



Les **vagues** **de chaleur** dans un contexte de **changement** **climatique**



**Rapport à la Première ministre
et au Parlement**

Les **vagues**
de chaleur
dans un contexte
de **changement**
climatique

**Rapport à la Première ministre
et au Parlement**

Publications de l'ONERC à La Documentation française

Un climat à la dérive : comment s'adapter ? Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2005.

Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique, La Documentation française, Paris, 2007.

Changements climatiques et risques sanitaires en France, Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2007.

Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation, Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2009.

Villes et adaptation au changement climatique, Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2010.

L'adaptation de la France au changement climatique, Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2012.

Les outre-mer face au défi du changement climatique, Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2013.

L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change, Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2014.

Le littoral dans le contexte du changement climatique, Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2015.

Adaptation au changement climatique, évaluation de la démarche nationale et recommandations, Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2016.

Vers un 2^e plan d'adaptation au changement climatique pour la France. Enjeux et recommandations, Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2017.

Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique, Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2018.

Des solutions fondées sur la nature pour s'adapter au changement climatique, Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2019.

La prospective au service de l'adaptation au changement climatique, Rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2022.

En application de la loi du 11 mars 1957 (art. 41) et du Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992, complétés par la loi du 3 janvier 1995, toute reproduction partielle ou totale à usage collectif de la présente publication est strictement interdite sans autorisation expresse de l'éditeur. Il est rappelé à cet égard que l'usage abusif et collectif de la photocopie met en danger l'équilibre économique des circuits du livre.

© Direction de l'information légale et administrative, Paris 2023
ISBN : 978-2-11-157694-0

Sommaire

MOT DU PRÉSIDENT	5
RÉSUMÉ.....	7
Chapitre A	
Les vagues de chaleur, s'adapter à un risque croissant	13
Introduction	15
Concepts associés aux vagues de chaleur et développés dans le rapport.....	16
Chapitre B	
Vagues de chaleur dans le climat passé, présent et futur. Attribution et îlots de chaleur urbains	21
Tendances futures du changement climatique sur les vagues de chaleur et les canicules	23
L'îlot de chaleur urbain	29
Attribution des vagues de chaleur à l'influence humaine	40
Chapitre C	
Impacts sectoriels et sur les milieux naturels des vagues de chaleur	45
La vague de chaleur au Canada en juin 2021	47
La vague de chaleur en Chine au cours de l'été 2022	54
Impact des vagues de chaleur sur les glaciers	59
Impact des vagues de chaleur sur les glaciers des Pyrénées	62
Impacts des vagues de chaleur sur la biodiversité	65
Impacts des vagues de chaleur sur la biodiversité marine.....	75
Impacts des vagues de chaleur sur l'agriculture française	82
Impacts des vagues de chaleur sur la production d'énergie électrique	95
Impacts des vagues de chaleur sur le réseau électrique	101
Impacts des vagues de chaleur sur les transports et infrastructures de transport.....	105
Impacts des vagues de chaleur sur la santé	121

Chapitre D

Politiques d'adaptation aux vagues de chaleur	133
La RE2020	135
La vigilance « canicule » de Météo-France.....	139
Gérer des vagues de chaleur de plus en plus extrêmes : des impacts sanitaires aux impacts systémiques	143

Chapitre E

Les outils pour la mise en œuvre de l'adaptation	149
Le Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique.....	151
Drias les futurs du climat, Climat HD	153
Bat-ADAPT.....	158
Guides de l'ADEME.....	162
Adapter la France au changement climatique : de combien parle-t-on?	171

Chapitre F

Exemples de solutions d'adaptation aux vagues de chaleur	179
Les revêtements clairs.....	181
Plus fraîche ma ville.....	182
L'architecture bioclimatique et les constructions traditionnelles	184
L'îlot de fraîcheur urbain, un exemple à Échirolles (38).....	191
Paris face aux vagues de chaleur.....	199
Stratégies d'adaptation des transports aux impacts des vagues de chaleur.....	206

Conclusions et perspectives

213

Les actions de réduction de l'aléa	213
La réduction de la vulnérabilité	214
La réduction de l'exposition	214

BIBLIOGRAPHIE.....

215

Rapport d'activité de l'Observatoire.....

229

Annexes.....

253

Contributeurs et remerciements.....	255
Sigles et acronymes	258

Mot du président de la commission spécialisée du CNTE¹



Ronan Dantec

© Gaël Arnaud.

L'été terrible que nous venons de traverser a sans aucun doute convaincu les rares personnes qui contestaient encore la réalité du changement climatique.

En effet, l'année 2022 cumule beaucoup de records, celui de la température moyenne annuelle la plus élevée sur la France, mais aussi l'année qui comptabilise la surface brûlée par les feux de forêt la plus importante. Avec une température moyenne annuelle de 14,5 °C observée sur le territoire métropolitain français, l'année 2022 bat les précédents records, comme cela avait déjà été le cas pour 2020. Plus alarmant encore, cette année remarquable pourrait devenir une année normale dans les prochaines décennies.

Avec plus de 66 000 hectares de forêts réduits en cendre en 2022 et presque 300 feux recensés, nous avons franchi un grand pas vers les scénarios les plus pessimistes décrits par les scientifiques. Les régions les plus à l'ouest, comme la Bretagne, ne sont plus épargnées. Et encore ce ne sont que deux exemples parmi beaucoup des autres effets des températures extrêmes de 2022, tant sur la nature que sur les activités humaines.

Pour autant, comment s'adresser aux Français ? Comment leur donner envie d'y croire dans un quotidien marqué par le catastrophisme ?

Face aux défis du réchauffement climatique, nous nous devons de faire société, d'imaginer des solutions qui renforcent notre cohésion et notre vivre-ensemble.

La nature, biodiversité marine et terrestre mais aussi la terre nourricière, a aussi subi les attaques répétées des vagues de chaleur dans un contexte de sécheresse sans précédent.

Et même si on peut avoir l'impression que nos systèmes énergétiques, de la production à la consommation, nos réseaux de transports, routiers, ferroviaires, maritimes et aériens ont été tous résilients lors de ces canicules à répétition, jusqu'à quel point peuvent-ils faire face ?

1. Commission spécialisée du Conseil national de la transition écologique chargée de l'orientation de l'action de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique.

La surmortalité importante observée lors de la canicule de 2003, dont les victimes étaient souvent des personnes seules et isolées, a montré l'importance d'une culture de l'attention portée à l'autre, à sa voisine ou à son voisin de palier. Elle a souligné le rôle du service public : quand le facteur est aussi une sentinelle, en capacité de vigilance quand le courrier non relevé alerte sur une possible détresse. Nous avons alors créé puis fait fonctionner chaque été des systèmes de vigilance basés sur l'anticipation, l'alerte et la gestion de crise : ainsi, les centres communaux d'action sociale (CCAS) disposent aujourd'hui de listes de personnes vulnérables à appeler en période de canicule, Météo-France a intégré les canicules dans son outil d'alerte météorologique. Ce sont des exemples concrets d'adaptation, il faut encore renforcer les actions en la matière.

Débattre de l'adaptation est essentiel pour notre avenir, pour identifier des solutions, prioriser nos interventions et anticiper des évolutions inéluctables. Plus le débat public sera étayé et approfondi, et plus vite nous intégrerons dans nos politiques d'adaptation au changement climatique, de gestion des risques naturels, d'aménagement du territoire, de l'ouvrage d'art au plan d'urbanisme, ces contraintes que nous ne pouvons plus ignorer. Et plus vite nous serons en capacité d'apporter des réponses robustes et financièrement maîtrisées aux conséquences du réchauffement, telles que les vagues de chaleur et leurs impacts directs et indirects.

Une mobilisation commune est indispensable pour prévenir plutôt que guérir les impacts actuels et futurs d'un changement climatique qu'il ne s'agit plus de nier ou de minimiser, mais d'affronter lucidement, en toute connaissance.

Résumé

Même s'il n'y a pas de définition universelle des vagues de chaleur et même si ces termes incluent plusieurs événements météorologiques allant des pics de chaleur jusqu'aux canicules extrêmes, les vagues de chaleur ont été classifiées en fonction de leurs impacts sur la santé et une méthode de détection a été élaborée permettant de décrire de manière univoque l'évolution passée et récente des vagues de chaleur et d'élaborer des projections d'évolution future.

Vagues de chaleur dans le climat passé, présent et futur

Une forte augmentation des occurrences de vagues de chaleur est nettement observable durant les 2 dernières décennies. En effet, depuis l'année 2000, trente événements ont été observés en 22 années, soit en moyenne nettement plus d'un chaque année alors qu'il n'y avait en moyenne qu'une vague de chaleur tous les 3 ans entre 1947 et 2000.

La durée des vagues de chaleur a également fortement évolué. De l'ordre de 2 jours par an en moyenne avant 2000, ce nombre est passé à 10 jours par an dans la décennie 2011-2020. Avec 33 journées, l'année 2022 détient le nombre record de jours de vagues de chaleur pour un seul été, loin devant 1983 (23 jours) et 2003 (22 jours).

Les derniers rapports du GIEC nous disent que l'augmentation du nombre de vagues de chaleur va continuer, quel que soit le scénario climatique utilisé, mais selon des proportions différentes. Ainsi, le nombre de jours de vagues de chaleur pourrait augmenter de 2 à 4 jours par an (scénario RCP2.6) et jusqu'à 5 à 15 jours (RCP 8.5). En fin de siècle, la hausse du nombre de jours de vagues de chaleur pourrait atteindre de 10 à 30 jours (RCP8.5), voire jusqu'à 30 à 60 jours dans certaines simulations extrêmes.

Îlots de chaleur urbains

De par leur structure, les villes modifient les conditions météorologiques locales. L'air dans la ville est ainsi, lorsque les conditions météorologiques s'y prêtent, plus chaud que dans les environs. C'est le phénomène d'îlot de chaleur urbain, qui est plus marqué de nuit et pour les grandes agglomérations.

Avec des canicules de plus en plus fréquentes à l'avenir, limiter l'intensité de l'îlot de chaleur en été est un enjeu important pour les collectivités urbaines. Des exemples d'action faisant intervenir un très grand nombre d'acteurs sont décrits, sans avoir vocation à être exhaustifs.

Attribution des vagues de chaleur aux activités humaines

Des études rétrospectives de certaines vagues de chaleur permettent d'attribuer à l'activité humaine le taux de modification de la probabilité ou de l'intensité de l'événement étudié. Certaines études décrivent également l'évolution attendue des caractéristiques (fréquence, intensité) de l'épisode étudié dans un climat futur plus chaud. Au niveau national, le résultat de telles études est accessible en ligne et a fait l'objet d'actions de communication. Les études d'attribution favorisent la réflexion sur l'adaptation, en permettant de situer les canicules récentes dans une perspective de changement climatique, et en illustrant ce que pourraient être les canicules du futur.

Impacts des vagues de chaleur, exemples récents hors de France

La vague de chaleur qui s'est abattue sur le Canada en juin 2021 est décrite d'une manière complète avec sa genèse et un aperçu des impacts de cet épisode de chaleur sans précédent. Il s'agit d'un résumé d'un article plus complet publié en anglais par les auteurs (White *et al.*, 2022).

L'exemple suivant est celui, plus récent, de la vague de chaleur qui s'est produite en Chine au cours de l'été 2022. Dans cet article, seuls les aspects météorologiques sont abordés avec la description des principaux records de température et de durée qui ont été battus. Par exemple, selon les critères de vague de chaleur d'échelle nationale du service météorologique chinois (CMA), cet épisode a duré au total 79 jours. Les records de températures diurnes et nocturnes ont été battus dans de nombreuses villes chinoises.

Impacts des vagues de chaleur sur les milieux naturels

Essentielle dans le cycle de l'eau, la modification des glaciers reflète, de façon très visuelle, l'évolution des paramètres atmosphériques (températures, précipitations...). La fonte des glaciers de la planète est accélérée par le réchauffement climatique ces 20 dernières années. Les constats sont équivalents à l'échelle européenne et française. L'exemple représentatif du glacier pyrénéen d'Ossoue est décrit en détail : l'année glaciaire 2022, marquée par une vague de chaleur exceptionnelle, est la plus déficitaire depuis au moins 2002, mais très certainement depuis bien plus longtemps.

Souvent couplées à des épisodes de sécheresse, les vagues de chaleur ont des impacts importants sur la biodiversité terrestre mais il est très difficile de connaître leurs effets à long terme sur la faune, la flore et les milieux. Avec l'augmentation des températures moyennes, mais aussi des températures extrêmes, les impacts ne vont aller qu'en s'aggravant dans les années futures et vont concerner une part de plus en plus étendue du territoire jusque-là préservé.

En ce qui concerne la biodiversité marine, le constat est identique, les vagues de chaleur marines augmentent considérablement en fréquence et en intensité, et provoquent un nombre croissant de blanchissements massifs de coraux et plus globalement une perte importante de la biodiversité. Des études récentes (Garrabou *et al.*, 2022) montrent qu'au moins cinquante espèces marines (dont des macroalgues, des coraux et des éponges) ont été affectées par des vagues de chaleur sur des milliers de kilomètres de côtes méditerranéennes.

Impacts des vagues de chaleur sur les secteurs économiques

Quelles que soient les espèces cultivées, les impacts des vagues de chaleur expliquent au moins pour moitié les baisses de rendements (maïs, blé), voire les pertes totales de récoltes (vignobles, fruits). En élevage, les pertes de production sont également observées. Les pistes d'adaptations se multiplient mais pour être réellement efficaces, c'est souvent un cortège de solutions d'adaptation qui est nécessaire, rendant la mise en œuvre plus délicate au niveau d'une exploitation individuelle.

À la suite des retours d'expérience des canicules passées et grâce à une politique d'anticipation continue, la production et la distribution d'énergie électrique ont pu être maintenues à leur niveau nominal malgré un été 2022 exceptionnellement chaud. Il convient cependant de continuer à s'interroger sur la prise en compte du changement climatique dans les choix d'investissement de la production et du réseau électrique.

L'impact des vagues de chaleur sur les transports est traité pour les réseaux et les infrastructures ferroviaires, routiers (routes et ouvrages, bus), aéronautiques et portuaires (maritimes et aéronautiques), tant pour ce qui concerne les impacts directs des températures excessives que l'impact indirect des feux de forêt et de broussailles.

Impacts des vagues de chaleur sur la population

Malgré les efforts de prévention et d'alerte, ces impacts sont en augmentation, sans toutefois atteindre les chiffres de 2003. Les canicules s'accompagnent également d'une recrudescence des recours aux soins d'urgences.

Le système d'alerte canicule et santé (SACS), élaboré pour la France métropolitaine, n'a pas été pour l'instant étendu à la France outremer du fait d'un contexte climatique différent.

Exemples des politiques publiques qui prennent en compte les vagues de chaleur et leurs impacts

Puisque la plupart des bâtiments construits aujourd'hui feront encore partie du parc immobilier français en 2100 dans un climat qui aura changé, la réglementation pour les constructions neuves, appelée réglementation environnementale 2020 (RE2020), intègre parmi ses trois enjeux prioritaires le confort d'été au

même titre que la réduction des consommations d'énergie ou la prise en compte de l'impact des constructions sur les émissions de gaz à effet de serre et donc sur le climat. Il s'agit donc bien d'un enjeu majeur pour les constructions de la prochaine décennie.

Au moment de la conception et de la mise en place du dispositif de vigilance météorologique en 2000 et 2001, les vagues de chaleur ne faisaient pas partie des phénomènes à prendre en compte. L'étude de la canicule de 2003 a permis d'établir, pour chaque département, des critères objectifs permettant le renforcement des dispositifs d'avertissement en temps réel, avec en particulier l'incorporation du phénomène « canicule » au dispositif de vigilance de Météo-France.

Venant compléter le plan canicule, le plan national de gestion des vagues de chaleur, actuellement en phase de finalisation, a pour objectifs de se préparer de façon systématique en amont de la période estivale puis d'anticiper l'arrivée prévue d'une vague de chaleur et de définir les actions à mettre en œuvre aux niveaux national et local pour en prévenir et en limiter les impacts non sanitaires.

Les outils pour la mise en œuvre de l'adaptation

Quelques outils, dont la liste n'est pas exhaustive, sont à la disposition des différents acteurs de l'adaptation (élus, techniciens des collectivités, acteurs économiques, bureaux d'études, particuliers), pour la mise en œuvre des mesures d'adaptation : le Centre de Ressources pour l'Adaptation au Changement Climatique, Drias les futurs du Climat et Climat HD, Bat-ADAPT et les guides de l'ADEME.

Développé dans le cadre du PNACC-2, le centre de ressources pour l'adaptation au Changement Climatique est le fruit d'un partenariat entre le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des Territoires (DGEC/SCEE/ONERC), le Cerema, l'ADEME, et Météo-France. Il a pour objectif de faciliter l'accès aux informations pertinentes pour l'adaptation des territoires au changement climatique, pour différents types d'acteurs.

Mesure phare du premier plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-1), le portail Drias Les futurs du climat a ouvert le 24 juillet 2012. Il s'agit du premier service climatique accessible gratuitement. Il met à disposition de l'ensemble des acteurs concernés par le changement climatique, de manière simple et gratuite, les informations et les aides nécessaires pour identifier les impacts et décider de mesures d'adaptation à mettre en œuvre.

Plus récemment, l'application web Climat HD propose une vision intégrée de l'évolution du climat passé et futur, aux plans national et régional. Climat HD synthétise ainsi de manière encore plus simplifiée les derniers travaux des climatologues et les met à disposition de tous.

Les acteurs du secteur de l'immobilier sont particulièrement concernés par les enjeux du changement climatique car ils ont la charge de la construction ou de la gestion de systèmes évoluant sur un temps long : les bâtiments ont une durée de vie conventionnelle de 50 ans. Le changement climatique impactera donc

lourdement les constructions actuelles, et encore davantage celles qui ne sont encore qu'à l'état de projet. Bat-ADAPT est un outil d'adaptation au changement climatique à destination des acteurs de l'immobilier. Il a pour vocation de mettre à disposition une analyse des risques climatiques et des préconisations pour adapter les bâtiments au changement climatique.

Du fait des vagues de chaleur de plus en plus nombreuses, les collectivités et les acteurs opérationnels (maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre...) s'engagent de plus en plus vers des mesures de rafraîchissement urbain. Cependant, en termes d'adaptation aux vagues de chaleur, il n'existe pas de solution ou de combinaisons de solutions de rafraîchissement systématiquement applicables à l'ensemble des situations. Les résultats espérés de chaque solution sur le climat urbain diffèrent selon le contexte urbain dans lequel elles s'insèrent. Aussi, une analyse fine du contexte, des enjeux et des impacts attendus de chaque projet reste indispensable pour choisir les solutions de rafraîchissement les mieux adaptées.

Des politiques d'adaptation au changement climatique et de prévention et de gestion des risques sont déjà appliquées en France et de premières mesures ont déjà été prises pour répondre aux impacts du changement climatique dans plusieurs secteurs. Cependant, mettre pleinement en œuvre ces politiques et aller au-delà d'actions réactives et incrémentales nécessitent de mobiliser des moyens, financiers et humains, à la hauteur des enjeux. L'Institut de l'économie pour le climat (I4CE) a dressé en 2022 un premier état des lieux consolidé de ces besoins. Parmi les grands « chantiers de l'adaptation », plusieurs visent directement à mieux anticiper les futures vagues de chaleur.

Exemples de mise en œuvre de mesure d'adaptation

Les revêtements à albédo élevé tels que les toits blancs sont une des solutions de rafraîchissement urbain, relativement faciles à mettre en œuvre. Elles peuvent être combinées à d'autres solutions telles que les solutions vertes, bleues et douces, et même à d'autres solutions grises davantage centrées sur les formes urbaines. La start-up d'État Plus Fraîche ma Ville, portée par l'ADEME au sein de son incubateur L'Accélérateur de la transition écologique et soutenue par l'Association des maires de France, a pour objectif d'accompagner les collectivités dans leurs choix de solutions pérennes et durables de rafraîchissement urbain.

Souvent inspirée des savoirs traditionnels, l'architecture bioclimatique accorde une importance centrale à l'environnement immédiat du bâtiment et présente souvent des solutions d'adaptation avantageuses. Plutôt que de continuer à construire des bâtiments standardisés pour un climat actuel, il est préférable de se projeter dans un climat plus chaud et par exemple de s'inspirer des techniques traditionnelles méditerranéennes pour se protéger de la chaleur dans des latitudes plus hautes.

Engagée de longue date dans une politique ambitieuse de transition écologique, la ville d'Échirolles (38) a identifié et caractérisé avec l'aide d'un géographe climatologue les phénomènes d'îlot de chaleur urbain (ICU). Elle a décidé de traiter, au cœur du quartier de la Ponatière, l'îlot formé par la cour de l'école élémentaire

Marcel-David et ses abords (terrain de sport, pourtour d'un gymnase). Ce site offre, de par ses caractéristiques (superficie de 8300 m² environ, propriété de la ville), un terrain propice à l'expérimentation de solutions d'adaptation fondées sur la nature, susceptibles d'influer sur les phénomènes de surchauffe estivale et d'ICU observés à l'échelle du quartier.

L'enquête menée au sein du 13^e arrondissement de Paris, arrondissement assez représentatif des enjeux pour la ville de Paris, a permis de dégager plusieurs grands enseignements quant à sa préparation aux vagues de chaleur, comme le manque de préparation devant des canicules de plus en plus précoces, longues et intenses ou comme la dépendance aux réseaux d'énergie. Pour augmenter la résilience de nos territoires face aux vagues de chaleur à venir, il n'existe qu'une seule solution viable : anticiper, et planifier la résilience de la ville de demain en fonction des évolutions du climat futur – et non d'un climat passé stable, qui appartient à un temps déjà révolu.

À partir des études de vulnérabilité de leurs infrastructures, les principaux acteurs du transport (SNCF Réseau, la Société du Grand Paris, des acteurs routiers tels que la direction interdépartementale des routes sur la zone Méditerranéenne, des grands ports maritimes) ont mis en place des mesures d'adaptation aux vagues de chaleur : mesures d'investissement comme le dimensionnement adapté des infrastructures et ouvrages, d'équipement des matériels roulant en climatisation, ou bien d'organisation du service comme lors des périodes de vagues de chaleur avec la mise en place de la surveillance accrue des voies ou de la limitation des vitesses.

Conclusion

Les conditions météorologiques rencontrées durant l'été 2022 et leurs impacts sur tous les aspects de notre société et de la nature doivent nous rappeler l'urgence d'agir sur les deux volets de la lutte contre le changement climatique, l'atténuation et l'adaptation.

Puisque le risque climatique est le produit de trois facteurs, les politiques d'adaptation doivent jouer sur les trois composantes du risque : aléa, vulnérabilité ou exposition.

L'élaboration d'un plan vague de chaleur interministériel permettra de compléter le plan national canicule jusqu'alors consacré aux impacts sanitaires, de manière à lutter également contre l'impact des vagues de chaleur sur la vie quotidienne des Français, la continuité des services publics essentiels et de la vie économique, ainsi que pour la protection des milieux et ressources naturels, tout en gardant les acquis du plan canicule actuel qui a prouvé partiellement son efficacité dans le domaine sanitaire.

Chapitre A

Les vagues de chaleur, s'adapter à un risque croissant



Jérôme Duvernoy,

Observatoire national sur les effets
du réchauffement climatique (ONERC)

Introduction

Contexte

Les vagues de chaleur sont la manifestation la plus évidente du changement climatique en France, en Europe et dans la plupart des régions du monde. L'année 2022 s'ajoute à une liste qui ne cesse de s'allonger. Elle a été marquée par trois vagues de chaleur successives du 15 au 19 juin, du 12 au 25 juillet puis du 31 juillet au 13 août, remarquables notamment par leur précocité, leur intensité et par leur durée. Même s'il est scientifiquement difficile, mais pas impossible, de relier un événement extrême au changement climatique, les derniers rapports du GIEC montrent sans le moindre doute que ce sont les émissions anthropiques de gaz à effet de serre qui sont la cause de la hausse de la fréquence et de la sévérité des vagues de chaleur dans le monde.

Présentation générale du rapport

Ce rapport fait l'état des lieux des connaissances sur les vagues de chaleur. Le premier chapitre (B) est consacré à l'historique récent, au contexte actuel, ainsi qu'aux projections dans un futur proche et un futur plus éloigné, que cela soit pour les vagues de chaleur terrestres mais aussi pour les vagues de chaleur marines. Ce chapitre documente également les îlots de chaleur urbains ainsi que l'attribution des vagues de chaleur au changement climatique. Le chapitre suivant (C) présente quant à lui les impacts dans différents domaines. Certains impacts des canicules parfois spectaculaires sont mis en avant par les médias, tels que les vignes brûlées par le soleil (chapitre C, impacts sur l'agriculture), les feux de forêts beaucoup plus nombreux qu'en temps ordinaire (chapitre C, impacts sur la biodiversité terrestre) ou même plus récemment la surmortalité (chapitre C, impacts sur la santé). Le bilan sanitaire des canicules sur France publié fin novembre 2022 par Santé publique France démontre qu'il faut rester vigilant (Santé publique France, 2022).

Le chapitre D est consacré à la politique française de gestion des vagues de chaleur. Le chapitre E décrit les outils disponibles puis le chapitre F donne quelques exemples d'adaptation aux vagues de chaleur, couvrant un spectre allant des politiques publiques aux actions concrètes de mise en œuvre.

Concepts associés aux vagues de chaleur et développés dans le rapport

Définitions des vagues de chaleur

Comme le rappelle l'Organisation météorologique mondiale (OMM, 2015), il n'y a pas de définition universelle des vagues de chaleur et l'on admet communément qu'une vague de chaleur est une période de temps inhabituellement chaud et sec ou chaud et humide, qui dure au moins deux à trois jours et qui a un impact discernable sur les activités humaines. Cette présentation, qui se veut universelle, reste assez vague, notamment, en raison de la diversité des climats présents sur le globe. Par exemple, les températures atteintes lors d'une vague de chaleur en Afrique saharienne seront clairement bien supérieures à celles atteintes durant un épisode chaud en Finlande. La perception de la chaleur, ses effets sur la santé, sur l'environnement et les secteurs socio-économiques varient fortement d'un pays à l'autre et même d'une région à une autre, expliquant l'absence d'une définition universelle.

De ce fait, le terme « vague de chaleur » est un terme générique qui désigne une période plus ou moins longue au cours de laquelle les températures peuvent entraîner un risque sanitaire pour la population.

Classés du plus court au plus long, ces extrêmes météorologiques différents prennent des appellations différentes :

- **Pic de chaleur** : chaleur intense de courte durée (un ou deux jours) présentant un risque sanitaire, pour les populations fragiles ou surexposées, notamment du fait de leurs conditions de travail ou de leur activité physique ; il peut être associé au niveau jaune de la carte de vigilance météorologique utilisée en France et en Europe ;
- **Épisode persistant de chaleur** : températures élevées (indice biométéorologique – IBM¹ – proche ou en dessous des seuils départementaux) qui perdurent dans le temps (supérieur à trois jours) ; ces situations constituant un risque sanitaire pour les populations fragiles ou surexposées, notamment du fait de leurs conditions de travail ou de leur activité physique ; il peut être associé au niveau de vigilance météorologique jaune ;
- **Canicule** : période de chaleur intense pour laquelle les IBM atteignent ou dépassent les seuils départementaux pendant trois jours et trois nuits consécutifs et susceptible de constituer un risque sanitaire notamment pour les populations fragiles ou surexposées. Elle est associée au niveau de vigilance météorologique orange ;

1. IBM : indice biométéorologique. Il s'agit de la combinaison des températures minimales et maximales moyennées sur trois jours.

- **Canicule extrême** : canicule exceptionnelle par sa durée, son intensité, son étendue géographique, à forts impacts non seulement sanitaires mais aussi sociétaux. Elle est associée au niveau de vigilance météorologique rouge.

Chacune de ces situations est donc associée à un niveau de vigilance météorologique spécifique (figure A 1).

Définitions	Vigilance météorologique correspondante	Populations susceptibles d'être impactées
Pic de chaleur : chaleur intense de courte durée (un ou deux jours)	jaune	<p>Populations fragiles : personnes âgées, enfants en bas âge, personnes prenant certains médicaments, personnes en situation de handicap.</p> <p>Populations surexposées : personnes sans abri, travailleurs surexposés à la chaleur, populations en habitat surexposé à la chaleur, sportifs, notamment de plein air</p> <p>Ensemble de la population exposée</p>
Épisode persistant de chaleur : températures proches ou en dessous des seuils départementaux et qui perdurent dans le temps (supérieure à trois jours).		
Canicule : période de chaleur intense pour laquelle les températures dépassent les seuils départementaux pendant trois jours et trois nuits consécutifs.	orange	
Canicule extrême : canicule exceptionnelle par sa durée, son intensité, son étendue géographique, à fort impact sanitaire, avec apparition d'effets collatéraux.	rouge	

Figure A 1 : Populations impactées selon le type de vague de chaleur.

Source : Ministère des Solidarités et de la Santé (2021).

