5.

Les incertitudes du diagnostic liées aux modèles climatiques (ici

uniquement Arpège Climat) doivent aussi être étudiées. Dans le cadre du projet Extremoscope, la méthode d'analyse des vagues de chaleur a été appliquée aux projections de l'ensemble Euro-Cordex (Giorgi *et al.*, 2006) et le diagnostic a été confirmé (Ouzeau *et al.*, 2016). Les évolutions des vagues de chaleur au cours du XXI<sup>e</sup> siècle et les différences entre les scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 sont cohérentes avec l'indicateur du nombre de jours de vague de chaleur estivale disponible sur le portail Drias, mais apportent un éclairage complémentaire de la gravité des événements possibles en fin de siècle en fonction des politiques climatiques d'atténuation qui seront mises en œuvre.

La prise en compte de références climatiques variables au cours du temps pour la détermination des vagues de chaleur, tel que proposé pour l'analyse des sécheresses (Vidal *et al.*, 2012), est une piste de valorisation intéressante de la méthode pour mesurer les efforts à réaliser en fonction des politiques d'adaptation engagées.

## Bibliographie

- Besson F., Soubeyroux J.-M., Ouzeau G., Perrin M., Bazile E., Soci C., 2014. Diurnal temperature cycle deduced from extreme daily temperatures and impact over a surface reanalysis system, 12<sup>th</sup> EMS/9<sup>th</sup> ECAC Lodz, Poland, 10-14 Sept. 2014.
- Christidis N., Jones G.S., Stott P.A., 2015. Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave, *Nat. Clim. Change*, 5, 46-50, doi: 10.1038/nclimate2468
- Déqué M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global Planet. Change*, 57, 16-26.
- Durand Y., Brun E., Merindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E., 1993. A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, *Ann. Glaciol.*, 18, 65-71.
- Gibelin A.-L., Dubuisson B., Deaux N., Jourdain S., Laval L., Piquemal J.-M., Mestre O., Dennetière D., Desmidt S., Tamburini A., 2014. Évolution de la température en France depuis les années 1950. *La Météorologie*, 87, 45-53.
- Giorgi F., Jones C., Asrar G.R., 2006. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *Bulletin World Meteorol. Organ.*, 58, 175-183.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Moss *et al.*, 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756, doi: 10.1038/nature08823
- Institut National de Veille Sanitaire, Bilan au 15 septembre 2015 des épisodes de canicule survenus à l'été 2015, *Le point épidémiol.*, 2, 1-19
- Otto F.E.L., Massey N., Van Oldenborgh G.J., Jones R.G., Allen M.R., 2012. Reconciling two approaches to attribution of the 2010 Russian heat wave. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L04702. doi: 10.1029/2011GL050422
- Ouzeau G., Déqué M., Jouini M., Planton S., Vautard R., 2014. Le climat de la France au XXI<sup>e</sup> siècle. Rapport de la Direction générale de l'énergie et du climat, www.developpement-durable.gouv.fr, 64 p.
- Ouzeau G., Soubeyroux J.-M., Schneider M., Planton S., Vautard R., 2016. Analysis of heat waves evolution in France in context of climate change. *J. Clim. Serv.*, *Accepté*
- Poumadère M., Mays C., Le Mer S., Blong R., 2005. The 2003 heat wave in France: dangerous climate change here and now. *Risk Analysis*, 25, 1483-1494.
- Russo S., Dosio A., Graversen R., Sillman J., Carao H., Dunbar M., Singleton A., Montagna P., Barbola P., Vogt J., 2014. Magnitude of extreme heatwaves in present climate and their projection in a warming world. *J. Geophys. Res. Atm.*, 119, 12,500–12,512, doi: 10.1002/2014JD022098
- Schneider M., Dandin P., 2012. La vague de froid de février 2012. *La Météorologie*, 76, 7-8.
- Soubeyroux J.-M., Martin E., Franchistéguy L., Habets F., Noilhan J., Baillon M., Regimbeau F., Vidal J.-P., Le Moigne P., Morel S., 2008. Safran-Isba-Modcou (SIM) – Un outil pour le suivi hydrométéorologique opérationnel et les études. *La Météorologie*, 63, 40-45.
- Vidal J.-P., Martin E., Baillon M., Franchistéguy L., Soubeyroux J.-M., 2010. SAFRAN 50-year high-resolution meteorological reanalysis over France. *Int. J. Climatol.*, 30, 1627-1644. doi: 10.1002/joc.2003
- Vidal J.-P., Martin E., Kitova N., Najac J., Soubeyroux J.-M., 2012. Evolution of spatio-temporal drought characteristics: validation, projections and effect of adaptation scenarios. *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, 16, 2935-2955. doi: 10.5194/hess-16-2935-2012