Dans le volume 4 du rapport *Le Climat de la France au 21^e siècle* (Ouzeau et al., 2014), les vagues de chaleur sont définies différemment comme étant des périodes de cinq jours consécutifs avec une température maximale supérieure de 5 degrés à la normale 1976-2005. Une méthode de détection *a posteriori* des vagues de chaleur a été mise au point dans le cadre du projet Extremoscope pour être applicable à toutes les échelles spatiales et tous les horizons temporels (Ouzeau et al., 2016), de manière à pouvoir caractériser de manière universelle les épisodes passés mais aussi de manière à pouvoir se projeter dans les avenir proches et lointains. Cette méthode est décrite en annexe (cf. encadré 1).

Encadré 1

Méthode opérationnelle de détection des vagues de chaleur

La méthode opérationnelle de détection des vagues de chaleur utilisée en France depuis 2006 (Soubeyrou *et al.*, 2016) se base sur la température moyenne nationale quotidienne. Elle repose sur trois réglages : le seuil de température au-delà duquel un événement est détecté ($Spic = 26\text{ °C}$), le seuil qui définit le début et la fin de la vague de chaleur ($Sdeb = 23\text{ °C}$), et le seuil d'interruption ($Sint = 20\text{ °C}$) qui permet de fusionner deux épisodes consécutifs sans baisse significative de la température (figure A 2). Ce dernier seuil a été ajusté afin de détecter des épisodes de canicule clairement identifiés en France (1947, 1976, 1983, 1994 [Besancenot, 2002] et 2003). La détection s'effectue de la manière suivante : si la température atteint le seuil $Spic$, une vague de chaleur est détectée. Le début de l'événement est défini par le premier jour pour lequel la température est supérieure au seuil $Sdeb$. La vague de chaleur est interrompue si la température est inférieure au seuil $Sdeb$ pendant au moins trois jours consécutifs, ou si la température retombe (même occasionnellement) à des valeurs inférieures au seuil $Sint$. Une fois qu'une vague de chaleur est identifiée, elle peut être caractérisée par trois valeurs : la durée, la température moyenne maximale atteinte pendant l'événement, et l'intensité globale qui est définie par la différence cumulée entre la température et le seuil $Sdeb$ pendant l'événement, divisée par la différence entre $Spic$ et $Sdeb$ (zone rouge vif de la figure A 2). L'intensité globale représente la gravité d'un événement et devrait être proportionnelle à ses effets sur un secteur spécifique.

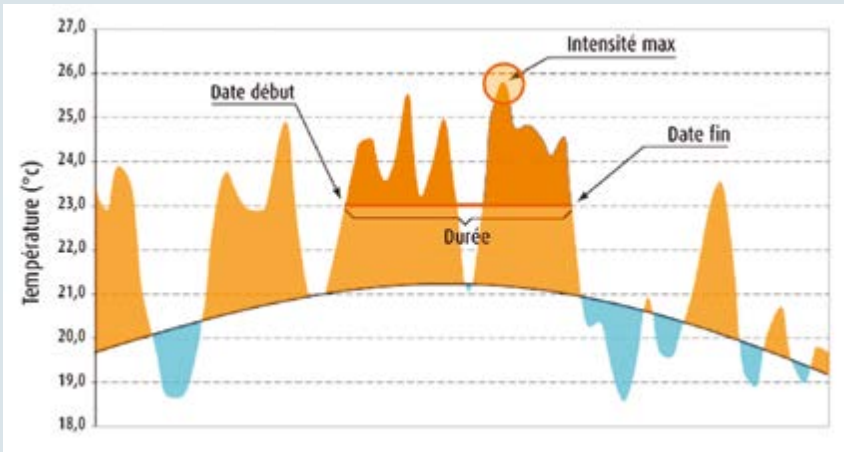


Figure A 2 : Caractérisation d'une vague de chaleur à partir de l'indicateur thermique quotidien sur la France (exemple d'une série temporelle du 30 juin au 5 août 1983) : Durée (début et fin), température maximale et intensité globale (zone maron du graphique). Les températures supérieures ou inférieures à la ligne climatologique (période de référence 1981-2010) sont représentées respectivement par une zone rouge ou bleue.

Source : Soubeyrou *et al.*, 2016.

Les définitions issues du plan national canicule² font office de référence pour le déclenchement des alertes (cf. figure A 1).

La **canicule** y est définie comme une période où les moyennes glissantes sur trois jours des températures minimales et maximales atteignent des seuils d'alerte départementaux, ces seuils pouvant être modulés par des facteurs aggravants de la chaleur (humidité, précocité, pollution de l'air, facteurs populationnels de type grands rassemblements...) en lien avec les agences régionales de santé (ARS). La canicule est donc caractérisée par des périodes de températures élevées de jour comme de nuit. Ces périodes sont susceptibles de constituer un risque pour l'ensemble de la population exposée. La possibilité de survenue d'une vague de chaleur est plus particulièrement renforcée au cours de la période de veille saisonnière, qui s'étend du 1^{er} juin au 15 septembre de chaque année.

Définition du risque

L'existence d'un risque naturel découle de l'articulation entre un phénomène naturel intense (cet événement étant par nature incertain, on le désigne sous le terme d'aléa ou de danger) et la présence d'enjeux, qui représentent l'ensemble des personnes et des biens (ayant une valeur monétaire ou non) pouvant être affectés par ce phénomène. Les conséquences d'un aléa donné sur les enjeux sont différentes selon la vulnérabilité de ces enjeux.

Bien que la norme ISO 14090 reprenne certaines définitions des rapports du GIEC, comme l'aléa, la vulnérabilité et l'exposition :

- Aléa, Danger : source potentielle de dommage.
- Vulnérabilité : propension ou prédisposition à subir des dommages.
- Exposition : présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de fonctions, ressources ou services environnementaux, d'éléments d'infrastructure ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans un lieu ou dans un contexte susceptible de subir des dommages.

Ces définitions sont tellement simplifiées qu'elles méritent d'être commentées.

En effet, l'aléa, le danger décrit comme « source potentielle de dommage » est représenté dans ce rapport par les vagues de chaleur, des pics de chaleur jusqu'aux canicules extrêmes.

En ce qui concerne la vulnérabilité, « propension ou prédisposition à subir des dommages », le glossaire du GIEC³ nous rappelle que cette définition englobe plusieurs concepts ou éléments, notamment les notions de sensibilité ou de fragilité et l'incapacité de faire face et de s'adapter. Les conséquences d'un aléa sur les enjeux sont différentes selon la vulnérabilité de ces enjeux. Ainsi, dans l'exemple des vagues de chaleur, il apparaît (cf. encadré 1) que les personnes

2. <https://solidarites-sante.gouv.fr/actualites/presse/communiqués-de-presse/article/plan-national-canicule>

3. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/03/AR5_SYR_Glossary_fr.pdf

fragiles (personnes âgées ou enfants par exemple) sont déjà sensibles à des périodes de chaleur courtes.

Les risques naissent de la conjonction d'un phénomène physique déclencheur et d'une situation de vulnérabilité et d'exposition des personnes et des biens (figure A 3). Conséquences éventuelles et incertaines d'un événement sur quelque chose ayant une valeur, compte tenu de la diversité des valeurs, le risque est souvent représenté comme la probabilité d'occurrence de tendances ou d'événements dangereux que viennent amplifier les conséquences de tels phénomènes ou tendances lorsqu'ils se produisent.

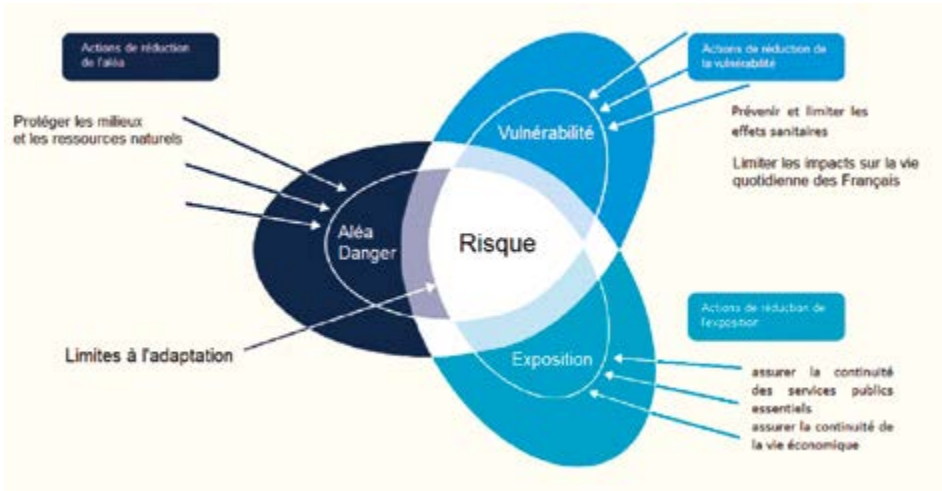


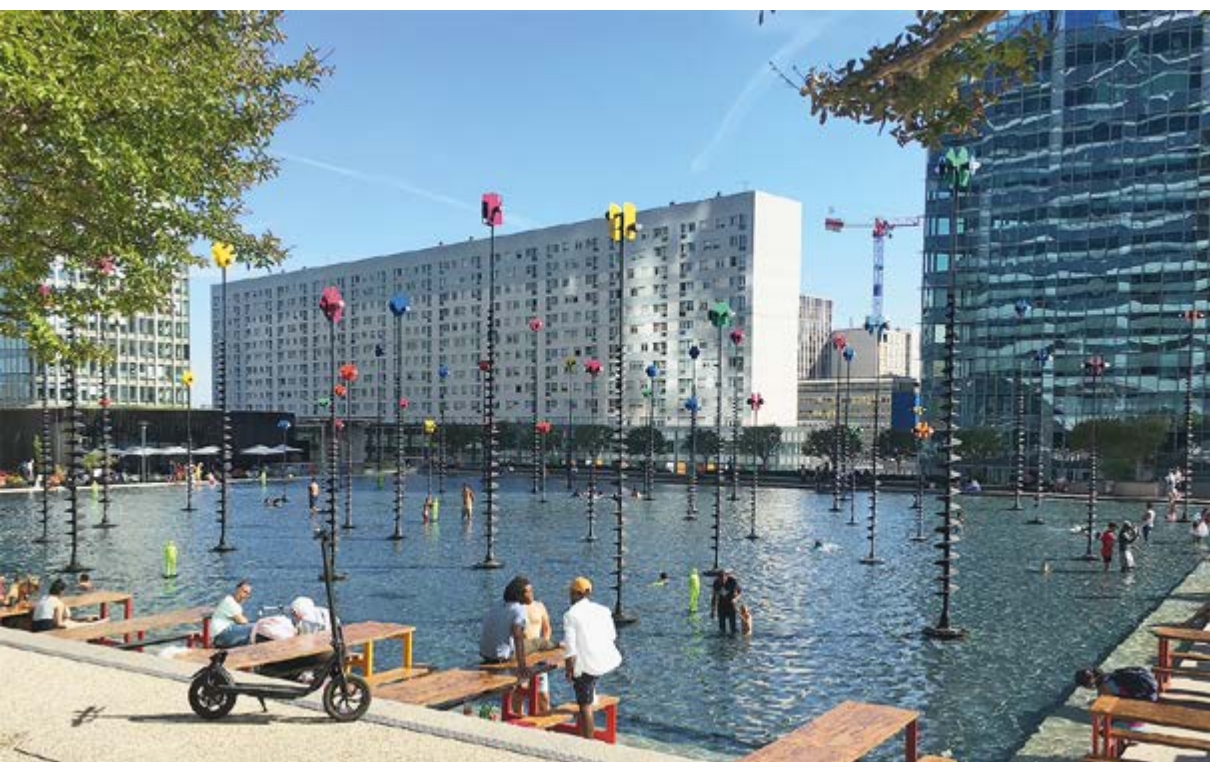
Figure A 3 : Cadre conceptuel du risque utilisé par les rapports d'évaluation du GIEC.

Source : ONERC d'après GIEC (IPCC, 2019).

Un risque est considéré comme « majeur » lors de la survenue d'un événement d'origine naturelle dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes, occasionner des dommages importants et dépasser les capacités de réaction de la société. Le qualificatif de « majeur » est bien sûr délicat à définir et peut varier dans le temps et dans l'espace. Les risques majeurs peuvent être caractérisés à la fois par une probabilité d'occurrence faible et une gravité telle qu'elle cause de nombreuses victimes, telles que les canicules et d'importants dommages aux biens et à l'environnement. Dans ce rapport, les canicules extrêmes telles que celle de 2003, mais également celles de 2019 ou plus récemment celles de 2022 peuvent être considérées en tant que risque majeur, notamment pour la population.

Chapitre B

Vagues de chaleur dans le climat passé, présent et futur. Attribution et îlots de chaleur urbains



Ce chapitre est consacré dans une première partie aux observations des vagues de chaleur et aux projections climatiques dans des futurs proches et lointains.

Les évolutions passées et futures des vagues de chaleur sont ensuite traitées avec plus de détails pour deux thèmes précis : îlots de chaleur urbains et les vagues de chaleur marine.

La dernière partie est consacrée à l'attribution des vagues de chaleur au changement climatique.

Tendances futures du changement climatique sur les vagues de chaleur et les canicules

Jean-Michel Soubeyrou,

Météo-France

Rappel de l'historique et tendances récentes :

Le changement climatique d'origine humaine affecte déjà de nombreux types d'événements météorologiques et climatiques dans toutes les régions du monde. Les preuves des changements observés dans les phénomènes extrêmes tels que les vagues de chaleur et, en particulier, leur attribution à l'influence humaine, se sont renforcées depuis le cinquième rapport d'évaluation (Rapport groupe 1 du GIEC, 2021). La multiplication des vagues de chaleur, des sécheresses et des inondations excède déjà les seuils de tolérance des végétaux et des animaux, provoquant la mortalité massive d'arbres, de coraux et d'autres espèces. Du fait qu'ils surviennent consécutivement, ces extrêmes météorologiques ont des répercussions en cascade de plus en plus difficiles à gérer. Ils exposent des millions de personnes à une insécurité alimentaire et hydrique aiguë, notamment en Afrique, Asie, Amérique centrale et Amérique du Sud, dans les petites îles et en Arctique (Rapport groupe 2 du GIEC, 2022).

La France fait partie des régions du monde très concernées par les vagues de chaleur. La canicule de l'été 2003 qui avait provoqué un excès de plus de 15 000 décès entre le 4 et le 18 août directement attribuable à la chaleur (Poumadère *et al.*, 2005) reste dans les mémoires. Depuis lors, si aucun événement n'a atteint la même sévérité, les vagues de chaleur, précédemment occasionnelles une fois tous les 5 à 10 ans, se rencontrent maintenant tous les étés depuis 2015 (à l'exception de 2021). Certains étés comme 2017 ou 2022 ont même connu au moins 3 événements. La figure B 1 présente l'historique des vagues de chaleur à l'échelle nationale depuis 1947, établi selon la méthode (Soubeyrou *et al.*, 2015) précédemment décrite (*cf.* encadré 1). Il intègre 46 événements à l'issue de l'année 2022, pouvant être classés en durée, intensité maximale et sévérité.

Si l'événement le plus long reste 1983, les vagues de chaleur les plus intenses sont, à égalité, celles de juillet 2019 et d'août 2003. En termes de sévérité, août 2003 reste l'évènement le plus sévère devant juillet 2006 et juillet 2018.

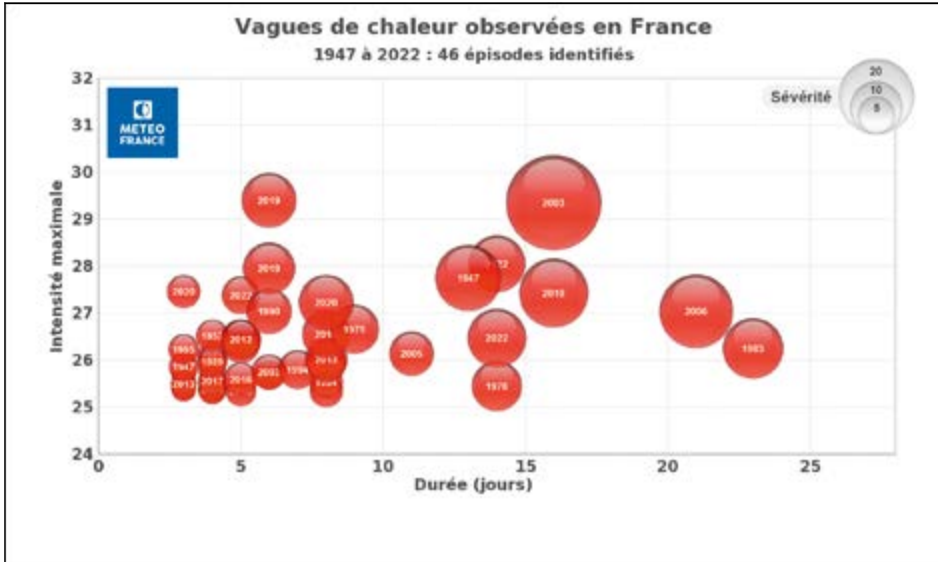


Figure B 1 : Recensement des vagues de chaleur en France de 1947 à 2022 à partir de l'indicateur thermique national.

Source : Météo-France.

La figure B 2, où les vagues de chaleur apparaissent selon leur année d'occurrence, illustre leur forte augmentation au ^{xxi} siècle. De 1947 à 2000, seulement 16 événements se sont produits en 54 années (soit 1 vague de chaleur tous les 3 à 4 ans). Depuis 2000, 30 événements ont été observés en 22 années soit nettement plus de 1 par an.

Le nombre de jours de vagues de chaleur a également fortement évolué. De l'ordre de 2 jours par an en moyenne avant 2000, ce nombre est passé à 10 jours par an dans la décennie 2011-2020.

Avec 33 journées, l'année 2022 détient le nombre record de jours de vagues de chaleur pour un seul été, loin devant 1983 (23 jours) et 2003 (22 jours).

Le constat sur l'évolution des vagues de chaleur se retrouve également sur différents indicateurs liés aux températures extrêmes en France. Ainsi, si le record absolu national a été battu en juin 2019 avec 46 °C à Vérargues, dans l'Hérault, il apparaît que 70% des stations d'observation du réseau principal de Météo-France ouvertes avant 2000 (environ 600 stations) ont battu leur record absolu de chaleur entre 2019, 2020 et 2022, montrant l'intensité exceptionnelle des canicules observées ces dernières années en France.

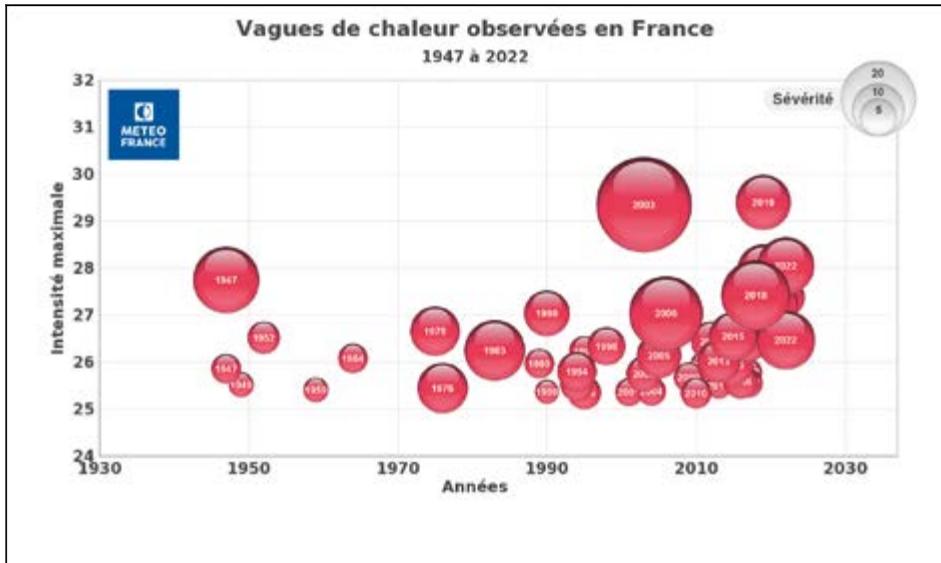


Figure B 2 : Recensement des vagues de chaleur en France de 1947 à 2022 à partir de l'indicateur thermique national selon leur date d'occurrence.

Source : Météo-France.

Tendances futures du changement climatique sur les vagues de chaleur et les canicules

Le dernier rapport du GIEC d'août 2021 ne laisse aucun doute sur l'augmentation de la fréquence des vagues de chaleur en climat futur en lien avec le réchauffement global de la planète, ainsi que sur l'évolution attendue à l'échelle du continent Européen.

Les projections climatiques régionalisées pour la France, établies à partir du jeu Drias-2020 (Soubeyroux *et al.*, 2021), confirment également que le nombre de jours de vagues de chaleur ou de canicules à l'échelle nationale évoluera à la hausse dans tous les scénarios climatiques, avec une intensité dépendant fortement de la trajectoire d'émission de gaz à effet de serre et de l'horizon temporel. En milieu de siècle, le nombre de jours de vagues de chaleur pourra augmenter de 2 à 4 jours par an dans un scénario de réduction des émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6), et jusqu'à 5 à 15 jours dans un scénario de fortes émissions (RCP 8.5). En fin de siècle (voir figure B 3), le nombre de jours de vagues de chaleur pourrait se stabiliser par rapport au niveau de milieu de siècle avec un scénario RCP 2.6 tandis que la hausse atteint 10 à 30 jours dans un scénario de fortes émissions (RCP 8.5) et jusqu'à 30 à 60 jours dans certaines simulations (figure B 3 centile 95).

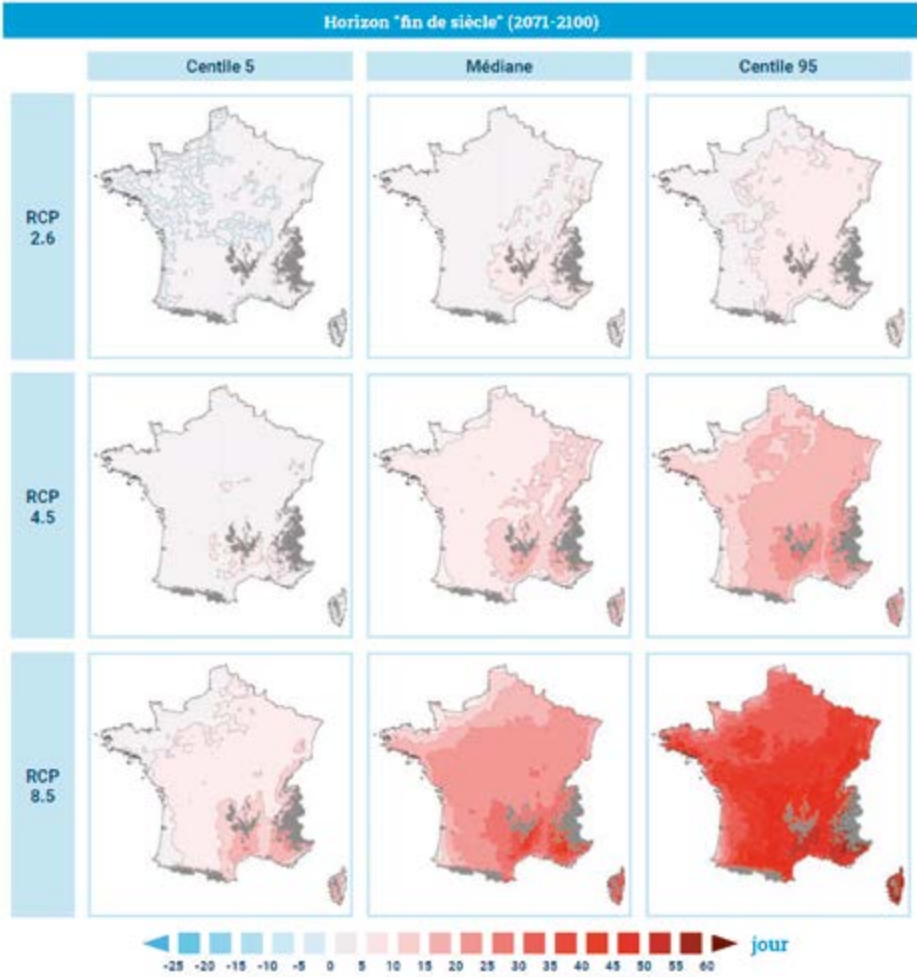


Figure B 3 : Évolution du nombre de jours de vagues de chaleur en fin de siècle (2071-2100) selon trois scénarios climatiques (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5). Le centile 5, la médiane et le centile 95 (respectivement colonnes de gauche, milieu et droite) décrivent la dispersion des réponses des différents modèles de climat utilisés dans l'ensemble Drias-2020.

Source : Rapport Drias (2021).

Au-delà de l'évolution du nombre de jours de vagues de chaleur, il est également important de noter l'extension de la saison d'occurrence de ces événements, qui est actuellement limitée à la période du 15 juin au 31 août, mais pourra démarquer fin mai et finir début octobre dans le futur (Ouzeau et al., 2016 et Schneider et al., 2022).

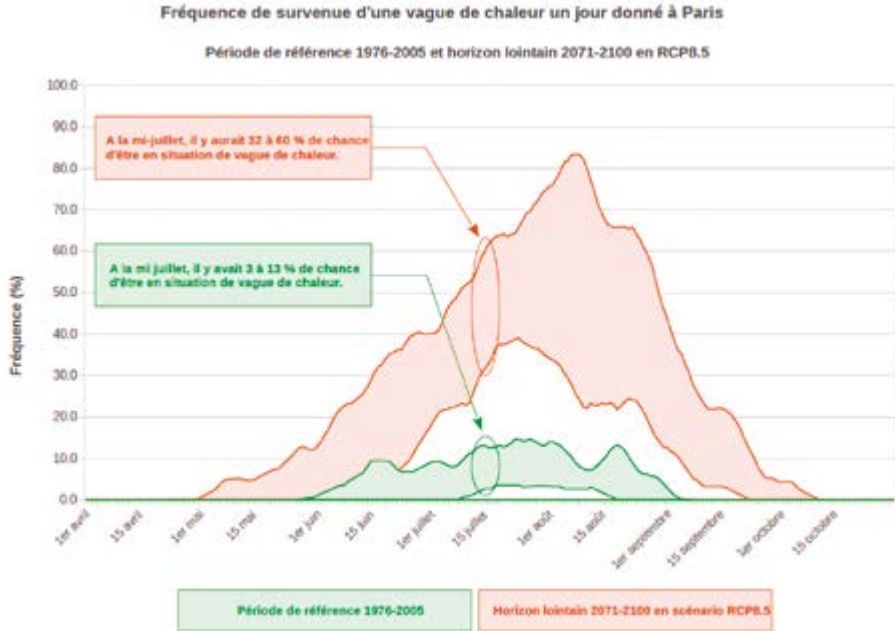


Figure B 4 : Approche multimodèle de la fréquence (en %) de survenue pour un jour donné d'une vague de chaleur à Paris. En vert, la période de référence (1976-2005) et en rouge l'horizon lointain en RCP 8.5 (2070-2100). Le panache représente les centiles 10 et 90, calculés sur l'ensemble des dix simulations utilisées.

Source : Schneider et al. (2022).

Un constat équivalent peut être fait sur le nombre de journées caniculaires (température maximale supérieure à 35 °C) ou de nuits tropicales (températures minimales supérieures à 20 °C). La figure B 5 sur l'évolution du nombre de nuits tropicales à l'horizon fin de siècle montre une augmentation faible et limitée aux seules régions méridionales dans un scénario RCP 2.6 et une hausse généralisée (hors montagne) en RCP 8.5 de + 10 à + 60 nuits en scénario médian et jusqu'à 20 à 80 nuits dans certaines simulations (centile 95).

Des études ont aussi montré que, dans un scénario sans réduction des émissions de gaz à effet de serre, les températures maximales pourraient dépasser + 50 °C au cours de la seconde moitié du xx^e siècle, dans des scénarios de fortes émissions (Bador et al., 2017).

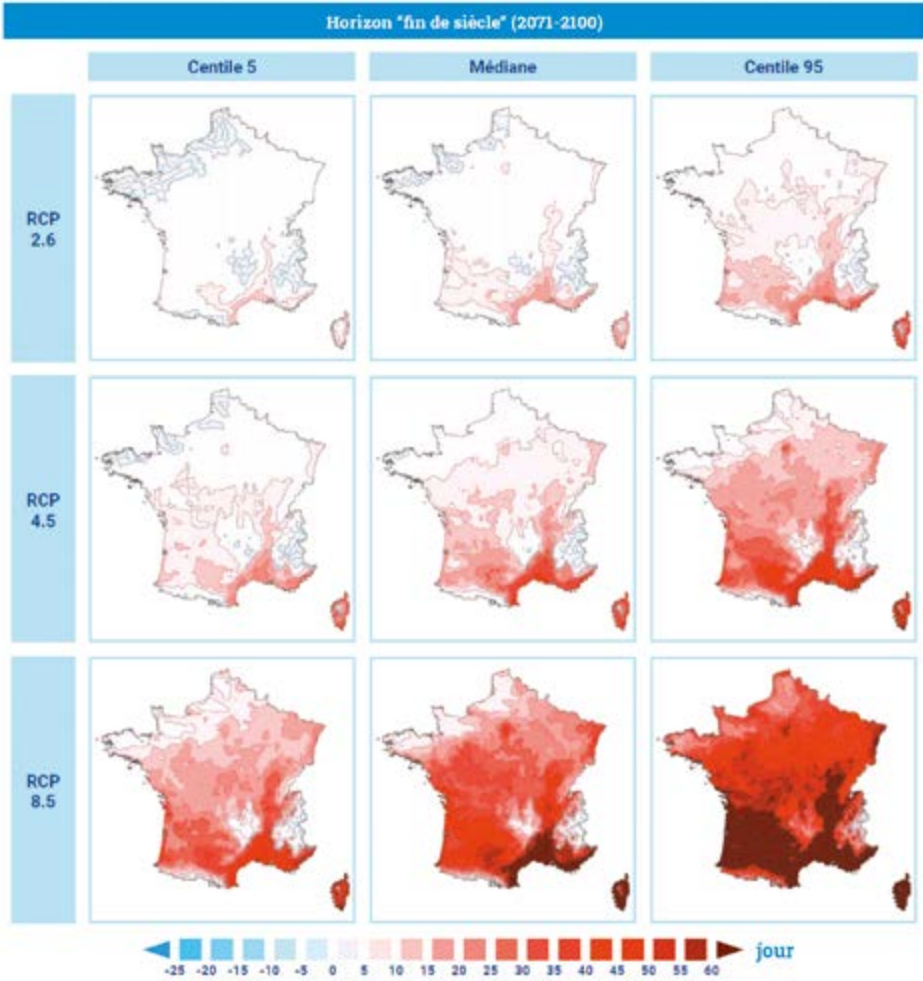


Figure B 5 : Évolution du nombre de nuits tropicales en fin de siècle (2071-2100) selon trois scénarios climatiques (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5). Le centile 5, la médiane et le centile 95 (respectivement colonnes de gauche, milieu et droite) décrivent la dispersion des réponses des différents modèles de climat utilisés dans l'ensemble Drias-2020.

Source : Rapport Drias (2021).

L'îlot de chaleur urbain

Spécificités urbaines : connaissances concernant l'îlot de chaleur urbain

Valéry Masson,
Météo-France

Introduction

Les villes englobent la majorité des personnes, des biens et des infrastructures. Cette évolution continuera dans le futur, certaines mégapoles dans le monde atteignant déjà plus de 20 millions d'habitants. Ceci rend les villes particulièrement vulnérables aux aléas météorologiques et au changement climatique.

Les villes sont impactées par les aléas météorologiques et climatiques, mais modifie aussi les conditions météorologiques locales (Masson *et al.*, 2020). En particulier, outre une qualité de l'air dégradée, du fait principalement des émissions de polluants, l'air dans la ville est aussi, lorsque les conditions météorologiques s'y prêtent, plus chaud que dans les environs, en particulier de nuit (comme nous le verrons ci-après). C'est ce que l'on appelle le phénomène d'îlot de chaleur urbain.

Encadré 2

Que nous dit Guy de Maupassant à propos de l'îlot de chaleur urbain ?

« Ils prirent un fiacre découvert, gagnèrent les Champs-Élysées, puis l'avenue du Bois-de-Boulogne. C'était une nuit sans vent, une de ces nuits d'étuve où l'air de Paris surchauffé entre dans la poitrine comme une vapeur de four. »

Cette citation issue de *Bel Ami* résume à elle seule nombre de spécificités liées à l'îlot de chaleur estival en ville, qui sont détaillées dans ce chapitre.

« L'air de Paris [est] surchauffé », plus chaud que les zones rurales alentour.

L'îlot de chaleur urbain est un phénomène nocturne.

Cette surchauffe se produit lors de conditions météorologiques spécifiques : par « nuit sans vent », ce qui empêche le mélange des masses d'airs chaudes (en ville) et fraîches (en campagne). Ceci se produit en particulier lors de conditions anticycloniques, les journées ensoleillées favorisant de forts îlots de chaleur la nuit suivante.

L'îlot de chaleur est particulièrement problématique en canicule en été (lors de « ces nuits d'étuve »). Cette surchauffe peut avoir des conséquences sur le confort thermique des habitants et même sanitaires (« entre dans la poitrine comme une vapeur de four »), comme nous le rappelle tristement la canicule de 2003.

La présence de végétation et d'arbres (« Bois-de-Boulogne ») permet de se retrouver dans un milieu plus frais et confortable, ce qui est aujourd'hui l'un des axes des collectivités territoriales et de l'État pour améliorer les conditions de vie en ville en été.

Et enfin, *Bel Ami* datant du XIX^e siècle, l'îlot de chaleur n'est pas lié au changement climatique, mais bien un phénomène produit par la ville. Mais il va aggraver en ville les conséquences des canicules, de plus en plus fréquentes et intenses du fait même du changement climatique.

L'îlot de chaleur urbain

La première mise en évidence scientifique de cette surchauffe urbaine a été observée par Luke Howard sur Londres au début du XIX^e siècle, avec une différence entre ville et campagne de l'ordre de 3.7 F (environ 2 °C). Mais l'on retrouve aussi une référence à ce phénomène de climat urbain dans la littérature : dans *Bel Ami* de Maupassant (1885) (cf. encadré 2).

● Un phénomène nocturne

L'îlot de chaleur est le plus intense la nuit. Il se produit quelle que soit la taille de la ville considérée, même pour des villages de 1 000 habitants, mais son intensité est plus importante pour de grandes agglomérations. Il est à noter que c'est un phénomène météorologique, et non climatique : il peut varier d'un jour à l'autre, disparaître complètement une nuit puis être important la nuit suivante. Il se forme par vent faible et lorsque l'ensoleillement a été important en journée. En revanche, il est inexistant lorsqu'il pleut ou si le vent est fort, et faible si le temps est nuageux. En conditions estivales anticycloniques, la différence entre le centre-ville historique et la campagne peut atteindre 5 °C pour une grande ville régionale (de quelques centaines de milliers d'habitants), et même de l'ordre de 8 à 10 °C au maximum pour l'agglomération parisienne. Ceci fait qu'il n'est pas rare que les températures urbaines restent élevées, parfois au-dessus de 30 °C jusqu'à minuit en période de canicule.

La figure B 6 présente des mesures réalisées à pied et à partir d'une voiture instrumentée entre le centre de Paris et la lointaine banlieue au sud lors d'une nuit de la canicule de juin 2019. La température vers minuit à Châtelet à Paris atteint ainsi 32 °C, alors qu'elle n'est que de 22 °C à Épinay-sur-Orge. Il existe également des zones de fraîcheur au cœur des quartiers denses. Ainsi, la température mesurée par la station Météo-France du parc Montsouris est de l'ordre de 25,5 °C, plus fraîche de 1 C environ par rapport aux rues en bordure du parc, et plus fraîche de 3 °C par rapport aux rues un peu plus éloignées. De nouvelles mesures ont été faites pendant la campagne expérimentale sur le climat urbain PANAME2022¹ (Masson *et al.*, 2022), menée par des laboratoires du CNRS, de Météo-France et

1. <https://www.cnrs.fr/fr/paname-2022-des-campagnes-pour-etudier-la-qualite-de-lair-et-le-climat-urbain>

de nombreuses universités. Elles ont notamment montré qu'au cours d'un jour de canicule de juin 2022, le parc de Vincennes, pourtant aussi chaud en fin d'après-midi que la zone plus urbanisée des quais de Bercy dans Paris *intra-muros*, se refroidissait bien plus vite au coucher du soleil (avec un écart atteignant plus de 5 °C). Ceci montre que les parcs, et plus généralement la végétation (y compris dans les jardins privatifs) forment ce que l'on appelle des « îlots de fraîcheur ».

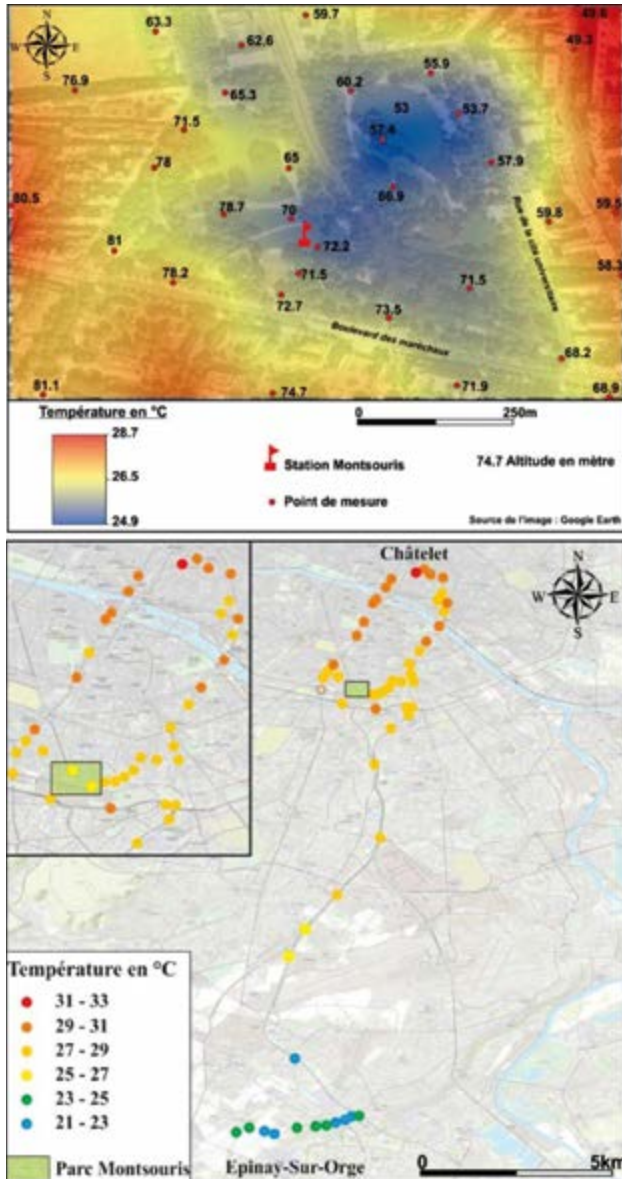


Figure B 6 : Répartition spatiale des températures de l'air dans le parc Montsouris à Paris (A, en haut) et le long d'un trajet Paris-Châtelet-Épinay-sur-Orge (B, en bas) par temps caniculaire (mesures itinérantes réalisées la nuit du 29-30 juin 2019 entre 23 h et 1 h TU du matin).

Source : Dahech et al. (2020).

- *En journée : peu ou pas d'îlot de chaleur*

En journée, malgré des différences très importantes de la température de surface (du goudron peut être facilement 20 °C plus chaud que de l'herbe), la température de l'air est assez similaire en ville, en zone périurbaine ou en campagne. Ceci est lié au fait que la chaleur rejetée par la surface est mélangée sur une épaisseur d'air de 1 000 à 2 000 m, et que cet air est fortement « brassé » même par vent faible. Il peut exister des variations de l'ordre de 1 °C entre centre et périphérie, à laquelle se superposent des variations du même ordre de grandeur à plus fine échelle. En revanche, il faut noter que les différences de température de surface vont moduler le confort thermique, même si les températures de l'air sont proches.

Les processus donnant naissance à l'îlot de chaleur urbain

- *Faux-semblants*

Les zones urbanisées sont des systèmes complexes. Ceci fait qu'il est difficile pour le non-spécialiste, et même pour des scientifiques qui travaillent dans un champ disciplinaire relativement proche, d'identifier les causes de l'îlot de chaleur urbain (ou « pourquoi les villes sont plus chaudes »). Par exemple, un raccourci – complètement faux – est de croire que l'îlot de chaleur urbain est créé par le CO₂ émis par la ville². D'autre part, même si les îlots de chaleur se produisent souvent de manière concomitante avec les épisodes de mauvaise qualité de l'air, ceci est simplement dû aux conditions météorologiques favorables aux deux phénomènes, sans lien significatif entre pollution et chaleur nocturne. Tout cela peut conduire à de nombreuses représentations fausses des causes de la surchauffe en ville, et donc peut rendre difficiles ou inefficaces des stratégies d'adaptation visant à réduire l'îlot de chaleur urbain. Cependant, les causes de l'îlot de chaleur urbain sont maintenant bien connues de la communauté scientifique (Oke et al., 2017).

- *Le phénomène clef : la chaleur solaire emmagasinée par les matériaux urbains est relâchée la nuit*

L'îlot de chaleur urbain est un phénomène météorologique dont l'intensité et la variabilité rapide sont gouvernées par le cycle diurne du rayonnement solaire. Il résulte principalement de l'imperméabilisation des surfaces en ville (bâtiments, routes, parkings...) et des processus thermiques, radiatifs et énergétiques que cela induit. La figure B 7 résume l'ensemble des interactions entre ces processus. L'élément clef à retenir est que la chaleur à l'origine de la surchauffe urbaine la nuit provient, paradoxalement, de la lumière du soleil le jour.

2. Alors que le CO₂ et les autres gaz à effet de serre sont bien à l'origine du réchauffement planétaire, les échelles de temps sont de l'ordre de quelques degrés Celsius par siècle. Le CO₂ émis par la ville va contribuer au réchauffement planétaire, mais n'a absolument aucun effet sur les variations de températures sur l'espace de quelques heures ou d'un jour à l'autre, même sur une zone géographique limitée.

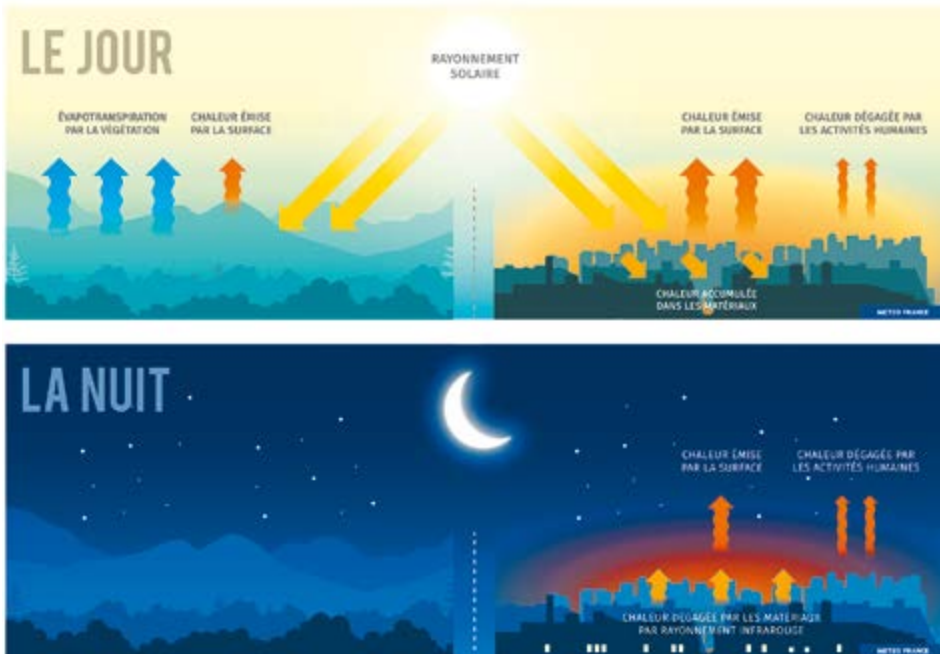


Figure B 7 : Processus physiques donnant naissance à l'îlot de chaleur urbain.

Source : Météo-France.

En journée, en ville, une grande partie de l'énergie reçue du soleil chauffe les matériaux urbains (brique, pierre, béton, routes, tuiles, etc.), qui stockent une grande quantité de chaleur. La forme tridimensionnelle complexe (3D) de la ville favorise également un tel stockage, avec plus de surfaces en contact avec l'atmosphère, et limite la perte d'énergie par rayonnement vers le haut. À noter évidemment qu'une partie de l'énergie reçue chauffe aussi directement l'air au contact du sol (comme en campagne), ce qui explique de fait qu'il fait plus chaud le jour que la nuit.

La grande différence vient du fait que, en campagne, le sol naturel et surtout les végétaux stockent peu de chaleur en journée. Elle est consommée pour évaporer et transpirer de l'eau du sol extraite par les racines des plantes (par un processus similaire au fait qu'il faut chauffer l'eau d'une casserole pour l'évaporer). Finalement, en fin de journée, les surfaces urbaines ont emmagasiné une très grande quantité de chaleur (pour un centre-ville dense, cela peut atteindre la moitié de l'énergie solaire totale reçue pendant la journée).

Ainsi, dès le coucher du soleil et pendant le reste de la nuit, cette chaleur est rendue à l'atmosphère. Ceci limite très fortement le refroidissement de l'air en ville, qui peut donc rester jusqu'à 5 °C plus chaud que dans les zones végétales et les campagnes, qui se rafraîchissent rapidement. L'air se refroidit tout de même en ville, du fait de l'apport d'air frais des alentours et, en zone périurbaine, du rayonnement thermique émis vers le ciel, que le moindre stockage d'énergie ne parvient pas à contrebalancer.

- **Le rôle, annexe mais significatif, des rejets de chaleur par la climatisation**

Les rejets de chaleur directement liés aux activités humaines peuvent aussi intensifier, un peu, un îlot de chaleur. En été, ces rejets sont principalement liés à la combustion (véhicules, industries, cuisine), aux consommations d'énergie d'appareils électriques, et à la climatisation. Les sources de chaleur associées aux moteurs thermiques sont faibles par rapport aux apports solaires en journée. Parmi ces sources de chaleur liées aux activités humaines, la seule qui impacte significativement la température de l'air extérieure est celle liée à la climatisation. Celle-ci influence légèrement l'îlot de chaleur, non seulement du fait de la consommation d'énergie propre des systèmes, mais surtout car la chaleur emmagasinée dans les bâtiments est directement rejetée dehors (en particulier pour les systèmes individuels ou de petite taille, les tours aéro-réfrigérées relâchant de la vapeur d'eau). En période de canicule, ceci peut mener à une augmentation de l'îlot de chaleur de l'ordre de 1 °C supplémentaire dans des mégapoles comme Tokyo ou les arrondissements au centre de Paris. Ceci peut conduire à des inégalités sociales, les personnes sans accès à la climatisation subissant une surchauffe un peu plus intense et inconfortable.

Recommandations sur l'adaptation des villes au changement climatique

- **Introduction**

Tenter de limiter l'intensité de l'îlot de chaleur en été est devenu un enjeu important pour les collectivités urbaines. Le réchauffement climatique ne fait que renforcer cet enjeu, car les îlots de chaleur vont aggraver en ville les conséquences de canicules de plus en plus fréquentes à l'avenir, avec potentiellement couramment des étés aussi chauds et secs que l'été 2022.

La prise de conscience par les villes de la problématique du confort thermique d'été (et non pas seulement d'hiver) remonte incontestablement à la canicule de 2003 et à ses conséquences sanitaires dramatiques avec une surmortalité de plus de 15 000 personnes en Île-de-France (Laaidi *et al.*, 2012). Les recherches interdisciplinaires menées depuis lors ont montré d'une part qu'il n'existe pas une seule solution pour répondre à cet enjeu, et d'autre part que les solutions peuvent varier d'une ville à l'autre, en fonction de ses caractéristiques urbaines, historiques, climatiques ou géographiques.

- **Des actions à différentes échelles**

Il existe un vaste panorama d'actions permettant de s'adapter à la chaleur en ville en été, que ce soit de jour ou de nuit. Cependant, ces actions font intervenir un très grand nombre d'acteurs, de l'habitant à la collectivité ou à l'État, chacun intervenant à ses propres échelles (usage, logement, quartier, ville, législation nationale...). Ci-dessous, seront donnés certains exemples de stratégies

d'adaptation, sans avoir vocation à être exhaustif, de façon à mettre en avant les multiples acteurs et solutions envisageables.

Toutefois, du fait de la nature complexe de la ville et des diverses problématiques en jeu, il faut tout de suite attirer l'attention sur le fait que certaines stratégies d'adaptation peuvent se révéler contraires ou incompatibles avec d'autres objectifs, qu'ils soient climatiques ou d'autre nature. L'exemple le plus frappant est le recours potentiel massif à la climatisation par les habitants et les immeubles de bureaux ou commerces, qui, s'il améliore le confort intérieur, va à la fois dégrader les conditions à l'extérieur, et surtout augmenter les émissions de gaz à effet de serre, en contradiction avec les objectifs internationaux de limitation du réchauffement climatique. Ainsi, de nombreuses stratégies mises en œuvre par les collectivités visent maintenant, non pas à interdire la climatisation, mais à réduire la nécessité de recourir à son utilisation.

De plus, il peut être perçu comme difficile de prendre des décisions dans un contexte incertain, notamment lié au changement climatique. Il faut donc s'efforcer d'opter pour des stratégies dites « sans regret ».

- *Quelques exemples de stratégies d'adaptation possibles.*

Quand on pense adaptation de la ville à la chaleur, il est assez naturel de penser aux adaptations du bâti, les bâtiments formant l'objet principal au sein des villes avec les infrastructures. Alors que les réglementations thermiques se sont focalisées depuis le choc pétrolier de 1973 sur la diminution de la consommation d'énergie en hiver (via une amélioration de l'isolation thermique), il existe d'autres pistes telles que le développement de réseau de froid urbain ou l'utilisation de solutions architecturales pour améliorer le confort estival en intérieur et limiter la contribution des bâtiments aux îlots de chaleur urbains. Par exemple, une isolation par l'extérieur va limiter l'accumulation de chaleur dans les matériaux en journée. De nouvelles techniques et matériaux de construction, comme le bois, ouvrent des perspectives intéressantes, mais nécessitent pour une mise en œuvre à grande échelle la formation des artisans et acteurs du bâtiment à ces techniques. S'inspirer des habitats traditionnels des pays chauds peut aussi donner des pistes, comme les villages blancs autour de la Méditerranée, qui permettent de refléter plus de la lumière du soleil, qui chauffe donc moins les matériaux. L'ajout de systèmes d'ombrages prenant en compte la course du soleil permet d'optimiser les gains solaires en hiver tout en limitant la surchauffe intérieure en été. De même, limiter les bâtiments de bureaux tout vitrés est une piste à suivre, car ceci permet de réduire le recours à la climatisation. Certaines de ces actions peuvent être imposées, en plus des réglementations nationales (notamment la réglementation thermique), via les règlements d'urbanisme.

À plus petite échelle, les habitants et usagers ont aussi un rôle à jouer en pratique, afin de limiter les conséquences en période de canicule (outre suivre les recommandations de la vigilance canicule, qui a été mise en œuvre après la canicule de 2003). Ainsi, une pratique habituelle dans le sud de la France consiste à

fermer ses volets le jour afin d'éviter que son logement ne surchauffe. Ne climatiser que certains espaces et non tout un logement permet aussi de limiter les conséquences néfastes décrites plus haut.

Au niveau de la collectivité, à l'échelle de l'ensemble d'un village, d'une ville ou d'une agglomération, il existe de nombreuses stratégies pouvant être mise en place à différentes échelles.

Réintroduire de la végétation en ville permet de recréer des îlots de fraîcheur, en s'attaquant à la cause même de l'îlot de chaleur urbain : la minéralisation des surfaces. Il faut noter toutefois que pour être efficace au maximum, la végétation a besoin d'eau, ce qui pose la question de la gestion de l'eau, qui est souvent gérée à l'échelle du bassin-versant actuellement. Mais des dispositifs à plus petite échelle pourraient être mis en œuvre en ville (réservoirs d'eau dans les jardins, structures de stockage d'eau dans les quartiers, etc.), de façon à conserver une partie de l'eau des pluies en hiver et à assurer un approvisionnement en période de sécheresse estivale.

La végétalisation peut être mise en œuvre sur l'espace public ou privé. Dans les espaces privés, il peut s'agir de jardins en zone périurbaine, de réduction d'espaces de parking, ou de végétation sur les murs et toitures végétalisées. Ces dernières apportent un bénéfice d'isolation pour le bâti, mais peu d'influence en période chaude, du fait du faible contenu en eau de la plupart des substrats de toitures végétalisées. Il convient de favoriser, dans la mesure du possible, la végétation de pleine terre par rapport aux arbres en pots ou toitures végétalisées. Pour l'espace public, ce peut être l'ajout d'espaces verts, d'arbres d'alignement, de corridors verts associés à des mobilités douces. Les arbres apportent le double bénéfice de l'évaporation et de l'ombrage. Ces espaces sont directement sous le pilotage des collectivités. Par exemple, de nombreuses villes ont lancé des projets de « cours oasis » dans les cours d'école (comme à Paris³), visant à rafraîchir les cours et proposer des espaces de fraîcheur aux habitants en dehors des périodes de classe. Ces réaménagements permettent aussi d'améliorer le bien-être des enfants, et de favoriser les usages multiples des espaces récréatifs végétalisés. Ainsi la végétation apporte aussi d'autres avantages, appelés services écosystémiques, de bien-être général, pour la biodiversité, de réduction des inondations, de meilleur lien social, etc.

- *Comment prendre en compte les spécificités de chaque ville ?*

Mais chaque ville possède ses propres spécificités, ne serait-ce que de par le climat dans lequel elle se trouve et le contexte géographique. Ainsi des villes côtières vont l'été être fréquemment soumises à des brises de mer le jour, avec des vents rafraîchissant les quartiers proches de la côte et des zones plus chaudes vers l'intérieur des terres. Toutefois, l'îlot de chaleur nocturne restera dans la zone la plus densément peuplée et bâtie, qui est souvent autour des quartiers des ports

3. <https://www.paris.fr/pages/les-cours-oasis-7389>

historiques, donc près de la mer. Les villes en zone montagneuses ou de collines observent, elles, des vents de pente et de vallée, avec souvent l'air froid qui s'accumule en fond de vallée la nuit. La compétition entre les effets urbains et de reliefs dépend de la taille de la ville et du relief environnant. Par exemple, l'îlot de chaleur de Dijon est parfois coupé en deux par l'air frais qui descend par la vallée de l'Ouche (cf. figure B 8). Des villes en plaine sont aussi soumises à des vents dominants. Prendre en compte ces spécificités locales pour exploiter des couloirs de ventilation pour rafraîchir la ville en été nécessite une certaine expertise de ces phénomènes. La ville de Stuttgart, en Allemagne, a par exemple, depuis les années 1950, identifié et protégé certains couloirs de ventilation nocturne provenant des collines aux alentours en limitant réglementairement la hauteur des constructions le long de ceux-ci. Ceci permet à la fois de ventiler les polluants en centre-ville et de rafraîchir celui-ci en été.

Les collectivités territoriales et les villes sont bien placées pour prendre en compte ces spécificités dans les stratégies d'adaptation. Leurs mises en œuvre peuvent être conduites par des actions réglementaires, d'incitation ou d'information. Mais avant tout, il convient à ces collectivités de connaître les spécificités de leur propre microclimat urbain. Cette connaissance fait partie de l'étape bien connue du processus de « diagnostic » des divers documents d'urbanisme.

Cette étape de diagnostic peut commencer par la consultation de l'état de l'art sur l'îlot de chaleur ou de guide dédiés à cette problématique (comme le guide « Kit des données clés de l'adaptation » récemment publié par l'ADEME⁴). Mais un meilleur diagnostic requiert la mise en place d'un réseau d'observation dédié, qui permet ainsi de connaître l'intensité de l'îlot de chaleur lors des périodes d'inconfort thermique estival à l'échelle de la ville, mais aussi les îlots de fraîcheur et les zones locales où l'îlot de chaleur est intensifié. En effet, il n'existe pas de mesures météorologiques opérationnelles de Météo-France au sein des villes, ces stations opérationnelles ayant vocation à observer la météorologie à plus grande échelle, et étant placées souvent dans le ou les aéroport(s) proche(s). Il existe quelques exceptions comme la station du parc de Montsouris (cf. figure B 6), mais qui n'est pas représentative des zones les plus urbanisées de la capitale. Plusieurs villes ont installé récemment un réseau de mesures du microclimat urbain ou de la température de l'air, comme Toulouse ou Grenoble. Ces réseaux de stations météorologiques, souvent positionnées sur le mobilier urbain comme les candélabres, permettent de cartographier, parfois même en temps réel, la température de l'air sur l'ensemble du territoire (zone urbaine et éventuellement ses environs). Ces réseaux pourraient être complétés dans le futur par l'exploitation de données de masse provenant par exemple de données de stations météorologiques personnelles dont les relevés sont diffusés sur internet, ou de données de température de l'air mesurées par les voitures connectées (et affichées sur le tableau de bord). Les cartes de la figure B 8 sur Dijon ont été produites à partir de données de véhicules connectées et d'un réseau de mesures.

4. <https://bibliothèque.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/3889-kit-des-donnees-cles-de-l-adaptation.html>

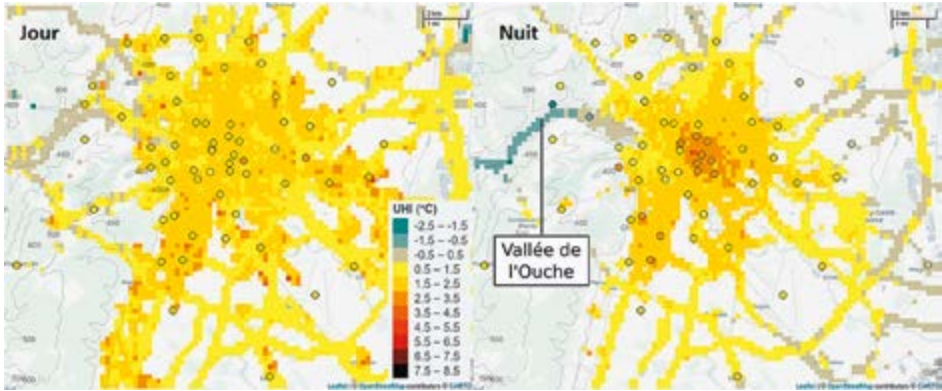


Figure B 8 : Îlot de chaleur en moyenne sur l'été 2018, de jour (à gauche) et de nuit (à droite), reconstitué à partir des données des voitures connectées des habitants. Les cercles correspondent aux données du réseau de station météorologiques installées sur des lampadaires par le laboratoire de recherche en climatologie de l'université de Dijon en lien avec la ville. L'îlot de chaleur est la différence entre la température de l'air en ville en campagne.

Source : Marquès et al. (2022).

Il convient de souligner que les mesures satellites de température ne permettent pas de mesurer la température de l'air, mais seulement la température de la surface. Ceci qui explique pourquoi ces thermographies satellites font souvent ressortir les zones industrielles, souvent très minérales et peu ombragées, comme très chaudes en journée, alors que la température de l'air n'y est pas particulièrement plus élevée en journée qu'ailleurs dans la ville ou alentours. Cependant ces données peuvent être pertinentes pour l'identification de zones de confort thermique (la température de surface influençant le confort thermique en plus de la température de l'air). Mais les images satellites ne permettent pas d'observer l'îlot de chaleur nocturne. Ainsi un réseau de mini-stations météorologiques est nécessaire pour permettre aux collectivités d'avoir accès aux mesures de l'îlot de chaleur.

Outre l'étape de diagnostic, la planification urbaine peut nécessiter l'évaluation de scénarios d'aménagement. En ce qui concerne l'évaluation de stratégies visant à réduire l'îlot de chaleur urbain ou l'inconfort thermique estival des habitants, il existe des outils de simulation sur ordinateur basés sur les connaissances scientifiques en climatologie urbaine. Les administrations au sein des villes n'ont pas l'expertise requise pour de telles études, mais d'autres acteurs peuvent leur proposer l'évaluation de divers scénarios. Cette démarche permet de mieux prendre en compte les phénomènes spécifiques à chaque ville ou territoire.

Conclusion

L'îlot de chaleur urbain est devenu un enjeu pour les villes, car il aggrave les conséquences du changement climatique, en particulier des vagues de chaleur en été. Les causes de l'îlot de chaleur sont connues, à savoir principalement la minéralisation des surfaces. Mais les enjeux actuels nécessitent de mieux connaître ses spécificités à fine échelle afin de répondre au plus près aux besoins des habitants et acteurs urbains. Les collectivités des territoires urbanisés doivent à présent inclure les problématiques de confort d'été dans la planification urbaine, et disposent pour cela de nombreuses opportunités mais font aussi face à des difficultés d'implémentation. Apprendre des situations passées, telles les canicules de 2022, nous permet d'appréhender les effets combinés de l'îlot de chaleur urbain et du changement climatique en ville. Dans le futur, les projections climatiques prendront en compte directement les effets des villes sur le microclimat local et régional (Michau *et al.*, 2022), ce qui permettra d'avoir accès à de meilleures projections à fine échelle des impacts du changement climatique.

Attribution des vagues de chaleur à l'influence humaine

Aurélien Ribes,

Centre national de recherches météorologiques,
Météo-France, CNRS, université de Toulouse

Sur la base de nombreuses publications et de différents rapports (IPCC, 2021, et précédents rapports d'évaluation ; Soubeyroux *et al.*, 2021), le constat général sur l'accroissement en fréquence et en intensité des vagues de chaleur est désormais bien établi, à la fois dans les observations et dans les projections pour le *xxi*^e siècle. Au-delà de ce constat, la communauté scientifique s'est intéressée ces dernières années à l'étude de certains événements extrêmes particuliers, dans le but de déterminer dans quelle mesure ces événements sont dus au changement climatique – et, de ce fait, causés par l'homme.

Ces études rétrospectives visent tout d'abord à caractériser l'événement (localisation, durée, intensité), et à évaluer la probabilité d'un tel événement dans le climat actuel (incluant l'influence humaine, également appelé climat « factuel »), ce qui caractérise sa rareté. Ensuite, le volet « attribution » à proprement parler cherche à quantifier de combien l'influence humaine a modifié la probabilité ou l'intensité de l'événement étudié. On estime pour cela les caractéristiques du climat « contre-factuel », c'est-à-dire le climat tel qu'il aurait été sans perturbation humaine *via* l'émission de gaz à effet de serre ou d'aérosols. Certaines études décrivent également l'évolution attendue des caractéristiques (fréquence, intensité) de l'épisode étudié dans un climat futur plus chaud.

De nombreuses études de ce type ont été réalisées au cours de la dernière décennie (Herring *et al.*, 2021, et précédents numéros), sur des événements météorologiques de nature très variée, incluant canicules, mais aussi vagues de froid, épisodes de fortes précipitations, sécheresses, tempêtes, cyclones, incendies, etc. L'étude de cette riche bibliographie suggère que, d'un point de vue qualitatif, l'étude des canicules est relativement simple puisqu'à peu près partout, l'influence humaine sur le climat, dominée par l'accroissement de l'effet de serre, tend à réchauffer le climat et favoriser les vagues de chaleur (IPCC, 2021). En revanche, la quantification exacte de cette contribution demande un peu plus d'attention.

Parmi les événements récents ayant touché la France, la canicule de juillet 2019 a fait l'objet d'une attention particulière (Robin et Ribes, 2020 ; Vautard *et al.*, 2020 ; Robin *et al.*, 2021). Du 21 au 26 juillet 2019, des températures très élevées ont concerné une grande partie de la France, avec de nombreux records absolus de températures à la clé, dont 42,6 °C à Paris-Montsouris, ou 41,3 °C au bord de la mer du Nord à Dunkerque, et la journée la plus chaude en moyenne sur le pays, depuis le début des mesures en 1947. L'étude détaillée de cet événement, illustrée figure B 9, offre différents enseignements :

- Caractérisation : il s'agit d'un événement relativement rare dans le climat de 2019, déjà marqué par le changement climatique anthropique, avec une

probabilité d'environ 1/40 (un événement aussi chaud est observé en moyenne une fois tous les 40 ans).

- Changement de fréquence : sans influence humaine, un tel événement aurait été beaucoup moins probable (environ 1/20 000), et peut-être même impossible (une probabilité de 0 n'est pas exclue). L'influence humaine sur le climat a donc multiplié la probabilité de cet événement par environ 600 ; mais l'incertitude sur ce chiffre est grande (entre $\times 20$ et l'infini).
- Changement d'intensité : en termes d'intensité, l'influence humaine a contribué à augmenter les températures d'un tel événement d'environ 2,1 °C (de 1,5 à 2,7 °C). De façon remarquable, 2 °C de réchauffement suffisent à induire un changement majeur de la probabilité.

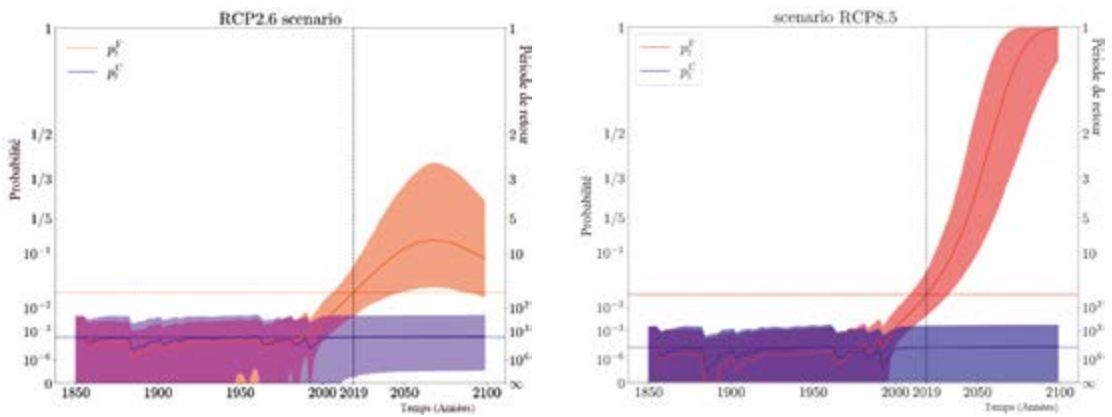


Figure B 9 : Évolution de la probabilité d'occurrence de type Juillet 2019 (définie comme une température moyenne France sur 3 jours supérieure à 28 °C), dans les mondes factuels (rouge, incluant l'influence humaine) et contrefactuel (bleu, sans influence humaine), pour deux scénarios différents d'émissions de gaz à effet de serre couvrant le XXI^e siècle (RCP 2.6 : émissions en baisse rapide et neutralité carbone atteinte avant la fin du siècle, à gauche; RCP 8.5 : émissions en hausse marquée tout au long du XXI^e siècle, à droite).

Source : Robin *et al.*, (2021).

Appliqués à d'autres événements chauds, tels que les canicules observées en 2020 ou 2022, ces chiffres varient, en particulier en termes de probabilité d'occurrence (dans le climat actuel comme dans le climat contrefactuel). L'épisode de 2019 était remarquablement intense, donc plus rare que ceux observés plus récemment (notamment 2020 et 2022). En revanche, le réchauffement additionnel induit par l'activité humaine varie peu d'un épisode à l'autre, et reste compris entre 2 °C et 2,5 °C.

De nombreuses vagues de chaleur ayant concerné d'autres régions du monde ont fait l'objet d'étude du même type. Parmi les exemples récents les plus frappants, la canicule de 2021 sur la côte Pacifique du Canada (Colombie Britannique, voir article ci-après) et des États-Unis (Oregon, Washington) a fait l'objet d'une attention particulière car cet événement semble particulièrement extrême (records absolus parfois battus de 5 °C, température de 49,6 °C enregistrée à 50° N de latitude, et importants feux de forêt associés). L'analyse de cet événement indique que plusieurs facteurs ont contribué à rendre cet événement exceptionnel, et que sa probabilité dans le climat actuel demeure très faible (e. g., 1/1 000; Philip *et al.*, 2021). Le réchauffement anthropique fait partie des facteurs favorisant cet événement (contribution d'environ + 2 °C), sans expliquer à lui seul l'écart entre cet événement et les précédents records locaux. Bien que très rare dans le climat actuel, un événement de ce type deviendra relativement commun à + 2 °C de réchauffement global.

Enfin, on peut noter que des vagues de chaleur survenant en dehors de l'été peuvent être étudiées et caractérisées de la même façon. Par exemple, les événements chauds ayant concerné la France en septembre 2020 ou fin décembre 2021 ont fait l'objet d'études spécifiques. Si les niveaux de température atteints sont nettement plus faibles que ceux observés pendant les vagues de chaleur du cœur de l'été, ces épisodes induisent d'autres impacts, spécifiques à la saison, e. g., végétation, sports d'hiver, etc.

Au-delà des résultats scientifiques, deux autres dimensions méritent d'être soulignées : la dimension communication et la dimension juridique.

Sur le volet communication, plusieurs auteurs considèrent que la survenue d'un événement extrême en lien avec le changement climatique offre une fenêtre d'opportunité pour sensibiliser, par l'exemple, le grand public sur l'impact du changement climatique en termes d'événements extrêmes, et les multiples conséquences associées. Ce point de vue est à l'origine de la réalisation de nombreuses études d'attribution « rapides » (cf. <https://www.worldweatherattribution.org/>), typiquement quelques jours ou semaines après la survenue d'un événement, afin de fournir un diagnostic sur le rôle du changement climatique, alors que l'événement est encore très présent dans les mémoires. Au niveau national, de telles études ont été menées en partenariat par Météo-France et l'IPSL, via les projets Extremoscope et la convention services climatiques, soutenus par le ministère de la Transition écologique. Les résultats obtenus pour certains de ces événements sont accessibles en ligne sous forme de fiches¹, et ont fait l'objet d'actions de communication. Plus généralement, les études d'attribution favorisent la réflexion sur l'adaptation, en permettant de situer les canicules récentes dans une perspective de changement climatique, et en illustrant ce que pourraient être les canicules du futur.

1. <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/212>

La dimension juridique des études d'attribution est encore balbutiante – émergente, au mieux, dans la littérature scientifique. Elle mérite toutefois une certaine attention. Les études d'attribution visent à établir et à quantifier la responsabilité des activités humaines dans la survenue d'un événement particulier, auquel sont généralement directement associés un certain nombre de dommages ou de pertes (humains, matériels, environnementaux, etc.). Dans la mesure où les responsabilités de différents acteurs (États, entreprises notamment) dans les émissions historiques de gaz à effet de serre sont connues, ces études pourraient être utilisées pour pointer la responsabilité de ces acteurs dans les dommages causés, et éventuellement leur demander des compensations. Bien que cette possibilité reste spéculative à ce jour, elle ne doit pas être ignorée.

Chapitre C

Impacts sectoriels et sur les milieux naturels des vagues de chaleur



Le bilan dressé dans le précédent chapitre est sans ambiguïté. Les vagues de chaleur ont déjà beaucoup marqué notre passé et continueront à marquer nos vies dans les prochaines décennies et même au-delà selon nos émissions de gaz à effet de serre.

Ce chapitre traite des impacts écologiques, économiques et sociétaux.

Les deux premiers articles s'intéressent à des exemples hors de nos frontières, avec l'exemple de la canicule de juin 2021 au Canada et de l'été 2022 en Chine.

Les articles suivants décrivent les impacts environnementaux sur les glaciers et la biodiversité marine et terrestre.

Ensuite les impacts de fonctionnement seront décrits pour quelques domaines tels que la production et la distribution de l'énergie électrique, le transport. Les impacts économiques seront également abordés.

Le dernier article dressera le bilan sociétal, y compris humain, des vagues de chaleur.

La vague de chaleur au Canada en juin 2021

La vague de chaleur sans précédent du Nord-Ouest Pacifique en juin 2021

Rachel H. White, Sam Anderson,

University of British Columbia

James F. Booth,

City College of New York ; City University of New York – The Graduate Center

Ginni Braich, Christina Draeger, Cuiyi Fei, Christopher D. G. Harley,

University of British Columbia

Sarah B. Henderson,

University of British Columbia

British Columbia Centre for Disease Control (BCCDC)

Matthias Jakob,

University of British Columbia

BGC Engineering Inc.

Carie-Ann Lau, Lualawi Mareshet Admasu,

University of British Columbia

Veeshan Narinesingh,

NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory ;

Department of Natural Sciences and Mathematics

Christopher Rodell, Elliott Roocroft, Kate R. Weinberger,

University of British Columbia

Greg West,

University of British Columbia

BC Hydro

Traduit de l'anglais par Jérôme Duvernoy (ONERC) sous le contrôle des auteurs

À la fin du mois de juin 2021 (environ du 25 juin au 2 juillet), une vague de chaleur d'une ampleur sans précédent a touché la région du Nord-Ouest Pacifique (PNW) au Canada et aux États-Unis. Les anomalies de température de l'air près de la surface ont dépassé de 16 à 20 °C la normale climatique sur une large région du sud-ouest du Canada et du nord-ouest des États-Unis (figure C 1a et C 1b), de nombreux endroits battant ainsi les records locaux de température maximale de plus de 5 °C (figure C 1c). Un nouveau record national de température de 49,6 °C a été enregistré à Lytton, en Colombie-Britannique (BC), le 29 juin (figure C 1b), soit 4,6 C de plus que le précédent record canadien. L'ampleur avec laquelle les précédents records de tous les temps ont été battus est extraordinaire si on la compare aux vagues de chaleur tristement célèbres qui ont frappé l'Europe en août 2003 et la Russie en juillet-août 2010 (figure C 1 c-e), bien que la vague de chaleur de juin 2021 dans le Nord-Ouest Pacifique ait été nettement plus courte que ces deux précédentes vagues de chaleur.

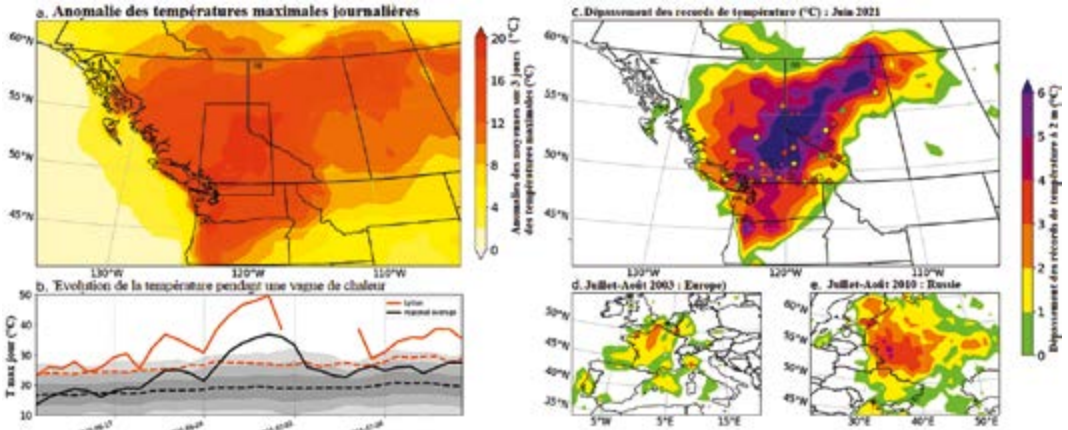


Figure C 1 : Températures de surface (2 m), avec des données provenant de la réanalyse ERA5 (Hersbach *et al.*, 2019), des observations de stations du Service météorologique du Canada¹ (panneau b) et de la base de données canadienne sur les extrêmes climatiques à long terme² (marqueurs individuels dans le panneau c). (a) Anomalies de température maximale quotidienne moyennée sur les 3 jours de la vague de chaleur par rapport à une climatologie quotidienne 1981-2020, c'est-à-dire les anomalies de température maximale quotidienne qui ont persisté pendant au moins 3 jours. (b) Températures maximales quotidiennes (trait continu) et climatologie 1981-2020 (trait pointillé); noir : moyenne spatiale des données ERA5 sur le rectangle noir du panneau a, avec ombrage $\pm 1, 2$ et 3 écarts types; rouge : observations de Lytton, BC (Lytton est indiqué par le triangle rouge dans le panneau a); les valeurs manquantes du 1^{er} au 5 juillet sont probablement dues à un incendie de forêt dévastateur à Lytton pendant cette période. (c-e) Dépassement des précédents records de température élevée pendant (c) la vague de chaleur de juin 2021 dans le Nord-Ouest Pacifique, (d) la vague de chaleur de juillet-août en Europe en 2003, et (e) la vague de chaleur de juillet-août en Russie en 2010. Les contours remplis montrent les données de réanalyse ERA5 depuis 1950; les marqueurs individuels en (c) montrent les données d'observation au Canada pour les stations dont les données remontent au moins à 1950, l'enregistrement le plus long remontant à 1874.

Source : White *et al.* (2022).

Un régime de circulation atmosphérique connu sous le nom de blocage atmosphérique a produit une dorsale (axe de haute pression) persistante sur la région du Nord-Ouest Pacifique, ce qui a conduit aux conditions de cette vague de chaleur extrême (Neal *et al.*, 2022). Les processus de réchauffement associés étaient composés par la subsidence et par le chauffage radiatif par ciel clair; cependant, les rétrotrajectoires des masses d'air, issues des données de prévision, révèlent que le chauffage diabatique en amont a également contribué de manière significative aux températures élevées de l'air proche de la surface. Nous donnons ici

1. https://climate.weather.gc.ca/doc/Historical_Data_How_to_Use.pdf

2. <https://www.canada.ca/en/environnement-climate-change/services/climate-change/canadian-centre-climate-services/display-download/technical-documentation-daily-climate-records.html> (2022).

un aperçu de certains des impacts de cet épisode de chaleur sans précédent ; de plus amples détails peuvent être trouvés dans White *et al.* (2022)³.

Impacts sur la santé humaine

Pendant cette vague de chaleur, une mortalité accrue a été signalée dans les provinces canadiennes de la Colombie-Britannique (BC) et de l'Alberta (AB) et dans les États américains de Washington (WA) et de l'Oregon (OR) (voir les contours noirs et les légendes de la figure C 1a pour les emplacements des provinces/États par rapport aux anomalies de température). Bien que les estimations du nombre total de décès dus à la canicule soient susceptibles de changer au fil du temps, à mesure que l'événement est étudié plus en détail, les données suggèrent que le nombre de décès a été sans précédent dans les régions touchées, en particulier en Colombie-Britannique. Entre le 25 juin et le 2 juillet, on a observé une surmortalité estimée à 740 personnes dans la province de Colombie-Britannique (Henderson, 2021), soit une augmentation de 95 % de la mortalité de la population sur une période de 8 jours. Le service des médecins légistes (The BC Coroners Service⁴) de la Colombie-Britannique a directement attribué 619 décès à la vague de chaleur extrême, la plupart (93 %) de ces décès étant survenus entre le 25 juin et le 1^{er} juillet (British Columbia Coroners Service, 2022). Dans d'autres régions, des rapports suggèrent 66 décès attribuables en Alberta (Gilligan *et al.*, 2022), au moins 100 décès liés à la chaleur dans l'État de Washington (Washington State Department of Health, 2022), et 83 décès liés à la chaleur dans l'État de l'Oregon (Oregon Office of Emergency Management, 2021), ce qui donne une estimation totale d'au moins 868 décès associés à la vague de chaleur dans l'ensemble de la région du Nord-Ouest Pacifique. La plupart des décès liés à la canicule sont survenus dans des résidences privées (British Columbia Coroners Service, 2022 ; Washington State Department of Health 2021), de manière plus importante :

- dans des quartiers avec des populations à faible revenu, avec peu d'interactions sociales et avec peu d'espaces verts (Henderson, 2022),
- chez les personnes âgées de 65 à 84 ans et chez les femmes qui présentent des risques plus élevés.

Le service des médecins légistes de Colombie-Britannique a également identifié la maladie mentale grave et le trouble de la toxicomanie comme des facteurs de risque importants (British Columbia Coroners Service, 2022).

Des impacts sanitaires graves mais non mortels ont également eu lieu, entraînant des visites aux services d'urgence des services de santé et des services sociaux américains pour des maladies liées à la chaleur dans la région (Oregon Office of Emergency Management, 2021) (Washington, Oregon, Idaho et Alaska). Ces passages aux urgences ont été 69 fois plus nombreux en 2021 que pendant les jours équivalents de 2019 (Schramm *et al.*, 2021). WorkSafe BC, une agence dédiée à

3. White *et al.*, «The Unprecedented Pacific Northwest Heatwave of June 2021». Nature Communications (2022). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1520351/v1>

4. The BC Coroners Service : <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/life-events/death/coroners-service>

la promotion de lieux de travail sûrs et sains dans toute la province de la Colombie-Britannique, a conseillé aux employeurs d'envisager la fermeture des lieux de travail pendant l'épisode de chaleur extrême s'ils ne disposaient pas de climatisation, et de nombreuses entreprises, notamment des restaurants, ont suivi ce conseil.

Biodiversité marine

Les écosystèmes intertidaux sont souvent utilisés comme témoins des effets écologiques du changement climatique et des événements météorologiques extrêmes (Harley *et al.*, 2008), car de nombreuses espèces qui les occupent vivent très près de leurs limites de tolérance physiologique (Helmuth *et al.*, 2006). Les jours les plus chauds de la vague de chaleur de 2021 dans la région du nord-ouest des États-Unis ont coïncidé avec des marées basses très basses en début d'après-midi dans la majeure partie de la mer des Salish (les eaux intérieures de la Colombie-Britannique et de l'État de Washington), ce qui a entraîné des températures de surface supérieures à 50 °C dans la zone intertidale. Ces températures extrêmes ont entraîné une mortalité importante pour de nombreuses espèces, notamment les bernacles, les moules, les huîtres, les palourdes, les gastéropodes, les crabes, les étoiles de mer, etc. Sur un rivage représentatif dominé par les moules, le taux de mortalité de la moule de baie (*Mytilus trossulus*) était supérieur à 70%, et on estime que plus d'un million de moules sont mortes sur un tronçon de 100 m de rivage. Les enquêtes menées sur un littoral dominé par les bernacles ont révélé des taux de mortalité également supérieurs à 70%, même en tenant compte de la mortalité de fond antérieure à la canicule. Bien qu'il soit difficile de faire des estimations précises de la mortalité totale induite par la vague de chaleur le long du littoral très hétérogène d'environ 7 500 km de la mer des Salish, des taux similaires de mortalité relative des bernacles et des moules ont été largement observés, et le nombre total d'invertébrés marins tués se chiffre presque certainement en milliards.

Feux de forêts et de broussailles

Les conditions chaudes et sèches persistantes associées à la canicule ont desséché la végétation forestière, entraînant un danger d'incendie extrême et une augmentation de l'activité des feux de forêt. Entre le 20 juin (avant la canicule) et le 3 juillet (après la canicule), l'indice forêt-météo (IFM), une mesure qui tient compte des effets de l'humidité du combustible et des conditions météorologiques sur le comportement du feu, a augmenté considérablement dans la majeure partie de la Colombie-Britannique et de l'Alberta (figure C 2). Les feux de forêt actifs en Colombie-Britannique sont passés de six feux avec 123,5 hectares en feu le 20 juin⁵, à 175 feux avec près de 79 000 hectares en feu le 3 juillet⁶. Le 11 juillet, le Centre interservices des feux de forêt du Canada (CIFFC) a porté le niveau de préparation national du Canada à 5, son rang le plus élevé.

5. CIFFC SitRep. <https://ciffc.net/en/ciffc/sitrep/2021-06-20>

6. CIFFC SitRep. <https://ciffc.net/en/ciffc/sitrep/2021-07-03>

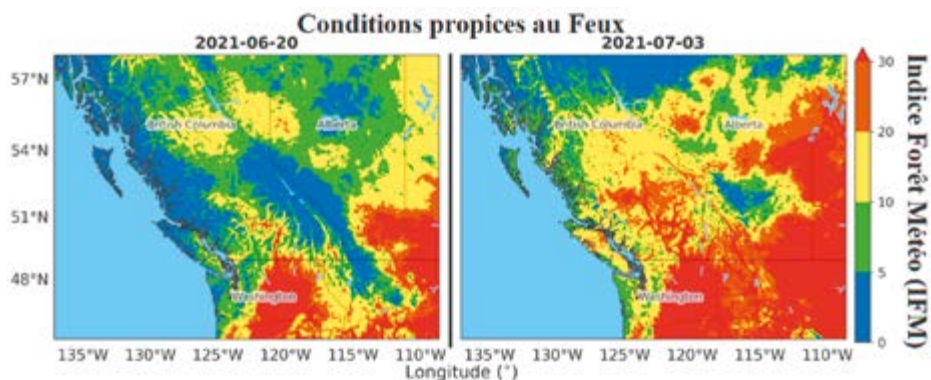


Figure C 2 : Indice feux de forêt météorologique (IFM) estimé par le modèle avant (à gauche) et immédiatement après (à droite) la vague de chaleur.

Source : White *et al.* (2022).

La majorité des nouveaux incendies survenus pendant la canicule étaient d'origine naturelle, les coups de foudre provenant de nuages *pyrocumulonimbus flammagenitus* (CbFg) se formant au-dessus de feux de friches déjà allumés contribuant de manière significative à l'allumage de nouveaux feux de friches. Dans la soirée du 30 juin, environ 120 800 coups de foudre ont été enregistrés (Vagasky, 2022), et le CIFFC a signalé au moins 127 nouveaux incendies de forêt déclenchés par la foudre entre le 30 juin et le 2 juillet. La zone de haute pression associée à la vague de chaleur a commencé à se désagréger vers le 30 juin, entraînant de nouvelles conditions chaudes, sèches, et maintenant venteuses et instables, permettant une croissance rapide des incendies de forêt. L'effondrement continu de la dorsale (axe de haute pression) et le passage d'un front froid ont donné lieu à davantage de nuages d'orage (CbFg) et d'éclairs, avec peu de précipitations. Ce cycle s'est produit chaque après-midi pendant la première semaine de juillet et a déclenché en moyenne plus de 40 nouveaux feux de forêt chaque jour en Colombie-Britannique.

Rendements agricoles

La canicule a eu des effets prononcés sur l'agriculture en Colombie-Britannique et en Alberta, notamment pendant les phases cruciales de croissance de nombreuses cultures. En comparant les rendements de 2021 aux valeurs prédites (à partir de régressions linéaires), nous constatons que, pour 26 cultures de plein champ, de fruits et de légumes pour lesquelles des données sont disponibles, 24 présentent des diminutions par rapport au rendement prédit en 2021, dont 7 affichent des baisses de rendement supérieures à 2 écarts-types (raisins, prunes, framboises, cerises douces, citrouilles, radis et tomates) et 12 autres des réductions comprises entre 1 et 2 écarts types (orge, canola, blé de printemps, pommes, nectarines, pêches, poires, choux de Bruxelles, laitue, pois verts, courges et courgettes). Il est extrêmement difficile d'isoler les effets d'un événement particulier

sur les données de rendement annuel, et ces baisses ne peuvent pas nécessairement être attribuées uniquement à la canicule de juin. En utilisant un indice de végétation par différence normalisée (NDVI) dérivé d'un satellite à résolution hebdomadaire pour analyser la chronologie des changements de l'état de verdure des cultures en fonction du déroulement de la canicule, nous avons constaté que, dans 6 des 8 zones agricoles de la Colombie-Britannique, une baisse notable du NDVI s'est produite pendant la période de la canicule, indiquant des réductions de l'état de verdure des plantes, et donc une réduction de la croissance, des dommages aux tissus végétaux ou une réduction de la densité des plantes. Le moment où ces baisses sont survenues suggère que la canicule a probablement joué un rôle important dans les baisses de rendement annuelles enregistrées. En outre, les rapports des agriculteurs en cours de saison, rapportés dans les journaux locaux, confirment l'impact de la canicule sur les cultures de fruits et légumes (CTV News⁷, CBC News 2021⁸).

Fonte des glaciers et des neiges

La vague de chaleur a eu une influence prononcée sur la cryosphère et l'hydrologie de la région, tant pendant l'événement que pendant les mois qui ont suivi. Les températures exceptionnellement élevées et le ciel dégagé ont entraîné une fonte rapide de la glace et de la neige, ce qui a considérablement augmenté le débit des cours d'eau dans les bassins où la neige ou la glace pouvait fondre. Dans de nombreux cas, des débits quotidiens records ont été observés, et certains records de tous les temps ont été battus. L'augmentation rapide du débit des cours d'eau a entraîné des alertes d'inondation pour plusieurs communautés en aval et un ordre d'évacuation dans la vallée de Pemberton. Les précipitations des 1^{er} et 2 juillet dans les montagnes Rocheuses, près de la frontière entre la Colombie-Britannique et l'Alberta, ont aggravé les inondations et les dommages (BC River Forecast Centre, 2021), entraînant des dégâts importants dans le parc provincial du Mont Robson en Colombie-Britannique et l'évacuation des randonneurs par hélicoptère (Roffel *et al.*, 2021).

Alors que les bassins sans couverture glaciaire importante ont connu des débits inférieurs à la normale dans les semaines et les mois qui ont suivi la canicule, l'afflux d'eau de fonte des glaciers dans les bassins glaciaires a entraîné des débits de fin d'été similaires à la moyenne historique, malgré la perte substantielle du manteau neigeux pendant la canicule. La capacité des glaciers à maintenir des débits normaux est remarquable compte tenu de la nature sans précédent de la canicule, et s'est faite au prix d'une perte de masse substantielle des glaciers (Menounos *et al.*, 2021). La capacité des glaciers à compenser de tels événements extrêmes devrait diminuer à l'avenir avec la poursuite du changement climatique (Clarke *et al.*, 2015).

7. <https://bc.ctvnews.ca/scorching-temperatures-cripple-crops-in-b-c-s-fraser-valley-1.5492713>

8. <https://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/heat-fruit-crops-okanagan-fraser-valley-1.6092155>

Glissements de terrain

Les feux de forêt peuvent entraîner des risques accrus d'inondation, d'érosion et de glissement de terrain, en raison des impacts sur la végétation et le sol (Jordan, 2009), ainsi des centaines de laves torrentielles (coulées de débris) postérieures aux feux de forêt ont été déclenchées par les pluies torrentielles de l'été et de l'automne 2021 dans le sud-ouest de la Colombie-Britannique. L'un des plus grands incendies associés à cette vague de chaleur a été le Lytton Creek Fire, qui a débuté au sud du village de Lytton et a brûlé environ 84 000 hectares (BC Wildfire Service, 2021), entraînant des dommages importants dans les réserves de Lytton et de la Réserve autochtone de Lytton. Les coulées de boue qui ont suivi le feu de forêt ont affecté les infrastructures ferroviaires et routières, notamment à la suite de plusieurs régimes de rivière atmosphérique (courants atmosphériques) extrêmes dans lesquelles des quantités importantes de vapeur d'eau sont transportées par l'atmosphère, conduisant à des pluies intenses et survenus en novembre 2021. En novembre 2021, des coulées de débris et des débordements ont compromis trois bretelles d'accès par pont à l'autoroute Transcanadienne, entraînant l'effondrement d'un pont et nécessitant des réparations sur un autre, et ont sectionné des infrastructures ferroviaires et routières (ponts et remblais) à neuf autres endroits (Lau *et al.*, 2022). Les inondations et les glissements de terrain ont probablement entraîné la catastrophe naturelle la plus coûteuse de l'histoire du Canada, avec des millions de dollars de dommages le long des autoroutes et des voies ferrées du sud-ouest de la Colombie-Britannique, les ponts, les voies ferrées et les remblais des autoroutes s'étant effondrés.

Conclusion

La vague de chaleur sans précédent qui s'est abattue dans la région du Nord-Ouest Pacifique en juin 2021 a été l'un des événements de chaleur extrême régionaux les plus anormaux survenus sur Terre depuis que l'on enregistre les températures (Thompson, 2022). Bien que des informations prévisionnelles aient été disponibles et que des efforts aient été déployés pour communiquer sur la gravité de l'événement et réduire la mortalité due à la chaleur, des centaines de décès liés à la chaleur se sont tout de même produits, ainsi que d'autres impacts humains et écologiques. La nature sans précédent de cet événement a rendu difficile l'anticipation et l'atténuation de ces impacts. L'étude *a posteriori* et ainsi la meilleure compréhension de ces impacts peuvent aider les communautés du monde entier à mieux se préparer aux événements de chaleur extrême qui battent des records et qui devraient se produire de plus en plus fréquemment à mesure que le climat continue de se réchauffer (Fischer, 2021).

La vague de chaleur en Chine au cours de l'été 2022

Une vague de chaleur sans précédent

Étienne Kapikian,
Météo-France

Une grande partie centrale, orientale et méridionale de la Chine a connu, au cours de l'été 2022, une vague de chaleur exceptionnelle, dont la combinaison entre durée, intensité et étendue géographique est sans équivalent depuis le début des mesures vers 1960 (cf. pages suivantes). De nombreuses grandes villes ont battu leur record absolu de température maximale, avec un mercure dépassant souvent les 40 °C et atteignant jusqu'à 45 °C, mais aussi de température minimale nocturne élevée, parfois au-dessus de 30 °C. L'été 2022 est ainsi de loin le plus chaud jamais observé en Chine (figure C 3).

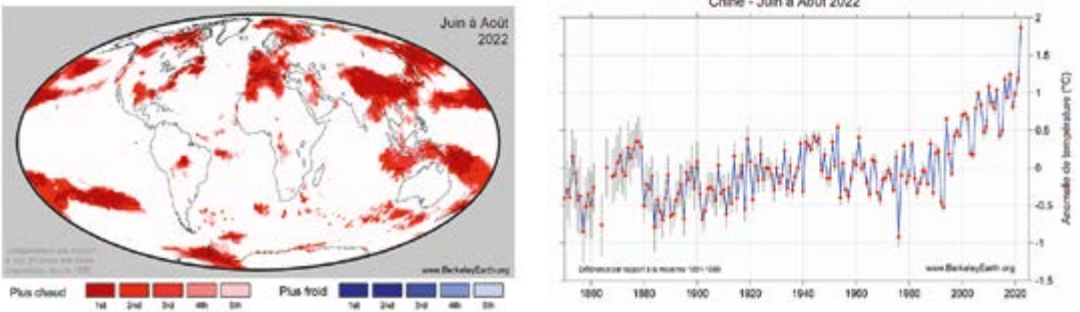


Figure C 3 : À gauche, régions du monde ayant observé un trimestre juin-juillet-août exceptionnellement chaud (niveau record en rouge foncé, recouvrant notamment une bonne partie de la Chine). À droite, graphique 1850-2022 montrant l'été météorologique 2022 de loin le plus chaud en Chine depuis le début des mesures, battant de plus de 0,5 °C le précédent record de l'été 2018. Même si la China Meteorological Administration (CMA) ne considère que les données plus complètes post-1961, les données compilées par Berkeley Earth depuis 1850 montrent qu'un tel été est inédit sur toute la période moderne.

Source : Berkeley Earth, <https://berkeleyearth.org/august-2022-temperature-update/>

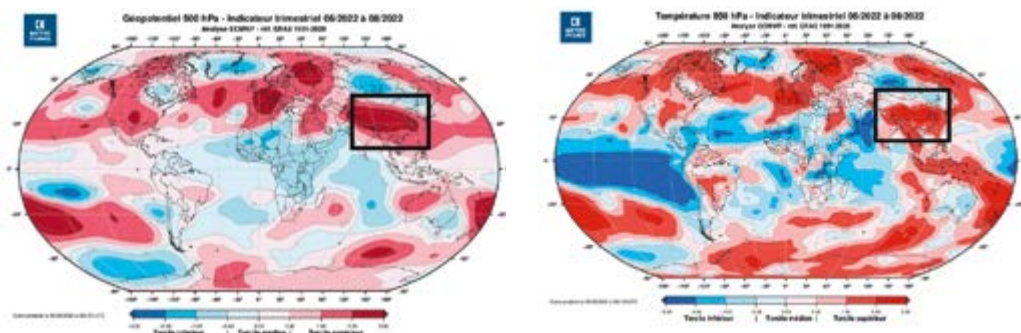


Figure C 4 : Anomalies normalisées du géopotential à 500 hPa (à gauche) et de la température à 850 hPa (à droite) par rapport à la moyenne 1991-2020 sur le trimestre juin-juillet-août 2022 selon la réanalyse ERA5 du CEPMMT. Une vaste portion de la Chine a été concernée par des anomalies dépassant 2 écarts types (en rouge foncé).

Source : Météo-France.

En lien avec la présence récurrente de hauts géopotentiels subtropicaux sur la Chine, dont les effets ont probablement été amplifiés par l'épisode La Niña en cours et la présence d'eaux remarquablement chaudes sur l'ouest du Pacifique (le tout étant aussi exacerbé par la tendance de fond du réchauffement global), l'épisode de chaleur intense, combiné à un important déficit pluviométrique, a débuté officiellement le 13 juin, a perduré en juillet avant d'atteindre son paroxysme au cours du mois d'août 2022, pour se terminer le 31 août. Selon les critères de vague de chaleur d'échelle nationale du service météorologique chinois (CMA), cet épisode a donc duré au total 79 jours, un nouveau record dépassant les 62 jours de la vague de chaleur de l'été 2013.

Plus de 300 parmi les 2 420 stations météorologiques du réseau de mesure national chinois ont battu leur record absolu historique de température maximale. 15 stations ont atteint ou dépassé la barre des 44 °C. Une alerte canicule nationale de niveau rouge a été émise pour la première fois par la CMA. La température a dépassé les 40 °C dans au moins une station de Chine tous les jours entre le 4 juillet et le 30 août inclus, soit pendant 58 jours consécutifs. Sur la période du 21 juillet au 30 août, une superficie inédite de 1,4 million de km² du territoire chinois a observé des températures dépassant ponctuellement les 40 °C, affectant au total une population de 300 millions de personnes¹).

De nombreuses provinces ont été concernées par des températures dépassant les seuils de canicule : Hebei, Sichuan, Chongqing, Hubei, Anhui, Henan, Jiangsu, Zhejiang, Shaanxi, Fujian, Guangdong, Guizhou, Hunan, Jiangxi, Qinghai, Xinjiang.

1. Source : <https://twitter.com/yangyubin1998/status/1564943693957582848>

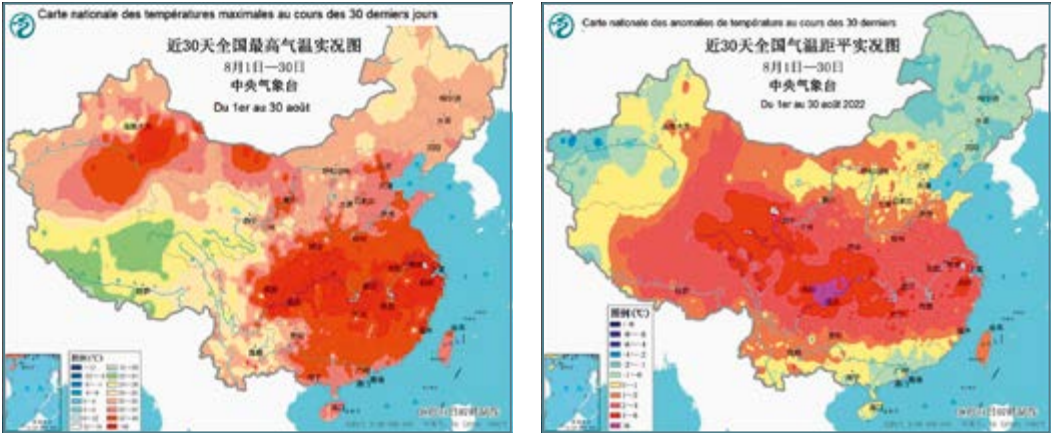


Figure C 5 : À gauche, carte des températures maximales atteintes sur la période du 1^{er} au 30 août 2022 montrant la superficie record concernée par des valeurs supérieures à 40 °C ; à droite, écart à la normale des températures maximales sur cette même période, atteignant localement + 6 °C sur le secteur de Chongqing.

Source : North Microel Electronics, www.nmc.cn.

Si des records absolus de chaleur sont tombés dès juin ou juillet, c'est surtout au mois d'août 2022 que le plus grand nombre de records a été observé. Certaines stations ont dépassé de multiples fois leur précédent record absolu de chaleur tous mois confondus, parfois plus de 10 voire 20 fois...



Figure C 6 : Exemple de températures maximales observées le 19 août 2022, incluant les 45 °C à Beibei atteints 2 jours consécutifs.

Source : National Meteorological Center, CMA, <http://www.nmc.cn/> ; traitement : É. Kapikian avec ogimet.com.

Les records absolus de température maximale de plusieurs provinces ont été battus :

- municipalité de Chongqing : 45,0 °C à Beibei les 18 et 19 août (ancien record provincial : 44,5 °C). Les 45,0 °C mesurés à Beibei sont non seulement un record absolu pour la municipalité de Chongqing mais aussi la plus haute température fiable² jamais mesurée en Chine en dehors de la région désertique du nord-ouest du pays dans la province du Xinjiang, où les records absolus locaux sont de l'ordre de 49-50 °C (région de Turpan) ;
- province du Hubei : 44,6 °C à Zhushan le 13 août ;
- province du Sichuan : 44,0 °C à Qu le 24 août (ancien record provincial : 43,5 °C en 2011) ;
- province du Guizhou : 43,5 °C à Chishui le 23 août ;
- province du Jiangxi : 42,6 °C à Xiushui le 23 août ;
- province du Jiangsu : 42,2 °C à Yixing le 15 août.

Exemples de records absolus observés sur quelques stations (les anciens records ont souvent été dépassés plusieurs fois) :

- 44,4 °C à Fengjie (Chongqing) le 15/08/2022, ancien record : 42,4 °C le 17/08/2019 ;
- 44,4 °C à Tongnan (Chongqing) le 17/08/2022, ancien record : 42,2 °C le 15/08/2006 ;
- 43,8 °C à Neijiang/Dongxing (Sichuan) le 23/08/2022, ancien record : 40,7 °C le 4/08/2021 ;
- 43,7 °C à la station de référence Chongqing-Shapingba le 19/08/2022, ancien record : 43,0 °C le 15/08/2006.

On notera aussi la minimale nocturne record de 34,9 °C ce même 19 août, la plus haute jamais mesurée en août en Chine ! La température moyenne quotidienne du 19 août atteint ainsi 38,9 °C, de loin un record absolu pour la station où les mesures ont débuté en 1933, et situé plus de 2 °C au-dessus du précédent record de température moyenne quotidienne. Le top 15 des jours les plus chauds, en température moyenne, appartient désormais exclusivement à 2022. À Chongqing, la température est restée sans discontinuer au-dessus de 30 °C, jour et nuit, du 6 août au 29 août, soit sur une durée de 22 jours et 19 heures. Au cours du seul été 2022, la température minimale nocturne à Chongqing a été supérieure au seuil des 30 °C au cours de 33 nuits : c'est autant de fois que pendant les 65 étés cumulés de 1951 à 2015 ! La température moyenne mensuelle d'août 2022 atteint un record de 35,3 °C à Chongqing, la plus haute température moyenne mensuelle jamais mesurée en août parmi toutes les stations de Chine.

2. La notion de record « fiable » est importante ici : en effet, il existe d'anciens relevés légèrement supérieurs à 45 °C dans un passé lointain, en particulier 45,2 °C à Xi'an (Shaanxi) en juillet 1934, mais la fiabilité de ces anciens relevés est mise en doute et ces mesures anciennes ne sont pas retenues comme officielles par le service météorologique chinois, qui se limite, pour la plupart des stations, aux données postérieures à 1960, avec quelques exceptions pour des stations de référence qui avaient des mesures fiables avant.

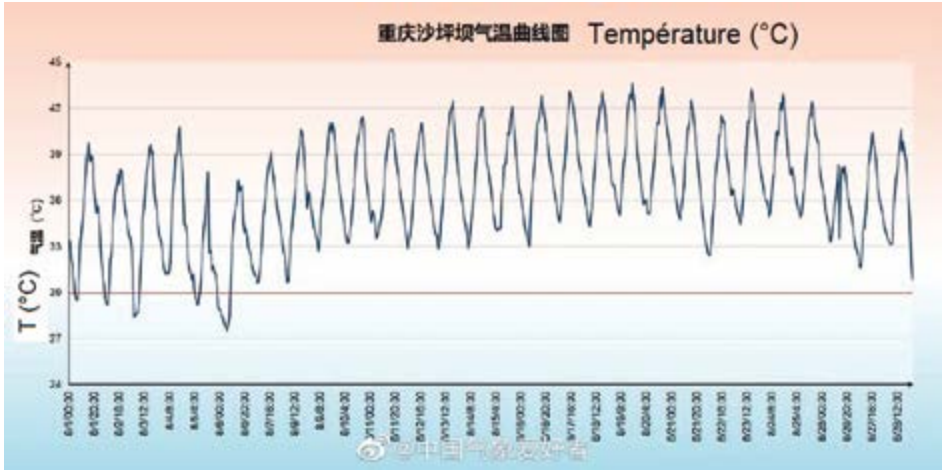


Figure C 7 : Températures à Chongqing du 1^{er} au 28 août 2022 ; On y voit la période de plus de 22 jours continuellement au-dessus de 30 °C, même la nuit, ou encore la journée exceptionnelle du 19 août avec une minimale de 34,9 °C et une maximale de 43,7 °C.

Source : Compte weibo d'un météorologue chinois, weatherman_xinxin.

En août 2022 de nombreux records de températures ont été battu en Chine. Ainsi, le 21 août, la température à Jianyang (Sichuan) a atteint 43,4 °C. L'ancien record absolu dans cette station, qui était de 40,3 °C (12/08/2006), a été dépassé plus de 10 fois pendant l'été 2022.

Or, il avait déjà fait très chaud les mois précédents, avec par exemple, jusqu'à 44,2 °C les 25 et 26 juin dans la province du Hebei, ou 40,9 °C le 13 juillet à Shanghai-Xujiahui (station climatique de référence de Shanghai, où le début des mesures remonte à 1873), égalant le record absolu du 21 juillet 2017.

Source : <https://twitter.com/extremetemps/status/1560225323387699202>

Impact des vagues de chaleur sur les glaciers

Jérôme Duvernoy,

Observatoire national sur les effets
du réchauffement climatique (ONERC)

Introduction

Les glaciers sont essentiels pour permettre la vie sur Terre. En effet, les glaciers, stocks d'eau solide permanents à l'échelle humaine, agissent comme des réservoirs d'eau douce et fournissent de l'eau potable pour la consommation humaine. Sauf pour l'Antarctique qui représente à lui seul 70% de l'eau douce mondiale, l'eau libérée par la fonte des glaces permet, par exemple, en alimentant les fleuves et les rivières, d'irriguer les cultures et les champs. Outre les bénéfices directement appréciables par l'homme, les glaciers sont cruciaux pour le cycle hydrologique car ils ont un rôle central dans la régulation du changement climatique. Ils constituent donc des outils de choix pour l'étude du climat. Leurs modifications reflètent, de façon très visuelle, l'évolution des paramètres atmosphériques (températures, précipitations...). Ces modifications sont des signaux d'alerte.

Le graphique de la variation de la masse des glaciers à l'échelle mondiale (cf. figure C 8) montre le bilan annuel estimé pour un ensemble de glaciers de référence mondiaux ayant plus de 30 années d'observation continue pour la période 1949/50-2020/21. Les valeurs globales sont calculées en utilisant une seule valeur (moyenne) pour chacune des 19 régions montagneuses afin d'éviter un biais vers les régions bien observées. Au cours des années hydrologiques 2019/20 et 2020/21, les glaciers de référence observés ont subi une perte de glace de 0,98 m hauteur équivalente en eau (meter water equivalent m. w. e. ou mètre d'eau¹) et de 0,77 m d'eau, respectivement. Avec cela, huit des dix années de bilan de masse les plus négatives ont été enregistrées après 2010.

1. Une valeur de - 1 mètre d'eau (meter water equivalent ou m. w. e.) par an représente une perte de masse de 1 000 kg par mètre carré de couverture de glace ou une perte annuelle d'épaisseur de glace à l'échelle du glacier d'environ 1,1 m par an, la densité de la glace n'étant que de 0,9 fois celle de l'eau.

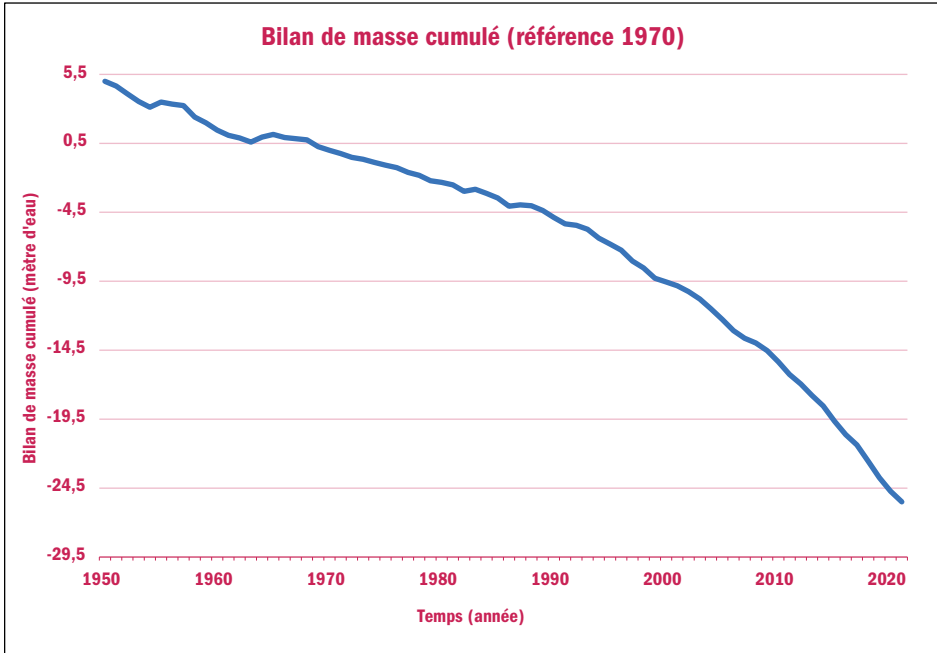


Figure C 8 : Bilan de masse cumulé des glaciers de référence. Les valeurs cumulées par rapport à 1970 sont indiquées sur l'axe des ordonnées en unité mètre d'eau équivalent (meter water equivalent). Depuis le milieu des années 1970, le changement de masse cumulé des glaciers de référence mondiaux, tel qu'il est présenté dans le graphique ci-dessus, est estimé à plus de 24 m w. e. Les glaciers observés étaient proches d'un état stable pendant les années 1960, suivi d'une perte de glace de plus en plus importante jusqu'à aujourd'hui. La forte augmentation des taux de perte de glace au cours de chaque décennie jusqu'à aujourd'hui (sur des surfaces de glacier en diminution) ne laisse aucun doute sur le changement climatique en cours et le forçage soutenu, même si une partie de la tendance à l'accélération observée est susceptible d'être causée par un processus de rétroaction positive (par exemple, l'abaissement de la surface, la désintégration des glaciers).

Source : Données : <https://wgms.ch/global-glacier-state/> ; traitement : ONERC.

Entre 1992 et 2017, les calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique ont perdu ensemble 6 400 gigatonnes (Gt) de glace, entraînant une élévation du niveau mondial de la mer de près de 2 centimètres (État européen du climat Rapport, 2019²). Le taux de perte de la calotte glaciaire du Groenland a augmenté de façon exponentielle au fil du temps, près de la moitié de la glace perdue entre 1992 et 2018 s'étant produite entre 2006 et 2012. Quant à la calotte glaciaire de l'Antarctique, elle perd maintenant de la glace plus rapidement que jamais. Avant 2012, l'Antarctique perdait de la glace à un rythme constant de 76 Gt par an. Cependant, il y a eu depuis une multiplication par trois, plus de la moitié de la perte totale de glace des 28 dernières années se produisant entre 2012 et 2017. De l'Himalaya à l'Arctique, la fonte des glaciers de la planète, provoquée par le réchauffement

2. <https://climate.copernicus.eu/ESOTC/2019>

climatique, s'est encore accélérée ces 20 dernières années. La fonte de ces glaces a contribué à la hausse du niveau de la mer, à hauteur de 21%, au rythme de 0,74 mm par an. Depuis 2000, ils ont perdu en moyenne 267 milliards de tonnes de glace chaque année. La fonte complète des glaciers ferait augmenter le niveau des océans de 40 cm. (Hugonnet *et al.*, 2021)

Au niveau européen, le constat est équivalent. Ainsi, depuis 1997, on estime que les glaciers surveillés en Europe ont perdu entre 9 et 26 mètres d'eau (m. w. e.) de masse, ce qui correspond à entre 10 et 29 mètres de perte d'épaisseur de glace (figure C 9).

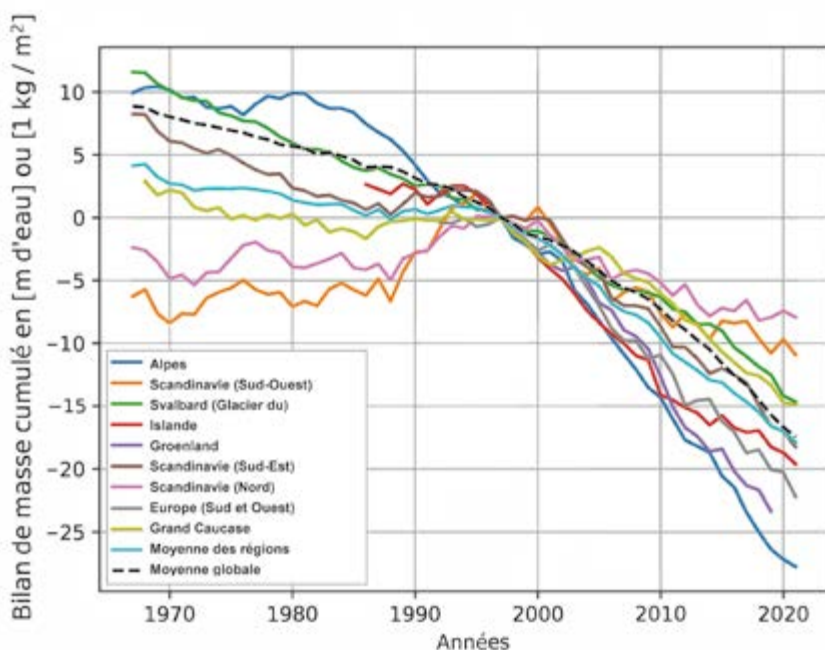


Figure C 9 : Changements de masse cumulés en Europe de 1967 à 2021 pour les glaciers avec des enregistrements à long terme dans neuf régions différentes. Les valeurs du bilan massique sont données dans l'unité « mètre d'eau (m. w. e.) » par rapport à 1997.

Sources : Données : WGMS (2021, mise à jour); traitement : C3S/WGMS.

Impact des vagues de chaleur sur les glaciers des Pyrénées

Une fonte record en 2022

Pierre René,
Association Moraine¹

Évolution des glaciers des Pyrénées depuis 1850

Tandis que l'existence de glaciers dans les Alpes est connue de tous, leur présence dans les Pyrénées est quelque peu confidentielle. En effet, leur surface globale est mille fois plus réduite ! Avec aujourd'hui une vingtaine de glaciers pour environ 2 km² (200 ha) d'englacement, les glaciers pyrénéens sont particulièrement modestes et vulnérables.

Depuis 1850 (fin du Petit Âge glaciaire), les trois quarts des glaces pyrénéennes et 90% de leur surface ont disparu (- 50% dans les Alpes). Présents depuis des milliers d'années, nous assistons aujourd'hui à leur extinction (figure C 10).

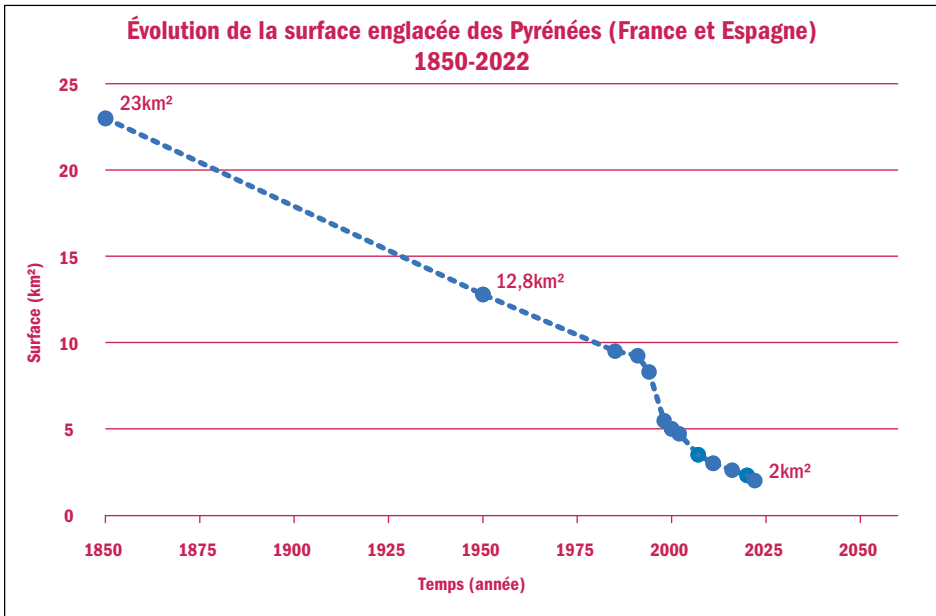


Figure C 10 : Évolution de la surface englacée des Pyrénées (France + Espagne).

Source : Association Moraine.

1. Association Moraine 31 110 Luchon, <http://asso.moraine.free.fr>

Face à la rapidité du réchauffement climatique, les conditions d'existence de glaciers ne sont plus réunies. La fonte record de l'année 2022 est une illustration de cette tendance lourde.

Zoom sur le glacier d'Ossoue (Vignemale, Pyrénées françaises) depuis 2000

Avec 25 ha, le glacier d'Ossoue (figure C 11 et figure C 12) est le plus grand et le plus documenté des Pyrénées françaises. Il reflète le mieux le climat car contrairement à ses voisins, il ne bénéficie pas d'un environnement topographique biaisant son comportement (cirque rocheux important entraînant une suraccumulation neigeuse par les avalanches en hiver et une protection solaire en été). Il ne doit son existence qu'à sa haute altitude (3070 m en moyenne).

Depuis 2000, les différents paramètres mesurés de ce glacier révèlent la perte de :

- 250 m de longueur (soit 12 m/an) auxquels on peut ajouter 400 m si l'on ne considère plus le lambeau de glace inférieur détaché en 2022 ;
- 31 ha de surface (soit 1,5 ha/an), soit plus de 50% en 22 ans, associée à un morcellement ;
- 40 m d'épaisseur (soit 1,8 m/an) et 4,5 m en 2022 !

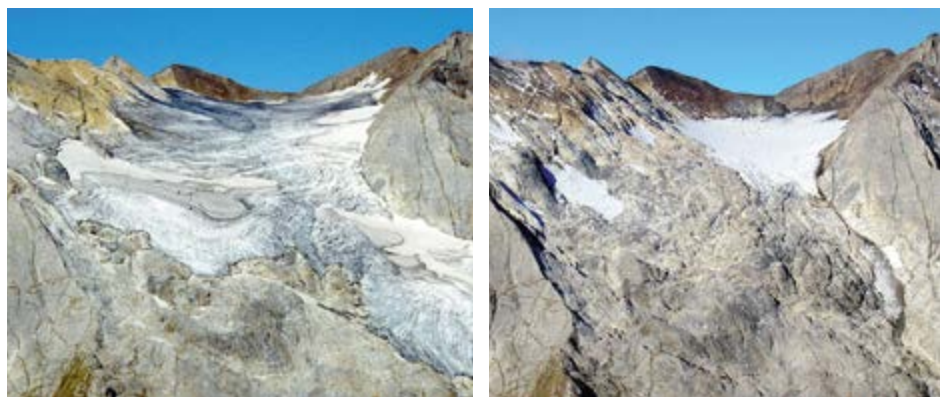


Figure C 11 : Glacier d'Ossoue (Vignemale, Pyrénées) en 2000 (à gauche) et 2022 (à droite).

Source : Association Moraine.

Fonte des glaciers en 2022

En 2022, les glaciers pyrénéens ont subi une régression record comme en témoignent les paramètres mesurés (longueur, surface, volume). Au-delà des chiffres, plusieurs glaciers se sont morcelés et d'autres sont devenus trop réduits pour être comptabilisés à l'avenir. L'année glaciaire 2022 est la plus déficitaire depuis au moins 2002 (date du début des mesures systématiques), mais très certainement depuis bien plus longtemps.

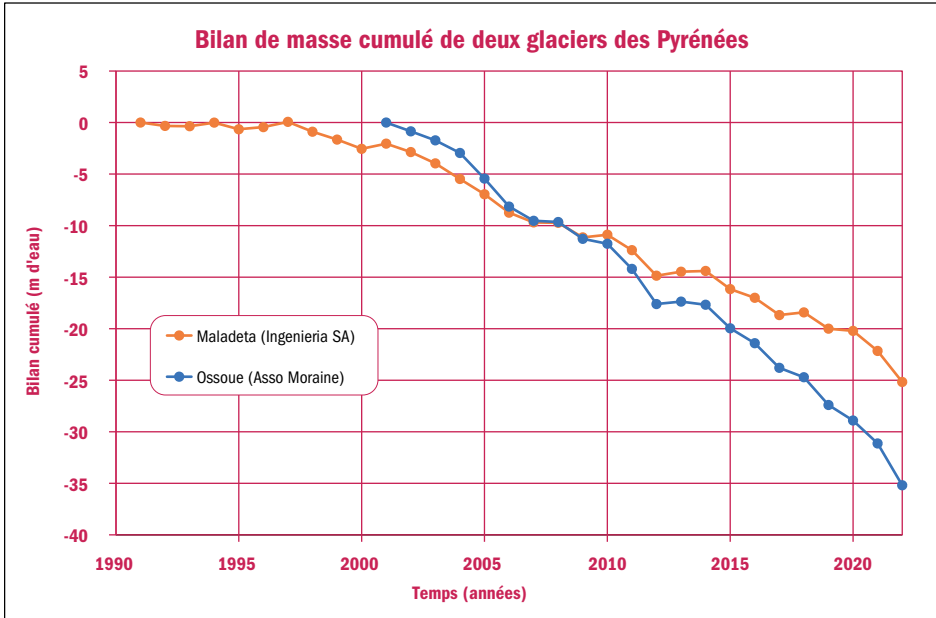


Figure C 12 : Bilan de masse cumulé de deux glaciers pyrénéens.

Source : Association Moraine et Spesa Ingenieria SA.

Avec $-4,5$ m d'épaisseur, le glacier d'Ossoue perd 2,5 fois plus que sa moyenne ($-1,8$ m). Le glacier de la Maladeta (Pyrénées espagnoles) enregistre également un record de fonte avec $-3,3$ m d'épaisseur contre $-0,9$ m en moyenne (figure C 12).

Cette fonte record 2022 est la conséquence de conditions météorologiques défavorables aux glaciers :

- une accumulation neigeuse hivernale médiocre (inférieure à la moyenne) ;
- des apports significatifs de sables sahariens accélérant la fonte par diminution de l'albédo ;
- des vagues de chaleurs précoces et répétées au cours de l'été.

Impacts des vagues de chaleur sur la biodiversité

Jérôme Duvernoy,

Observatoire national sur les effets
du réchauffement climatique (ONERC)

Introduction

Le volume 2 du sixième rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2022) nous rappelle que le réchauffement à court terme et l'augmentation de la fréquence, de la gravité et de la durée des vagues de chaleur impactent de nombreux écosystèmes terrestres, d'eau douce, côtiers et marins et risquent d'occasionner des pertes élevées ou très élevées de biodiversité.

Selon la région et les écosystèmes, les risques à court terme (2021-2040) de perte de biodiversité sont de modérés à élevés notamment dans les écosystèmes forestiers. De plus, l'élévation continue et accélérée du niveau de la mer empiètera sur les habitats côtiers et exposera les écosystèmes littoraux et de faible altitude à la submersion et à la perte.

Sur le plus long terme (2041-2100), la perte et la dégradation de la biodiversité, qui sont déjà observées pour toutes les régions en raison du réchauffement climatique passé, continueront à s'aggraver dans des proportions qui dépendent du niveau de réchauffement atteint.

Tableau C 1 : Dans les écosystèmes terrestres, pourcentage des espèces évaluées qui seront probablement confrontées à un risque très élevé d'extinction selon le niveau de réchauffement.

Pourcentage des espèces confrontées à une extinction	Valeur du réchauffement global
3 à 14%	1,5 °C
3 à 18%	2 °C
3 à 29%	3 °C
3 à 39%	4 °C
3 à 48%	5 °C

Le tableau C 1 nous montre que plus le réchauffement mondial augmente, plus la part d'espèces menacées d'extinction augmente. Cette augmentation n'étant pas linéaire, il est d'autant plus important de limiter le réchauffement climatique.

En France métropolitaine, les vagues de chaleur, et même les canicules, se succèdent de plus en plus vite d'années en années. En effet, alors qu'elles étaient occasionnelles une fois tous les 5 à 10 ans, elles se rencontrent maintenant tous les étés depuis 2015 (à l'exception de 2021). La France a connu 45 vagues de

chaleur en France métropolitaine depuis 1947 selon un rythme qui ne fait que s'accélérer. Sur les 35 dernières années, les vagues de chaleur ont ainsi été trois fois plus nombreuses que sur les 35 années précédentes. Et le nombre de jours de vagues de chaleur a été multiplié par 9. Certains étés comme 2017 ou 2022 ont même connu au moins 3 événements de canicule.

Cependant, comme ces événements météorologiques extrêmes sont souvent associés à des périodes de sécheresse prolongées, il est souvent difficile d'isoler les effets à court terme des canicules, des effets à long terme de la sécheresse sur la biodiversité. Les conséquences biologiques d'épisodes climatiques extrêmes (mortalités, réductions de populations, perte de biodiversité, etc.) sont rarement immédiates et détectables, ne se révélant parfois qu'après plusieurs années d'affaiblissement des milieux impactés.

De plus, la faune et la flore sauvages sont sous la pression de changements globaux. La plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES, *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*) classe ainsi les causes d'érosion de la biodiversité en cinq facteurs majeurs : les changements d'usage des sols et des mers, l'exploitation directe des ressources, les changements climatiques, les pollutions, et les espèces exotiques envahissantes. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de canicule n'est donc qu'un facteur aggravant parmi beaucoup d'autres.

Impacts sur la faune

Pendant une période de canicule, les animaux souffrent comme les humains, et peinent à trouver des lieux pour s'hydrater ou se rafraîchir. Quand les températures restent élevées pendant plusieurs jours consécutifs, y compris la nuit, le risque de mortalité augmente fortement. Toutes les espèces sont concernées, même celles qui vivent dans l'eau.

● Les coups de chaleur

Les périodes de canicule précoces correspondent à la période cruciale de nidification des oiseaux, qui sont, selon la Ligue de protection des oiseaux, fortement touchés par les fortes chaleurs. Les jeunes, sujets à suffocation à cause de la chaleur sous les toits (figure C 13), se rapprochent du bord du nid afin de chercher de l'air et peuvent tomber au sol. Ainsi, la LPO assure avoir accueilli de nombreux volatiles en période de canicule, notamment des individus encore au nid. Dans leurs centres de soins¹, les espèces qui rentrent énormément sont les martinets ou les hirondelles car ils nichent sous les toitures, dans des petites cavités. S'il fait plus de 40 °C à l'extérieur, la température peut dépasser les 50 °C dans le nid. Donc les jeunes ont tendance à s'avancer vers le bord pour aller chercher

1. <https://www.lpo.fr/la-lpo-en-actions/agir-pour-la-faune-en-detresse>

un peu d'air frais à l'extérieur, et tombent. Les chauves-souris comme les pipistrelles peuvent fuir les toitures devenues brûlantes, en plein jour. Chez les hirondelles, les adultes peuvent abandonner le nid et les jeunes, si les conditions météorologiques deviennent extrêmes.

Plus généralement, la précocité des épisodes caniculaires, comme ceux du 15 au 19 juin 2022 est particulièrement dangereuse pour les animaux sauvages qui sont à cette époque de l'année encore en pleine période de reproduction et de nourrissage des jeunes.



Figure C 13 : Jeune hirondelle rustique (*Hirundo rustica*) au bord du nid.

Source : © Thierry Degen/Terra.

● *La déshydratation*

Le manque d'eau en période de canicule est un problème qui touche toutes les espèces animales sans distinction. Avec l'assèchement des points d'eau, la faune peut parcourir de nombreux kilomètres à la recherche d'une flaque ou d'une mare et ainsi mourir de fatigue (LPO, 2022).

La baisse rapide des niveaux due aux températures extrêmes s'ajoute au manque d'eau chronique dû à la sécheresse. Cela peut rendre certains obstacles infranchissables, supprimer des connexions entre plusieurs parties d'un cours d'eau ou restreindre l'accès aux milieux annexes. Cette fragmentation des milieux peut empêcher la mobilité des espèces comme les poissons ou les amphibiens. L'assèchement complet d'une partie du linéaire de la rivière, provoque directement la mort de toutes les espèces peu mobiles et incapables de survivre au manque d'eau.

Les plus vulnérables sont principalement les espèces d'insectes ou de batraciens inféodés aux petites mares temporaires ou situées dans la tourbe qui sont à sec depuis un bon moment. Souvent associé aux épisodes caniculaires, le déficit de précipitations empêche les nappes de se recharger correctement et certains cours d'eau douce français sont ainsi à des niveaux exceptionnellement bas, voire totalement à sec, poussant les animaux à s'aventurer ailleurs pour s'abreuver.

Par ailleurs, le manque d'eau a des conséquences sur la végétation et peut impacter les herbivores, comme le chevreuil, qui se nourrissent principalement de bourgeons. Avec une production de bourgeons qui est plus faible à cause de la sécheresse et des vagues de chaleur précoces, la disponibilité alimentaire se retrouve réduite notamment pour les cervidés.

- *Destruction des habitats*

Les fortes, et même très fortes températures, provoquent un dessèchement des plantes, des herbes et de toute autre nourriture végétale, bouleversant ainsi les écosystèmes qui en dépendent. À cette hausse des températures s'associent également les nombreux incendies, qui peuvent détruire des écosystèmes entiers dans certaines régions.

Les oiseaux sont, eux aussi, particulièrement exposés aux conditions météorologiques. Certaines espèces des champs ne font pas de deuxième couvée si les conditions ne sont pas favorables. C'est par exemple le cas de l'alouette des champs, dont les effectifs sont en constante diminution (- 25% en 18 ans) en raison des pratiques intensives agricoles (source : alouette des champs, Vigienature). Un épisode de fortes chaleurs est une variable qui s'ajoute aux autres facteurs de disparition de l'espèce, une mauvaise météo réduisant la productivité des couvées.

En cas de canicule, les routes deviennent de véritables menaces mortelles pour la faune. En effet, le bitume peut monter à des températures telles qu'il provoque des brûlures graves chez les animaux obligés de traverser : hérisson d'Europe, amphibiens, reptiles... Les mammifères, pour ceux qui sont nocturnes, se protègent cependant de la chaleur dans leurs terriers durant la journée.

Au contraire, certains insectes semblent proliférer, y compris dans des régions nouvelles pour eux : arrivée du moustique-tigre (figure C 15) dans le Loiret et en Meurthe-et-Moselle, frelons asiatiques dans la Manche et le Finistère, à la recherche de températures un peu plus tempérées. Ce phénomène, lié principalement à l'augmentation des températures moyennes, s'amplifie avec l'augmentation du nombre de vagues de chaleur.

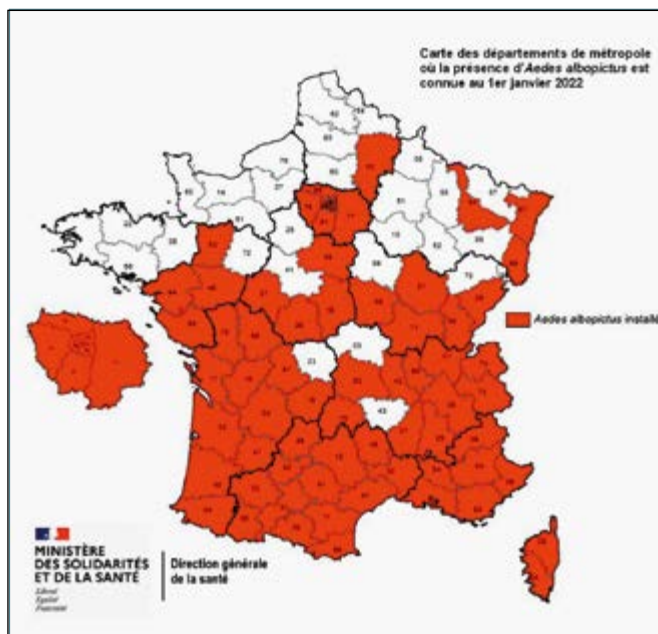


Figure C 14 : Départements de métropole où la présence de moustique tigre (*Aedes albopictus*) est connue au 1^{er} janvier 2022.

Source : Santé publique France².

Faune aquatique

Le graphique reprend sur les quelques dernières années les assecs (figure C 15) pendant les mois de juin à septembre. En effet, les dernières années ont connu des sécheresses et des vagues de chaleur à répétition (2017, 2019 et 2022).

Associées à une forte diminution des niveaux d'eau à cause d'un manque de précipitation, les vagues de chaleur à répétition provoquent une augmentation anormale de la température de l'eau qui, elle-même, entraîne la mortalité des poissons d'eau douce et des mollusques. L'oxygène (O_2) dissous dans l'eau diminue, le milieu devient eutrophe³ : il est plus riche en éléments organiques, les algues pullulent et les bactéries anaérobiques⁴ prolifèrent, provoquant l'appauvrissement, puis la mort de l'écosystème aquatique qui ne bénéficie plus de suffisamment d'oxygène.

2. <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/risques-microbiologiques-physiques-et-chimiques/especes-nuisibles-et-parasites/article/cartes-de-presence-du-moustique-tigre-aedes-albopictus-en-france-metropolitaine>

3. Eutrophe : milieu riche en éléments organiques, pauvre en oxygène. Ex. : eaux dormantes.

4. Anaérobie : organisme qui se développe en l'absence d'oxygène (O_2). Ex. : bactéries.

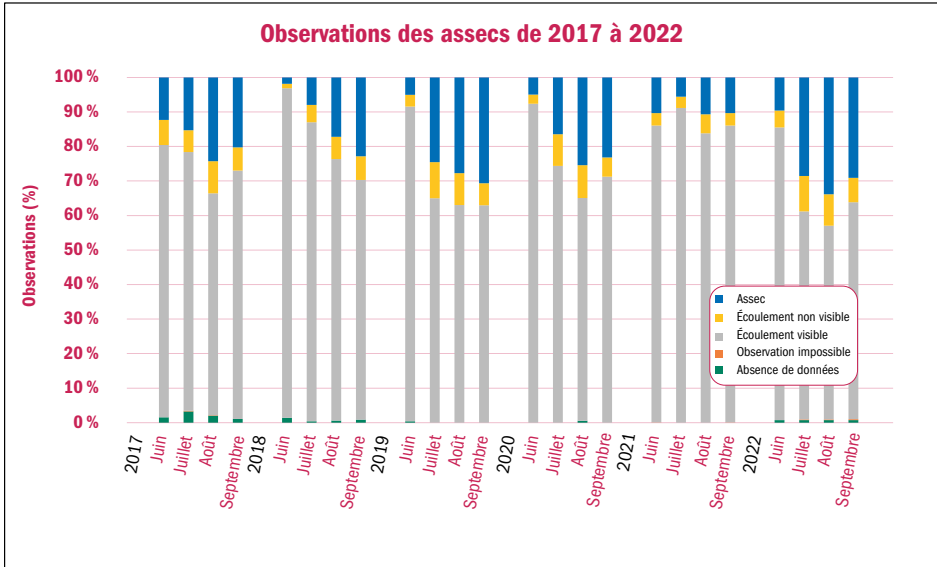


Figure C 15 : Pourcentage des observations pour les stations de métropole pour 2017 à 2022. Les stations observées en assec sont en bleu. On notera une forte proportion de stations en assec lors des mois de juillet et août 2022.

Source : Données : réseau ONDE; traitement : ONERC.

Pour ne citer qu'un exemple, dans la zone Natura 2000 du marais Breton, des centaines de truites sont mortes fin juillet 2022 à cause de la température trop élevée de leur habitat. Une conséquence directe de la vague de chaleur de cette période (chapitre D, La vigilance « canicule » de Météo-France).

Pour éviter la mort des poissons certaines solutions existent. Par exemple le Service public de l'assainissement francilien (SIAAP⁵) surveille le taux d'oxygène dissous dans la Seine et, si besoin, diffuse de l'oxygène dans des « îlots de survie » où les poissons peuvent respirer.

La diminution des populations autochtones, associée à une hausse des températures, sont autant d'opportunité pour les espèces invasives, comme la jussie ou certaines écrevisses américaines, qui trouvent ainsi des conditions favorables pour se développer.

La flore

La flore est sensible aux épisodes de sécheresse prolongée et de canicule. Ces phénomènes, aujourd'hui plus fréquents, entraînent chez les plantes et les arbres

5. <https://www.siaap.fr/>

un stress hydrique⁶ qui se traduit de différentes façons. Les arbres perdent leurs feuilles, comme en automne, pour limiter la consommation d'eau. En effet, c'est par les feuilles qu'intervient le phénomène d'évapotranspiration lié à la photosynthèse. Lorsqu'il fait trop chaud et sec, l'arbre doit réduire sa consommation en eau. Les feuilles jaunissent et tombent, il s'agit d'une adaptation de l'arbre. Mais si les canicules se répètent trop souvent ou sont trop rapprochées, certains arbres risquent de s'épuiser et de ne pas survivre.

Les épisodes de canicule qui interviennent au printemps agissent également sur le cycle de floraison. Les plantes fleurissent et fanent plus tôt. Il peut y avoir un décalage entre le cycle de la plante et celui des insectes qui, pour certains, sont étroitement liés pour la pollinisation et/ou la reproduction (espèces symbiotiques⁷).

Feux de forêts

Les forêts sont non seulement des socioécosystèmes essentiels pour les sociétés humaines mais aussi pour la biodiversité. En effet, elles abriteraient près de 80% de la biodiversité terrestre mondiale. Cet été 2022 et un peu partout en France, le risque d'incendie était à son plus haut niveau. Les fortes températures fragilisent les forêts qui souffrent déjà des sécheresses répétées.

90% des départs de feux de forêt ont pour origine les activités humaines, selon différentes causes :

- accidentelles : lignes électriques, chemin de fer, véhicules, dépôt d'ordures ;
- intentionnelles : malveillance ;
- involontaires dues aux travaux : travaux forestiers, travaux agricoles, travaux industriels et publics ;
- involontaires dues aux particuliers : travaux, loisirs, jets d'objets incandescents.

Et un départ de feux dans une forêt desséchée pourra avoir des conséquences dramatiques jusqu'aux méga-feux.

La figure C 16 ci-après, établie à partir de la base de données EFFIS, représente les surfaces de forêts brûlées de juin à novembre 2022 en France métropolitaine. Au total, plus de 66 000 hectares de forêts ont brûlé cet été, soit six fois plus que la moyenne des 15 dernières années. Presque 300 feux ont été recensés.

Même si une étude plus approfondie pourrait être nécessaire, le graphique montre clairement une certaine corrélation entre les surfaces brûlées et les différentes canicules. En effet, les températures importantes de l'air et du sol sont des facteurs qui viennent aggraver des conditions déjà très propices aux feux de forêts.

6. Stress hydrique (ou stress osmotique ou stress abiotique ou pénurie d'eau) : état d'une espèce végétale qui, placée dans un environnement, l'amène à libérer davantage d'eau que la quantité qu'elle absorbe.

7. Symbiotique : association étroite, durable et obligatoire entre deux espèces à leur bénéfice mutuel.

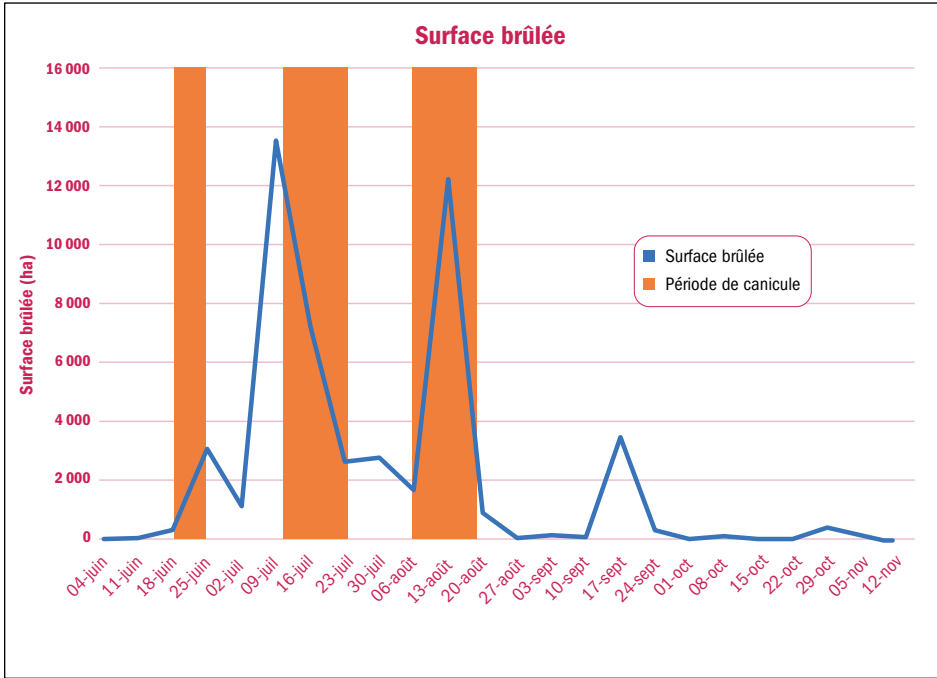


Figure C 16 : Surface de forêt brûlée en France métropolitaine en 2022. Les rectangles orange représentent les 3 canicules.

Source : Données EFFIS; traitement : ONERC.

Alors que le rapport interministériel de 2010 (MEDDEM, 2010) prévoyait l'extension des zones propices aux feux de forêts dans un futur de 2030-2050, la réalité a malheureusement rattrapé les prévisions. En effet, pendant l'été 2022 en Bretagne, le feu a ravagé presque 3 000 hectares (figure C 17). Des records de température dans 36 des 44 stations météo en Bretagne (40 °C dans le Finistère Nord, 41,6 °C enregistré en Ille-et-Vilaine) associés à une saison très sèche ont été propices aux feux de forêts qui n'avaient jamais été observés avec une telle ampleur en Bretagne.

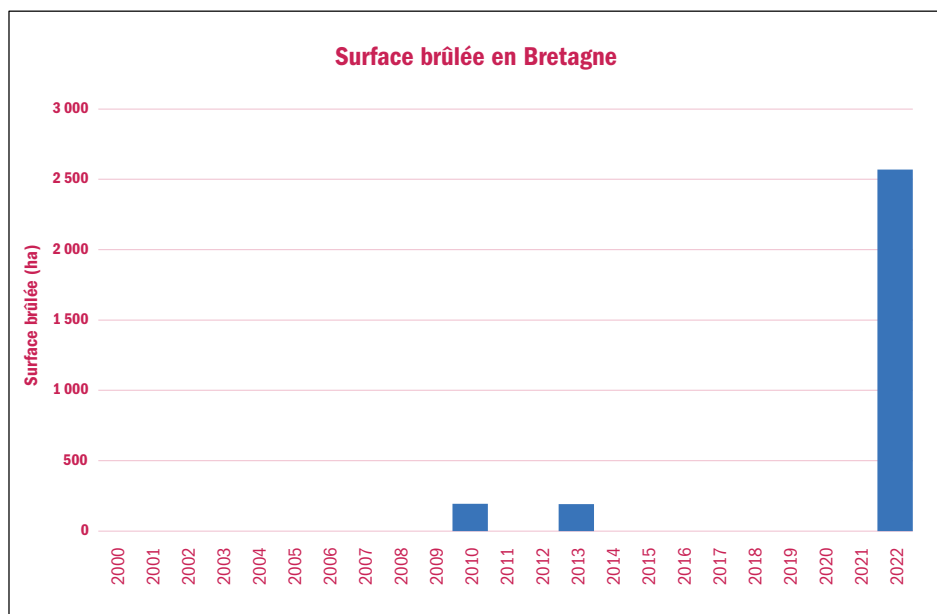


Figure C 17 : Surface brûlée en Bretagne depuis 2000.

Sources : Données : EFFIS⁸; traitement : ONERC.

Les bilans actuels en termes de surfaces brûlées et de dégâts, pourtant déjà très importants, vont s'aggraver avec les effets du changement global en France. Ces effets vont tous dans le sens d'une aggravation du risque :

- changement climatique conduisant à une multiplication des conditions météorologiques propices au feu (combinaison de températures élevées, d'une humidité de l'air faible) et à une extension des zones menacées ;
- urbanisation croissante des interfaces homme-nature ;
- modification/abandon de pratiques agricoles conduisant à la fermeture du milieu donnant une continuité des massifs arborés et boisés.

Sans parler de méga-feux, des événements exceptionnels/extrêmes, c'est-à-dire hors de nos références habituelles en termes d'intensité, de vitesse de propagation, ou d'importance et de longueurs des sautes de feu, sont donc appelés à se multiplier dans les années qui viennent.

Pour faire face à la nouvelle ampleur prise par les feux de forêt cette année, le Gouvernement a annoncé une nouvelle stratégie de lutte contre les incendies. Cette stratégie est articulée autour de trois grands axes.

Le premier axe repose sur la prévention. Pour faire face aux incendies, dont 9 sur 10 sont d'origine humaine, des campagnes de sensibilisation seront lancées

8. <https://effis.jrc.ec.europa.eu/applications/data-and-services>

et les obligations légales de débroussaillage (OLD) seront renforcées. Ainsi, la puissance publique pourrait se substituer rapidement aux propriétaires défaillants.

Un inventaire des modèles de forêts et de leur entretien devrait également être réalisé. Plusieurs outils devraient également être mis en place, tels qu'une carte nationale recensant les zones particulièrement vulnérables, une météo des forêts et une météo des feux de forêt pour informer sur les risques et les départs de feu, à l'image de ce qui se fait déjà dans le bassin méditerranéen.

Le deuxième axe est celui de la lutte. Les moyens de lutte seront modernisés et accrus d'ici 2027. Le nombre de Canadair en France sera augmenté à 16 dans les cinq prochaines années, contre 12 aujourd'hui, au sein d'un plan global de « réarmement aérien d'urgence » contre les feux de forêt de 250 millions d'euros. Deux hélicoptères lourds devraient aussi venir renforcer la flotte prochainement.

Troisième volet de la stratégie annoncée par le Président de la République, le reboisement et la gestion durable des forêts. Le Gouvernement a ainsi promis « la plantation d'un milliard d'arbres » sur le territoire français d'ici à la fin de la décennie. C'est-à-dire le renouvellement de 10% des forêts françaises avec des espèces plus résilientes. L'objectif est de compenser les pertes dues aux incendies mais aussi de fixer le carbone et préserver la biodiversité. Pour arriver à cet objectif, des financements publics seront dédiés mais le Gouvernement souhaite également un travail collectif avec les élus, les agents de l'Office national des forêts, de l'Observatoire du littoral mais également la participation de jeunes dans un chantier, écologique, environnemental et d'aménagement des territoires.

Conclusion

Il ressort des projections de Météo-France que les épisodes de vagues de chaleur, tels que ceux de ces dernières années (2019, 2022) vont se multiplier dans les années futures.

Les vagues de chaleur sont souvent couplées avec des épisodes plus longs de sécheresse. Les impacts d'une forte baisse des précipitations conjugués à de la hausse de l'évapotranspiration correspondent à une baisse importante de l'humidité des sols, des niveaux d'étiage et des débits des cours d'eau. Il est très difficile de connaître leurs effets à long terme sur la faune, la flore et les milieux, mais il est vraisemblable que leurs conséquences ne pourront être qu'importantes.

Avec l'augmentation des températures moyennes, mais aussi des températures extrêmes, les impacts ne vont aller qu'en s'aggravant dans les années futures et vont concerner une part du territoire de plus en plus étendue et jusque-là préservée.

Impacts des vagues de chaleur sur la biodiversité marine

Núria Teixidó,

Sorbonne Université, CNRS,
laboratoire d'océanographie de Villefranche
Stazione zoologica Anton Dohrn, Italie

Chloé Carbone,

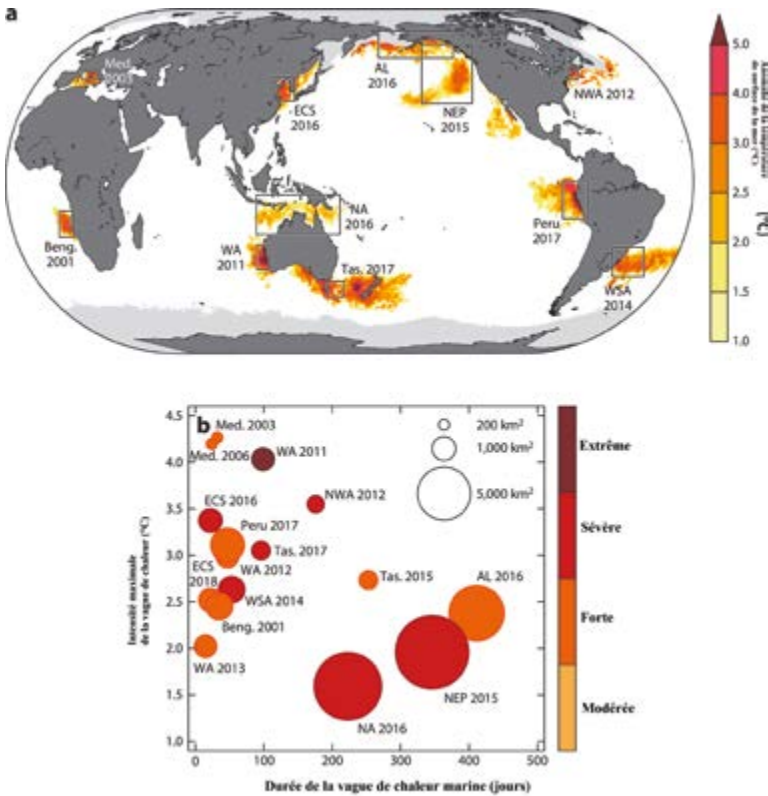
Sorbonne Université, CNRS,
laboratoire d'océanographie de Villefranche

Introduction

Outre le réchauffement progressif et à long terme de l'océan, une augmentation significative de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes tels que les vagues de chaleur marines (MHW) est constatée (Smale *et al.*, 2019 ; Oliver *et al.*, 2021). Ces périodes d'eau chaude exceptionnelles, définies comme étant des températures de l'eau de mer dépassant un seuil, généralement fixé au 90^e centile de la moyenne climatologique, pendant au moins cinq jours consécutifs (Hobday *et al.*, 2016). Au cours des vingt dernières années, les MHW ont globalement doublé en fréquence et sont devenues plus durables, plus intenses et plus étendues et ont eu des impacts significatifs sur la biodiversité marine (Olivier *et al.*, 2021). Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) prévoit des vagues de chaleur marines plus fréquentes, plus intenses et plus longues d'ici le milieu du 21^e siècle dans tous les scénarios futurs d'émissions de CO₂. Les impacts écologiques se traduisent généralement par des efflorescences algales nuisibles, des déplacements d'espèces, des événements de mortalité massive (MME) d'espèces marines et le blanchiment massif des coraux qui dure de quelques semaines à plusieurs années. Il en résulte une perte de biodiversité marine altérant le fonctionnement des écosystèmes marins avec des impacts importants sur l'approvisionnement en biens et services liés à la pêche et aux moyens de subsistance, à la protection des côtes, au cycle des nutriments, à la séquestration du carbone et aux opportunités culturelles et récréatives. Même si la méthode est perfectible, ces pertes se chiffrent en milliards de dollars pour l'humanité (Hughes *et al.*, 2017, Smith *et al.*, 2021).

Le réchauffement affecte la physiologie et la phénologie des organismes marins, ainsi que leur potentiel de dispersion, induisant des changements d'aire de répartition par l'expansion ou la contraction de la distribution des espèces. Les organismes vivants fonctionnent entre certaines limites de température déterminées par la gamme de conditions thermiques qu'ils ont connues au cours de leur évolution (autrement dit, la niche thermique de l'espèce). Au-delà de ces limites, leur performance diminue et, sans mesures d'atténuation, cela peut mener à la mort. Des impacts de MHW à l'échelle de l'écosystème ont été constatés dans un certain nombre de régions où des espèces marines fondatrices qui soutiennent

une large gamme de biodiversité associée ont été affectées, notamment avec la perte de forêts de laminaires dans le nord-est et le sud-ouest du Pacifique et le sud-est de l’océan Indien (Arafeh-Dalmau *et al.*, 2019), le blanchiment massif des coraux dans l’Indo-Pacifique et le sud-ouest de l’océan Indien (Hughes *et al.*, 2018), les prairies sous-marines (Arias-Ortiz *et al.*, 2018), et la mortalité généralisée des macrophytes (macro-algues et herbiers marins) et des invertébrés en mer Méditerranée (Garrabou *et al.*, 2022). Dans cet article, nous nous concentrons sur les impacts des MHW sur les coraux tropicaux et sur les espèces marines de la mer Méditerranée. Ces deux écosystèmes marins ont en commun la présence d’espèces marines fondatrices, qui sont essentielles à la structuration d’un écosystème et qui modulent les flux de nutriments et d’énergie dans l’écosystème qu’elles définissent. Les espèces fondatrices sont essentielles au maintien de la biodiversité, et leur disparition aura des répercussions sur les autres espèces.



Olivier ECL *et al.* 2021
 Atmos Res Mar Sci 13:113-42

Figure C 18 : Principaux événements liés aux vagues de chaleur marines au cours des deux dernières décennies. La figure du haut montre les anomalies de température de surface de l’océan qui se sont produites autour du globe, causées par le forçage atmosphérique et/ou les processus océaniques. La figure du bas montre les propriétés des principales vagues de chaleur marines historiques avec leur intensité (axe des y), leur durée (axe des x) et leur catégorie (modérée, forte, sévère, extrême).

Source : Olivier *et al.* (2021).

Stress thermique et blanchiment des coraux dans les récifs coralliens tropicaux

Les récifs coralliens sont l'un des écosystèmes marins les plus diversifiés, les plus productifs et les plus climato-sensibles sur la planète. Ils représentent moins de 1% de la surface des fonds océaniques, mais ils abritent plus de 25% de la vie marine. En outre, les récifs coralliens représentent des sources de revenus et de ressources essentielles grâce à leur rôle dans le tourisme, la pêche et la protection des côtes, et constituent une source primordiale de protéines de subsistance et de revenus pour de nombreuses petites communautés locales et nations qui sont en phase de développement rapide. Environ 400 millions de personnes dépendent des récifs pour leur sécurité alimentaire et pour leurs moyens de subsistance, notamment grâce au tourisme lié aux récifs coralliens. La biodiversité des récifs est menacée par le réchauffement, car les océans devraient se réchauffer de 1 à 5 °C en moyenne d'ici la fin du siècle, et par l'augmentation de la fréquence et de la gravité des vagues de chaleur marines (IPCC, 2019).

La limite physiologique de la plupart des coraux se situe entre ~ 18 et ~ 28 °C. Avec le réchauffement de l'océan, certaines régions pourraient dépasser cette limite physiologique supérieure (> 28 °C) et devenir moins propices aux coraux, tandis que d'autres régions pourraient augmenter leur température minimale et devenir plus propices au développement des coraux. Les récifs coralliens seront également affectés par l'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère, ce qui entraîne une baisse de la calcification due à l'acidification de l'océan, compromettant ainsi le maintien et la croissance de la structure récifale en carbonate de calcium.

La plupart des coraux des récifs tropicaux peu profonds réalisent une symbiose intracellulaire avec des algues dinoflagellées du genre *Symbiodinium*, qui vivent dans les tissus du corail (Davy et al., 2012). Le principe de cette symbiose est que le corail fournit aux algues unicellulaires un environnement protégé et les composés dont elles ont besoin pour la photosynthèse, tandis que les symbiotes produisent l'oxygène et les produits carbonés fixes de la photosynthèse (Weis, 2008; Davy et al., 2012). Environ 90% de la matière organique produite par photosynthèse par les symbiotes est transférée au tissu du corail hôte. Lorsque les coraux subissent un stress environnemental, les polypes expulsent leurs symbiotes et la colonie prend une apparence d'un blanc éclatant. Ce phénomène est communément appelé «blanchiment du corail». Si les polypes restent trop longtemps sans les symbiotes, le blanchiment du corail peut entraîner la mort du corail car les coraux blanchis ne peuvent pas satisfaire leurs besoins métaboliques, la plupart des besoins en carbone étant obtenus à partir des produits photosynthétiques transférés par les symbiotes.

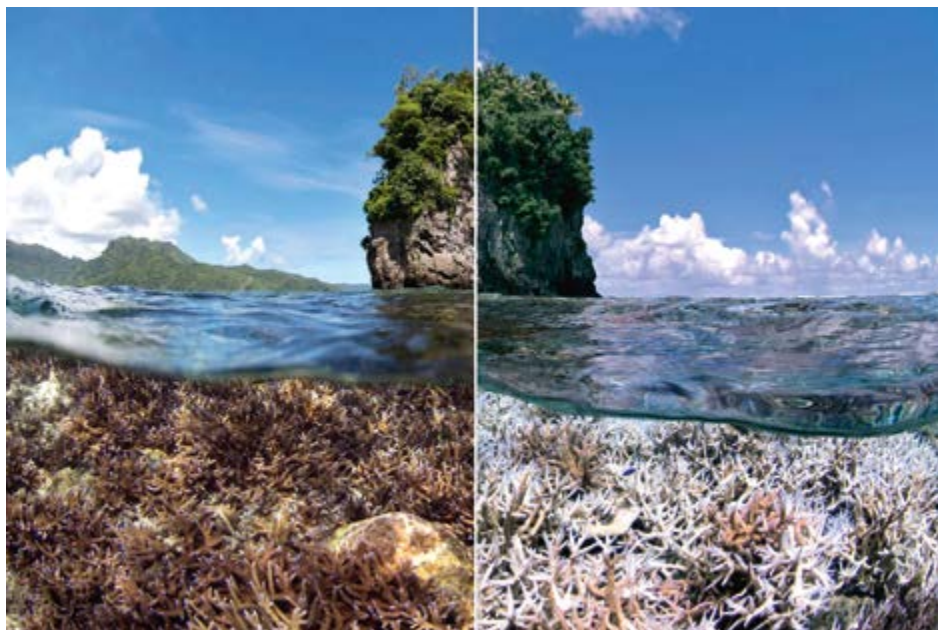


Figure C 19 : Ces photos illustrent la même communauté corallienne avant (décembre 2014) et après (février 2015) un blanchiment corallien lié à un stress thermique dans les Samoa américaines. Les symbiotes d'algues unicellulaires fournissent aux coraux leur pigmentation. À gauche, un récif corallien sain et à droite, le même récif corallien qui a perdu ses symbiotes et arbore une apparence blanchie. Si les coraux sont privés de leurs symbiotes pendant une longue période, ils meurent.

Source : © Catlin Seaview Survey.

Au cours des 30 dernières années, le réchauffement de la température de la surface de la mer et les vagues de chaleur marines ont déclenché un nombre croissant de blanchiments massifs de coraux, notamment quatre événements de blanchiments massifs pan tropicaux en 1997-1998, 2010, 2015-2017 et 2019-2020 (Heron *et al.*, 2016 ; Hughes *et al.*, 2018). Le déclin des coraux entraîne un changement radical dans la composition et le fonctionnement de l'écosystème des assemblages coralliens, y compris des centaines de récifs individuels, transformant de grandes zones d'assemblages matures et très diversifiés en un écosystème marin très altéré et dégradé. Il est important de noter que les récifs coralliens mettent généralement au moins dix ans à se rétablir après des épisodes de blanchiment massif. Les épisodes répétés de blanchiment réduisent la capacité de récupération des coraux, ce qui entraîne à son tour un déclin de la couverture corallienne et une perte de biodiversité.

Vagues de chaleur marines et mortalités massives récurrentes en mer Méditerranée

La région méditerranéenne a connu une évolution continue des activités humaines au cours de plusieurs millénaires. Elle abrite aujourd'hui plus de 500 millions de personnes avec une forte concentration d'établissements urbains et d'infrastructures industrielles à proximité du littoral. La région est la première destination touristique au monde et l'une des routes maritimes les plus fréquentées. La mer Méditerranée est une mer semi-fermée de latitude moyenne, entourée de montagnes et de littoraux fortement urbanisés qui affectent les facteurs atmosphériques, océaniques et hydrologiques. Le bassin, situé à la frontière entre deux régimes climatiques (le climat aride de l'Afrique du Nord et le climat tempéré et pluvieux de l'Europe centrale), est considéré comme un point particulier (*hot-spot*) du changement climatique : la Méditerranée se réchauffe actuellement à un rythme 20% plus rapide que le reste du globe (Lionello et Scarascia, 2018). La température de surface de la mer a déjà augmenté (selon les régions) de 0,29 °C à 0,44 °C par décennie (période entre 1982 et 2015), et un réchauffement de 0,8 °C à 3,8 °C est projeté pour la fin du siècle en raison de la variabilité régionale (Darmaraki *et al.*, 2019).

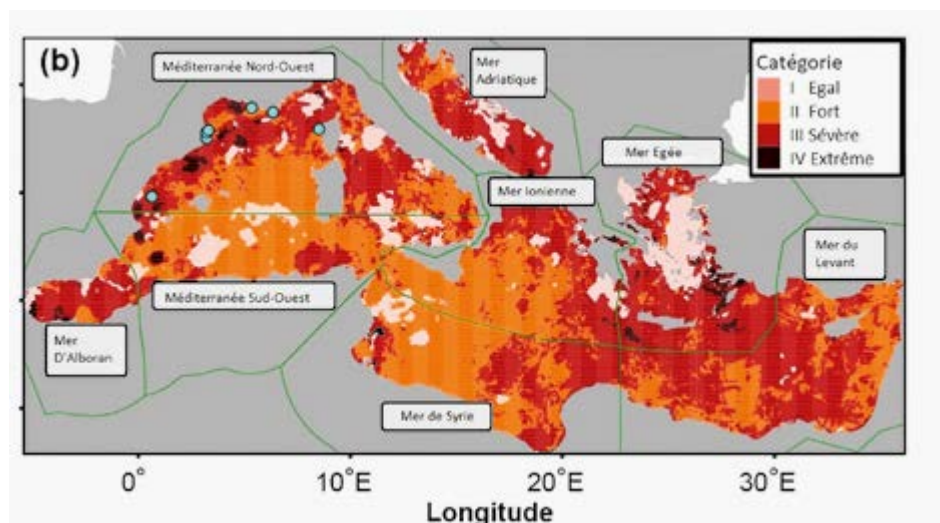


Figure C 20 : Tendances des vagues de chaleur marines (VCM) et des catégories à travers la mer Méditerranée pendant la période de 2015 à 2019. La mer Méditerranée connaît une augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur marines, ce qui entraîne une mortalité massive des organismes benthiques. La mer Égée et les mers du Levant sont les régions les plus impactées par les vagues de chaleur marines, tandis que le plateau tunisien est la région qui présente la plus faible augmentation.

Source : Garrabou *et al.* (2022).

Outre les schémas de réchauffement général et progressif, les périodes de températures extrêmes ont eu des conséquences négatives à grande échelle sur la biodiversité marine méditerranéenne. Des événements de mortalité massive sans précédent, qui ont affecté environ 25 espèces, se sont produits pendant les

étés 1999 et 2003 sur des centaines de kilomètres de côtes dans le nord-ouest de la Méditerranée (Cerrano *et al.*, 2000; Garrabou *et al.*, 2009; Perez *et al.*, 2000). Ces MHW étaient soit de courtes périodes (environ 5 jours en 2003) de températures élevées de la mer (27 °C), soit des périodes plus longues (30 à 40 jours) de températures relativement élevées (24 °C en 1999). Des impacts sur les organismes marins ont été rapportés en réponse à ces conditions extrêmes : mortalité des macro-algues et des invertébrés, mortalité des pousses et floraison anormale des herbiers marins (Garrabou *et al.*, 2009; Marbà et Duarte, 2010).

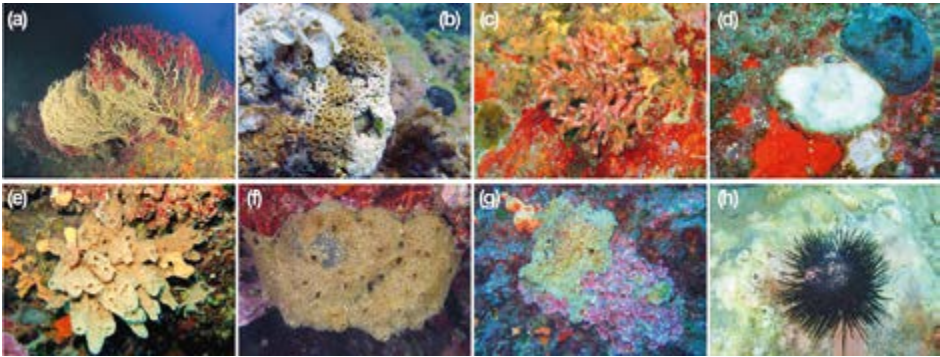


Figure C 21 : Impacts écologiques des événements de mortalité massive de 2015-2019. a) La colonie de gorgone rouge *Paramuricea clavata* présentant une mortalité partielle (zones brunes envahies par les épibiontes) contrastant avec les tissus vivants; b) une colonie du corail *Cladocora caespitosa* présentant des signes de mortalité partielle (squelette nu au niveau des zones blanches) contrastant avec les tissus vivants; c) une colonie du bryzoaire *Myriapora truncata* présentant une mortalité (parties blanches envahies par les épibiontes); d) un individu du mollusque *Spondylus gaederopus* atteint de mortalité (blanc); e) l'éponge massive *Agelas oroides* présentant une mortalité (réseau spongieux brun exempt de matériel cellulaire) contrastant avec le tissu orange vivant; f) un individu pratiquement mort de *Spongia officinalis* présentant un réseau spongieux brun exempt de matériel cellulaire; g) le rhodophyte *Mesophyllum sp.* partiellement mort; h) l'oursin *Arbacia lixula* présentant une mortalité avec la perte des épines.

Source : Garrabou *et al.* (2022).

Une étude publiée récemment a établi que les températures enregistrées en mer Méditerranée sur la période 2015-2019 étaient les plus élevées depuis le début des enregistrements en 1982 (Garrabou *et al.*, 2022). Sur la base de plus de 900 relevés de terrain effectués, les chercheurs ont constaté que 58% d'entre eux contenaient des preuves bien réelles que la mortalité massive de la vie marine était liée aux périodes de chaleur extrême. Les populations de 50 espèces (dont des macro-algues, des coraux et des éponges, entre autres) ont été affectées par ces événements sur des milliers de kilomètres de côtes méditerranéennes, de la mer d'Alboran aux côtes du bassin oriental, de la surface à 45 m de profondeur (Garrabou *et al.*, 2022). Certaines des espèces les plus touchées sont essentielles au maintien de la biodiversité et au fonctionnement des habitats côtiers. Parmi ces espèces figurent les herbiers de *Posidonia oceanica* et les assemblages de gorgones, deux des habitats les plus emblématiques et les plus diversifiés de la mer Méditerranée.

Vagues de chaleur marines pendant l'été 2022 en mer Méditerranée

La mer Méditerranée a connu une importante vague de chaleur marine avec des températures de surface de la mer dans les parties occidentales de la Méditerranée de 4-5 °C supérieures à la moyenne le long des côtes françaises et italiennes au cours de l'été 2022.

Les températures ont été supérieures à la moyenne pendant des périodes prolongées depuis le début du mois de mai. La température moyenne à la surface de la mer était supérieure de 1,3 °C à 2,6 °C à la moyenne à long terme (1982-2011), avec des températures maximales mesurées localement à 30,8 °C du 31 juillet au 13 août dans le nord-ouest de la mer Méditerranée (Guinaldo *et al.*, 2022). Des impacts sur la biodiversité marine ont déjà été observés dans différents sites de cette région. Ainsi, de graves mortalités de masse ont été observées sur les coraux, les éponges et les bryozoaires le long des côtes françaises, notamment dans le parc national des Calanques, le parc national de Port-Cros et le parc marin de la Côte Bleue (<http://www.calanques-parcnational.fr/fr/actualites/episode-de-mortalite-de-gorgones-en-mediterranee>). Les premiers signes de mortalité ont été observés entre le 18 et le 19 juillet 2022 entre 12 et 30 m de profondeur. La vague de chaleur marine vraisemblablement dévastatrice de cette année 2022 ne fera que renforcer la coordination scientifique et la coopération technique aux niveaux régional, national et international

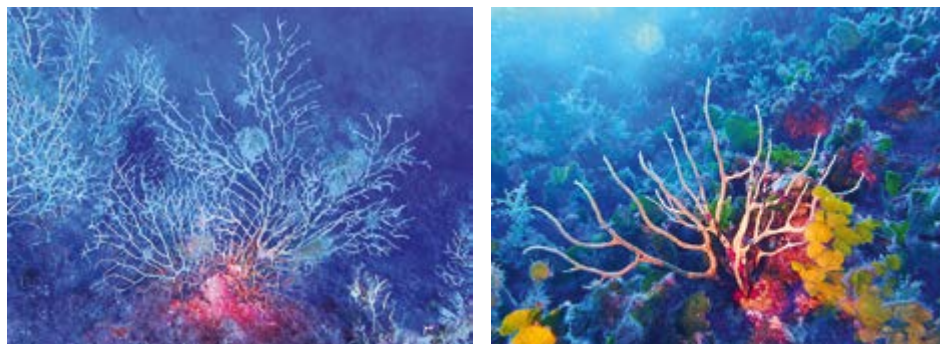


Figure C 22 : Impacts de la forte vague de chaleur marine sur la gorgone *Paramuricea clavata* de 15 m à 30 m de profondeur au Parc national des Calanques. Les colonies présentent une mortalité presque totale (squelette blanc) contrastant avec des tissus vivants de couleur rouge.

Source : © Patrick Bonhomme, Parc national des Calanques.

Il faut également espérer que les impacts observés contribueront à la prise de conscience collective et ainsi à l'élaboration de politiques d'atténuation et d'adaptation plus efficaces pour faire face à l'urgence climatique actuelle.

Impacts des vagues de chaleur sur l'agriculture française

Frédéric Levraut,

Chambre régionale d'agriculture de Nouvelle-Aquitaine

Introduction

Sous l'effet du changement climatique, l'agriculture française est confrontée ces dernières années à des températures particulièrement élevées, avec des durées de retour, des extensions géographiques et des intensités qui paraissent invisageables il y a quelques décennies à peine. Si ces hautes températures accélèrent l'apparition des sécheresses agricoles, elles ont par ailleurs un effet purement thermique – objet de ce rapport – pouvant être sévère sur les cultures et les animaux d'élevage. L'ampleur des impacts thermiques déjà constatés ces dernières années sur notre agriculture et attendus au cours des prochaines décennies doit nous conduire à considérer ces vagues de chaleur comme un déterminant important de l'activité agricole en France au xxi^e siècle. On s'intéresse ici à rappeler les principaux effets des vagues de chaleur sur les productions agricoles végétales et animales en France métropolitaine, ainsi que les voies majeures d'adaptation.

Principaux impacts sur l'agriculture et l'élevage et voies d'adaptation

- *Lien entre température et croissance : un principe commun à toutes les espèces végétales*

La croissance des espèces végétales – cultivées ou non – est liée à la température suivant une courbe en cloche dont les caractéristiques découlent de l'origine géographique de chaque espèce. Ainsi, les plantes d'origine intertropicale – par exemple maïs, sorgho, ou tournesol – possèdent un optimum de croissance (le point haut de la courbe) correspondant à des températures plus élevées comparativement à des espèces d'origine plus septentrionale ou australe (par exemple blé, colza, ou prairie). Ces espèces à optimum thermique plus élevé sont dites « thermophiles ».

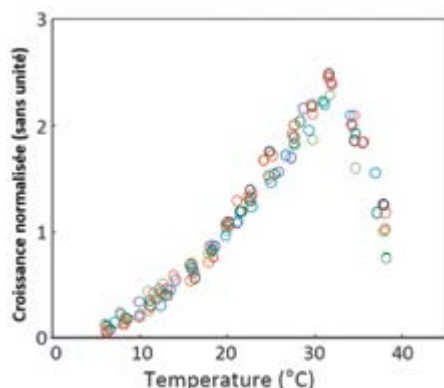


Figure C 23 : Réponse de la croissance de différentes lignées de maïs à la température.

Source : Parent et Tardieu (2012).

Cela a deux incidences majeures pour l'agriculture française. D'une part, toute espèce cultivée voyant sa croissance pénalisée (même en conditions hydriques favorables) lorsque la température dépasse son optimum thermique de croissance, l'accentuation des vagues de chaleur que nous connaissons a déjà un effet globalement délétère sur les productions végétales dans notre pays. D'autre part, les espèces non thermophiles subissant une réduction de leur croissance au-delà de seuils moins hauts que dans le cas des espèces thermophiles, les pertes de production liées aux températures élevées sont (et seront) plus marquées dans notre pays pour les premières que pour les secondes.

- **Vagues de chaleur : une accélération qui inquiète la communauté agricole française**

La vitesse à laquelle ces vagues de chaleur s'amplifient dans notre pays (cf. articles précédents) n'est pas sans inquiéter la communauté agricole française. Le simple examen de l'évolution du nombre de jours chauds ($TX \geq 25\text{ °C}$) ou très chauds ($TX \geq 30\text{ °C}$) – indicateurs mieux compris par les agriculteurs que la sévérité – au cours des 50 dernières années rend compte de la vitesse à laquelle ces phénomènes chauds montent en puissance.



Figure C 24 : Augmentation décennale du nombre de jours par an dépassant 25 °C (en jaune) ou 30 °C (en orange) constatée entre 1970 et 2022 dans cinq grandes régions agricoles françaises. Unité : jour par décennie.

Source : Infoclimat. Données : Météo-France.

● Impacts sur les cultures annuelles

Le blé tendre est une des espèces cultivées les mieux documentées quant à l'effet des températures élevées. C'est notamment le processus de remplissage des grains en fin de cycle cultural, qui est affecté dès que la température dépasse 25 °C, et commence à être nettement pénalisé au-delà de 32 à 35 °C ; on parle alors d'échaudage thermique. Ce phénomène a particulièrement affecté la production française lors des campagnes de 2005, 2006, 2017, 2019, 2020 et 2022. L'accentuation tendancielle du nombre de jours chauds (voire très chauds) constatée en fin de cycle cultural du blé (approximativement entre début juin et mi-juillet) explique pour moitié environ le plafonnement du rendement du blé tendre apparu dans l'ensemble de la France à partir du milieu des années 1990 (Brisson *et al.*, 2010). En 2022, dans les départements touchés par la vague de chaleur apparue fin juin, les rendements du blé tendre ont été particulièrement bas, équivalents à ceux du milieu des années 1980.

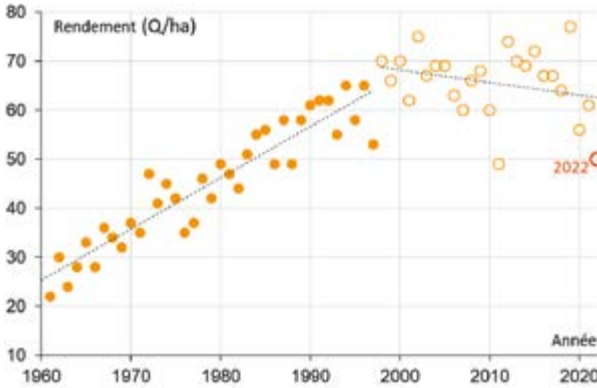


Figure C 25 : Rendement moyen départemental du blé tendre en Charente-Maritime de 1961 à 2022.

Sources : Données : DRAAF/SRISE ; traitement : ORACLE Nouvelle-Aquitaine.

Les vagues de chaleur affectent également les espèces thermophiles. Ainsi chez le maïs, les processus de croissance commencent à être ralentis au-dessus de 32 °C, des impacts plus sévères apparaissant à des températures supérieures : arrêt de la croissance et de la pollinisation à partir de 40 °C, éclatement des cellules à partir de 44 °C. Le tournesol voit lui aussi sa croissance affectée à partir de 31 °C, mais sa résistance aux températures supérieures à 35 °C apparaît meilleure que celle du maïs.

À l'échelle nationale, l'effet d'une canicule sur la production végétale est difficile à dissocier des effets hydriques. Cependant, et à titre indicatif, on pourra noter que la canicule de 2019 aurait réduit d'environ 10% la production française de blé tendre et de maïs (source : ministère de l'Agriculture).

● Quelques adaptations en cultures annuelles

L'utilisation de variétés plus « précoces » – c'est-à-dire à cycle plus court – déplace un peu plus tôt dans l'année la phase de sensibilité aux températures élevées (par exemple la phase de remplissage des grains), à un moment où la probabilité d'apparition d'une vague de chaleur est plus réduite. Cette adaptation – dite « d'esquive » – est déjà adoptée par bon nombre de céréaliers, en Champagne, par exemple, où l'on observe depuis quelques années la quasi-disparition des variétés de blé tendre à épiaison très tardive (4,5) ou tardive (5).

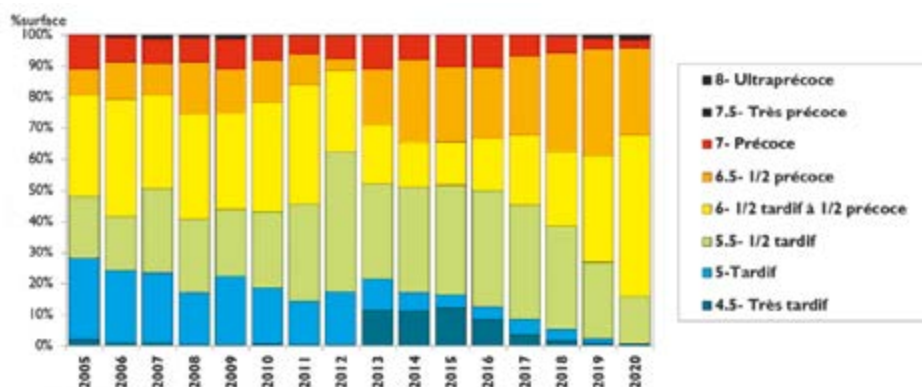


Figure C 26 : Évolution du choix de variétés de blé tendre chez un panel de céréaliers de Champagne entre 2005 et 2020. L'échelle de précocité concerne l'épiaison. Projet FARMSTAR.

Source : Arvalis – Institut du végétal.

Cette voie d'adaptation est pertinente pour les cultures annuelles récoltées en fin de printemps ou en début d'été, compte tenu du cycle thermique annuel (vagues de chaleur plus probables en juillet et août). En revanche, pour les cultures annuelles récoltées en fin d'été ou en automne, ce mode d'action est *a priori* non pertinent puisqu'il augmente la probabilité d'apparition de vagues de chaleur au stade cultural sensible. Sur le plan hydrique, les conclusions ne sont pas les mêmes.

La sélection variétale constitue une autre voie d'adaptation. Elle vise à mettre au point des variétés ayant de bonnes aptitudes de croissance – on parle de tolérance à la chaleur – dans une plage plus haute de températures, quitte à avoir un rendement un peu moins élevé à l'optimum thermique. Des travaux de recherche sur ce type de tolérance sont en cours, portés par INRAE et Arvalis – Institut du végétal et impliquant des plateformes expérimentales assez lourdes. Un site de test, spécifiquement dédié aux stress thermiques des céréales, est en place à Gréoux-les-Bains. L'évaluation des premières variétés tolérantes nécessitera quelques années, et devra être maintenue durant plusieurs décennies compte tenu de la dynamique de réchauffement attendue dans notre pays.



Figure C 27 : À Gréoux-les-Bains (04) une plateforme expérimentale pilotée par Arvalis a été mise en place pour tester des variétés de blé plus résistantes à la chaleur.

Source : © Perspectives agricoles.

Par ailleurs, la protection des cultures contre les températures élevées peut être recherchée par des effets d'ombrage. Si les ombrages artificiels (voir plus loin) concernent principalement les cultures pérennes, les arbres isolés, l'agroforesterie ou encore les haies peuvent constituer les vecteurs d'ombrages – donc de rafraîchissement – intéressants. Cependant, les bénéfices strictement thermiques de ces « parasols » naturels sont à ce stade peu évalués, les diagnostics ayant principalement porté sur la biodiversité, l'érosion des sols, et l'effet brise-vent. Enfin, il ne faut pas oublier que les arbres – eux aussi – peuvent souffrir de températures très élevées. Dans nombre de régions de grande culture françaises, l'association « arbre-culture » ne fait pas l'objet à ce jour d'une adoption massive par les agriculteurs (concurrence entre arbres et culture pour la lumière, l'eau et les éléments minéraux, gêne aux engins mécaniques, valorisation des arbres).

Le déplacement géographique des cultures (remontée vers le nord) au sein de l'Hexagone apparaît d'une faible utilité face aux vagues de chaleur, compte tenu de l'extension géographique de ces phénomènes pouvant dès à présent – et encore plus à l'avenir – toucher la quasi-totalité de notre territoire. Quant au changement d'espèces cultivées, au bénéfice d'espèces thermophiles, il est toujours possible, mais pose à la fois la question du maintien des filières dans notre pays, et la question de l'évolution des rotations culturales dans les parcelles et de leurs effets agronomiques (structure du sol, pression de maladies).

● *Impacts sur les cultures ligneuses pérennes*

En viticulture, les fortes chaleurs se traduisent notamment par des phénomènes de dessèchement des feuilles puis des baies (on parle de « grillures »), accentués par les situations de sécheresse. Ces lésions irréversibles peuvent apparaître en quelques heures et découlent de l'éclatement des cellules soumises à des tensions osmotiques trop fortes.



Figure C 28 : Pied de vigne grillé par la chaleur à Estagel (66) lors de la canicule de juin 2019.

Source : ©France Bleu Roussillon.

Dans les cas les plus sévères, les pertes de production à l'échelle d'un vignoble peuvent être conséquentes, comme ce fut le cas par exemple pour les appellations Banyuls et Collioure (64) qui perdirent environ 40% de leur production en raison de la canicule de juin 2019.

En arboriculture fruitière, les fortes chaleurs impactent principalement les fruits, avec des phénomènes de brûlure, l'éclairage direct jouant également un rôle dans ces dégradations.



Figure C 29 : Pommes abîmées par des températures trop élevées.

Source : © Daily Science.

● *Quelques adaptations en cultures pérennes*

En diminuant l'éclairage direct, l'ombrage artificiel permet de réduire la température à laquelle sont exposées les plantes cultivées. Dans le cas le plus simple, cet ombrage peut être obtenu au moyen de filets, tendus verticalement le long du feuillage dans le cas de la vigne, ou horizontalement au-dessus du feuillage dans le cas des arbres fruitiers. Pour ne pas limiter le rayonnement solaire lorsque cela n'est pas souhaité (perte d'activité photosynthétique) – ces filets doivent être aisément repliables. Le rôle de ces filets peut être double avec un usage de protection contre la grêle. Ils constituent cependant des investissements non négligeables,

difficiles à amortir sur des cultures à faible valeur ajoutée, et dont l'efficacité vis-à-vis des hautes températures est en cours d'évaluation.



Figure C 30 : Filets d'ombrage dans un vignoble du sud-ouest de la France.

Source : © IFV.

Beaucoup plus complexes et onéreuses, les installations agrivoltaïques délivrent également cet effet rafraîchissant lié à l'ombrage. Les panneaux photovoltaïques, mobiles et plus espacés que dans une installation classique, sont pilotés pour optimiser l'ensemble du microclimat de la culture qu'ils surplombent (températures basses, températures hautes, luminosité, hygrométrie), la production d'électricité n'étant généralement pas prioritaire sur la finalité agricole. Nécessitant des investissements lourds, ces installations s'appuient sur des contractualisations multiannuelles entre l'agriculteur et l'énergéticien. Leur évaluation se précise, tandis que les installations expérimentales commencent à se multiplier en France.



Figure C 31 : Le démonstrateur agrivoltaïque de Piolenc (84) permet d'évaluer ce type d'installation en viticulture.

Source : © Sun'R.

En viticulture, le rafraîchissement par ombrage peut aussi être obtenu au moyen d'arbres implantés entre les rangs de vigne. Là encore des plateformes d'évaluation sont en phase de test, les questions de concurrence entre arbres et ceps devant être maîtrisées. D'ores et déjà, certains vignobles à forte dimension patrimoniale (Bourgogne, Bordelais, Loire, Champagne...) affichent une très forte réticence à une telle modification de leur paysage viticole historique.



Figure C 32 : Expérimentation d'agroforesterie en viticulture dans le Gers.

Source : © IFV.

Le rafraîchissement des cultures peut également être obtenu au moyen de l'irrigation par aspersion, grâce au transfert d'énergie que permet l'évapotranspiration. Cependant, en viticulture comme en arboriculture, l'irrigation se fait principalement au moyen du goutte-à-goutte. De plus, les périodes de forte chaleur sont le plus souvent des périodes de sécheresse pendant lesquelles l'usage de l'irrigation en journée est très fortement contingenté voire interdit.

Enfin, dans les zones avec relief, le changement d'exposition peut également constituer un moyen de protection contre les températures élevées, par l'utilisation des versants exposés au nord ou au nord-est. Encore faut-il que de tels versants soient présents et exploitables dans la zone de production ou dans l'exploitation concernée. Ainsi, en Bourgogne des mouvements de ce type se manifestent, mais de façon très limitée compte tenu de l'exposition générale (est sud-est) de ce vignoble.

● *Impacts sur les animaux d'élevage*

Comme les végétaux cultivés, les animaux d'élevage ont une activité physiologique qui dépend de la température ambiante. Cette sensibilité à la température recouvre deux dimensions. D'une part, celle du bien-être animal, correspondant au confort ou à l'inconfort thermique ressenti par les animaux, cet inconfort pouvant être sévère voire léthal lorsque les températures sont extrêmement élevées. D'autre part, une dimension économique liée au fait que si la température augmente, un animal d'élevage consacre davantage d'énergie métabolique à la régulation de sa température, ce qui entraîne une baisse de sa productivité en lait et/ou en viande, ainsi que de sa fertilité. Évidemment, c'est lorsqu'un animal est dans sa zone de confort thermique que sa productivité est la plus élevée.



Figure C 33 : Lorsqu'un animal d'élevage est exposé à une chaleur excessive il souffre d'inconfort et sa productivité diminue.

Source : © Euronews.

En première approche, on considère généralement qu'une température ambiante de 23 à 27 °C est la plage au-delà de laquelle le confort et la productivité d'une majorité d'espèces élevées en France commencent à se dégrader. Évidemment, plus la température s'élève au-dessus de cette plage, plus les animaux sont impactés. Les éleveurs « bovin-lait » font depuis longtemps le constat de baisses de production de lait de leurs vaches lors d'épisodes de chaleur. Pour la seule année 2020 par exemple, il est estimé (source : ITK¹) que la baisse de production de lait de vache en France liée aux vagues de chaleur a avoisiné 4 millions de litres.

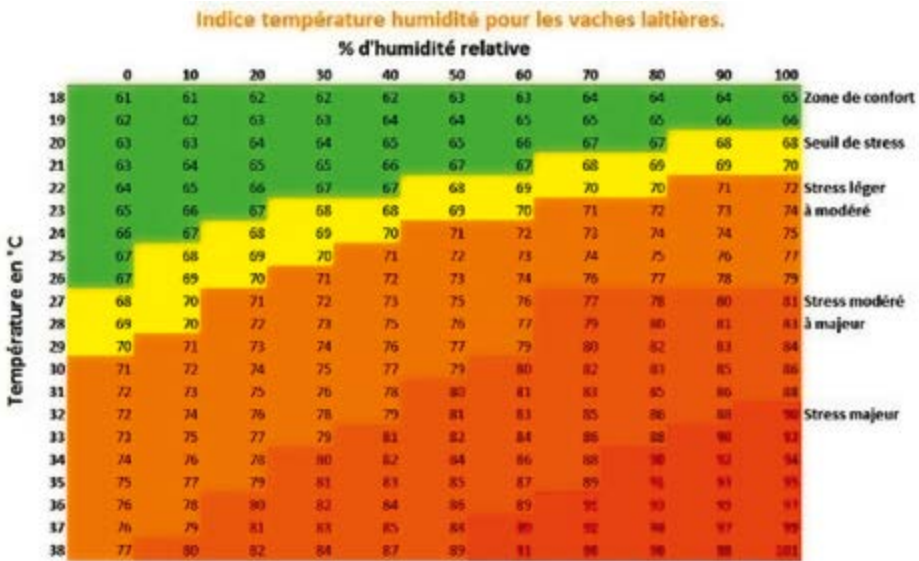


Figure C 34 : Valeurs de l'indice « température humidité » en fonction de ces deux paramètres, et niveaux de stress associés pour les vaches laitières.

Source : IDELE.

1. ITK est une entreprise d'innovation agronomique : www.itk.fr

Plus précisément, c'est la combinaison entre température et humidité qui – comme pour l'homme – va déterminer à quel point les animaux d'élevage sont affectés. Pour les principales espèces d'élevage (bovins, ovins, caprins...) des indicateurs de confort thermique – basés sur ces deux paramètres – sont établis, qui renseignent sur l'intensité du stress subi par les animaux.

On remarque que le stress thermique se manifeste assez vite. Dans le cas des vaches laitières par exemple, le stress « modéré à majeur » est atteint dès 36 °C pour une humidité relative supérieure ou égale à 20%. On comprend dès lors que la multiplication des jours à plus de 35 °C, voire 40 °C, constatée et attendue en France, pèse et va peser de plus en plus fortement sur les animaux d'élevage en France. Il reste à savoir si les jours à températures très élevées pourront s'accompagner à l'avenir d'humidités relatives supérieures à 40 ou 50 %, auquel cas la vie des animaux d'élevage pourra être menacée. Dans son dispositif national de gestion des vagues de chaleur (ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation/CGAER, 2020), le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire souligne que « sans une réponse adaptée aux besoins physiologiques des animaux d'élevage, le taux de mortalité [des animaux] peut être préoccupant ».

● *Quelques adaptations en élevage*

Pour les animaux qui pâturent (c'est-à-dire qui s'alimentent en extérieur), l'ombrage est un levier efficace, les animaux s'abritant spontanément à l'ombre par forte chaleur. À cette fin, on pourra multiplier les arbres au sein des prairies, les contraintes d'espace liées aux engins agricoles étant moins prégnantes qu'en cultures annuelles. Les haies en bordures de prairies peuvent également être préservées voire replantées, en veillant à ce qu'elles comportent des arbres dits « de haut jet », c'est-à-dire suffisamment hauts pour projeter au sol une ombre significative, notamment lorsque le soleil est haut dans le ciel. Dans les élevages peu arborés, des ombrages artificiels (au moyen d'une toile par exemple) peuvent être mis en place.

Lorsque cela est possible, l'affouragement (apport de fourrage aux animaux lorsque les prairies sont trop asséchées) en sous-bois permet aux animaux de bénéficier de conditions nettement plus fraîches notamment en milieu de journée.

L'abreuvement des animaux est à surveiller attentivement lors des fortes chaleurs, les besoins en eau des animaux s'accroissant nettement, d'environ 50% dans le cas des bovins par exemple. La brumisation, à l'intérieur des bâtiments d'élevage ou en périphérie de ceux-ci, est une technique qui se développe en France métropolitaine. Autrefois limitée aux pays chauds, elle s'avère thermiquement très efficace et peu consommatrice d'eau.



Figure C 35 : La brumisation est un moyen efficace pour rafraîchir les animaux d'élevage en période de forte chaleur.

Source : © Natura-Sciences.

En zone de montagne, l'estive (montée en altitude des animaux) pratiquée historiquement pour la valorisation des prairies d'altitude, est un levier très efficace d'adaptation aux températures chaudes : environ 6 °C de baisse de température sont obtenus pour une élévation de 1 000 m.

Enfin, en période de canicule, le ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire restreint le transport des animaux vertébrés.

● *Impacts sur les travailleurs agricoles et adaptations*

En agriculture, de nombreuses tâches sont effectuées en extérieur par les exploitants agricoles eux-mêmes ou par leurs salariés (soin des troupeaux, déplacement de matériels, récoltes manuelles...), à des périodes de l'année où les vagues de chaleur peuvent apparaître. L'exposition des personnes à ces conditions thermiques difficiles entraîne des risques pour la santé, ainsi qu'une baisse de la productivité. L'Office international du travail estime qu'un travailleur moyen perd 50% de ses capacités à 33-34 °C.

Le code du travail (décret du 19 décembre 2018 complété par l'instruction du 31 mai 2022) impose à l'employeur de protéger ses salariés face à ces phénomènes : modification de l'organisation du travail incluant le changement des horaires, mise à disposition d'eau fraîche, ventilation des bâtiments pour les travaux en intérieur.

Lors des périodes de fortes chaleurs, les organismes de conseil agricole de même que la presse agricole multiplient les messages d'alerte et les recommandations pour limiter tant que faire se peut l'exposition à ces fortes températures des femmes et des hommes qui travaillent dans les entreprises agricoles.

The image shows a screenshot of the website 'La France Agricole'. At the top, there is a red navigation bar with the site's name and a search icon. Below this is a black bar with various menu items: ACTUALITÉS, MÉTÉO, COURS ET MARCHÉS, CULTURES, ÉLEVAGE, and TRACTEURS ET MATÉRIELS. The main content area has a white background with a red 'EMPLOI' tag. The article title is 'Que doit faire l'employeur agricole en cas de canicule ?' with a date of 13/07/22 and a category tag 'Emploi'. The text discusses the employer's obligations during a heatwave, mentioning the Code du Travail and the need for protective measures for agricultural workers.

EMPLOI

Que doit faire l'employeur agricole en cas de canicule ?

© 13/07/22

Emploi

L'employeur agricole est tenu de prendre des dispositions particulières pour la protection des salariés si son département est placé en alerte rouge « canicule » par Météo France.

Comme les **salariés agricoles** travaillent souvent dehors, ils sont particulièrement exposés au risque caniculaire en ce moment. Les conseils pour se protéger de la chaleur intense relèvent surtout du bon sens mais il revient à l'employeur de s'en assurer, voire de les devancer.

Le **Code du Travail** est sans ambiguïté sur ce point : il revient à l'employeur de protéger la santé des salariés, selon un décret du 19 décembre 2008. À ce titre, il peut même prendre des mesures contraignantes pour assurer la **protection du salarié**. En particulier, il peut être amené à mettre en place une organisation différente du travail, y compris les horaires, pour éviter l'exposition trop forte à la chaleur. Par exemple, il peut imposer d'embaucher plus tôt dans la journée ou de faire des pauses plus fréquentes.

De l'eau fraîche à disposition

Figure C 36 : Site Internet du journal *La France agricole* lors de la canicule de juillet 2022.

Source : *La France agricole*.

Conclusion et perspectives

Le rythme auquel les vagues de chaleur se multiplient et s'intensifient dans notre pays constitue un véritable défi pour l'agriculture française, et ceci d'autant plus que les travaux les plus récents (*Ribes et al., 2022*) suggèrent une accélération possible de ces phénomènes en France, au-delà des trajectoires préalablement envisagées par les climatologues. Il ne faut donc pas sous-estimer le challenge que vont représenter, pour l'agriculture de l'Hexagone, l'identification et la mise en œuvre d'adaptations à des phénomènes climatiques d'une telle ampleur. De fait, la question de l'adaptation aux vagues de chaleur – après avoir été quelque peu occultée par le sujet jugé prioritaire des sécheresses – semble intéresser davantage la communauté agricole française.

Les pistes d'adaptations – déjà éprouvées ou encore à l'étude – se multiplient, permettant d'envisager de réelles marges de manœuvre pour les agriculteurs et éleveurs. En termes d'efficacité, c'est généralement un cortège de solutions d'adaptations qu'il faut mettre en œuvre pour parvenir à un niveau d'efficacité satisfaisant (par exemple : amélioration génétique et pratiques culturales). La multiplicité de ces adaptations, la difficulté technique ou financière de leur mise en œuvre et la complexité de leur évaluation appellent de la part des organismes de conseil un effort – déjà entamé mais majeur – de montée en compétences des agents et d'accompagnement des agriculteurs et des éleveurs.

Si l'adaptation est une nécessité déjà vitale, la maîtrise – à hauteur nécessaire – des émissions mondiales de GES demeure le levier incontournable pour que ces vagues de chaleur n'atteignent pas – durant la seconde moitié de ce siècle – des niveaux que l'agriculture et l'élevage français seraient difficilement en capacité de gérer.

Impacts des vagues de chaleur sur la production d'énergie électrique

Catherine Halbwachs et Sylvie Parey,
Électricité de France (EDF)

Malgré un été 2022 exceptionnellement chaud et sec, le parc de production EDF a répondu à la demande. Il était préparé à travers la prise en compte des retours d'expérience de la tempête de 1999 et de la canicule de 2003, les plans aléas climatiques et grands chauds et une politique d'anticipation continue.

Un été 2022 exceptionnel : précocité, durée, sévérité

L'été 2022 a été le plus chaud après 2003. Il se caractérise¹ :

- par sa précocité : dès le début du mois de mai, certains records saisonniers étaient approchés ;
- par sa durée : trois vagues de chaleur du 15 au 19 juin, du 12 au 25 juillet puis du 31 juillet au 13 août et des températures en moyenne de 1 à 3 °C au-dessus des valeurs saisonnières ; 36,2 °C de température maximale moyenne sur la France le 18 juin et 37,6 °C le 18 juillet ;
- par sa sévérité : le déficit pluviométrique combiné aux fortes chaleurs a provoqué des périodes de sécheresse importantes. Les cumuls de précipitations déficitaires de 40 à 60% sur une grande partie du territoire et de 60% sur le Nord-Ouest et l'Occitanie. L'été 2022 se situe dans les 10 étés les plus secs en France.

Il a aussi été marqué par un épisode orageux extrême le 18 août en Corse, avec des rafales de vent localement supérieures à 200 km/h.

Un système électrique résilient

Les mesures techniques et réglementaires issues notamment du retour d'expérience de la canicule de 2003 ont montré la résilience de l'ensemble du système électrique.

1. Source : Bilan climatique de l'été 2022, Météo-France.



Figure C 37 : Vue extérieure de la Centrale de Cattenom (Lorraine) rivière La Moselle.

Source : © Natura-Sciences.

- Au niveau technique, des investissements avaient été réalisés en particulier sur la production de froid, le changement des échangeurs eau ou air pour améliorer le rendement et la résilience, le durcissement de matériels sensibles...
- Au niveau réglementaire, fin juillet 2022, plusieurs limites d'échauffement des fleuves étaient atteintes et la direction du parc nucléaire et thermique (DPNT) a sollicité la mise en œuvre de mécanismes dérogatoires :
 - sur requis (demande) du gestionnaire du Réseau de transport d'électricité français (RTE) (ex. : besoin Golfech pour le Sud-Ouest) accompagné d'une surveillance environnementale renforcée ;
 - sur autorisation ministérielle, un dispositif mis en place suite au retour d'expérience 2003 pour répondre aux situations exceptionnelles et jamais utilisé jusqu'alors.

Ces demandes étaient renforcées par la réponse à la demande des pouvoirs publics de privilégier le recours au nucléaire pour sauvegarder les réserves de gaz et préserver l'hydraulique en préparation de l'hiver prochain. Les dérogations données jusqu'au 11 septembre ont finalement été peu utilisées.

L'été 2022 a aussi permis de montrer le caractère systémique du dérèglement climatique et de ses conséquences.

La prise en compte du dérèglement climatique

Le nombre de vagues de chaleur en France a augmenté depuis 1989. Quelle que soit la trajectoire d'émissions de gaz à effet de serre et aérosols, les projections climatiques indiquent la poursuite de ce phénomène et une intensification des événements.

À EDF, même si les travaux de recherche sur le changement climatique remontent au début des années 1990, la canicule de 2003 a occasionné une prise de conscience des conséquences du dérèglement. Elle a amené à vérifier l'adaptation du parc

nucléaire en exploitation à l'occurrence de températures extrêmes chaudes de l'air et de l'eau plus élevées que celles observées dans le passé sur lesquels la conception avait été basée.

Le groupe EDF s'est doté d'un service climatique regroupant des projections climatiques issues des exercices internationaux et des outils à l'état de l'art permettant d'en décliner les résultats à l'échelle de ses activités.

Un nouveau référentiel, dit «grands chauds» a été mis en place. Les températures extrêmes chaudes ont été estimées à partir des séries de températures observées aux stations Météo-France de référence des centres nucléaires de production d'électricité (CNPE)². La méthodologie étant basée sur l'extrapolation de tendances récentes, des mises à jour régulières sont prévues. Avec l'expérience acquise sur l'application des extensions de la théorie statistique des valeurs extrêmes, elles ont conduit à des ajustements. Ainsi le seuil de sélection des extrêmes observés évolue avec le temps. La dernière mise à jour date de 2019, et les canicules de 2022 n'ont pas occasionné de dépassements des valeurs estimées alors.

Avec la programmation de nouveaux réacteurs, la nécessité d'estimer des valeurs extrêmes possibles en fin de siècle en tenant compte du changement climatique s'est aussi imposée. Une thèse³ a permis de mieux comprendre les liens entre les évolutions de moyenne, de variance et des extrêmes de la température de l'air, et de proposer une méthode pour estimer des extrêmes futurs. Cette méthode repose sur la construction d'une variable dont les extrêmes peuvent être considérés comme stationnaires, à partir de laquelle on estime le niveau de retour souhaité⁴.

Outre des températures très élevées, les canicules occasionnent des débits des fleuves et rivières plus bas. Ainsi, la mise en place du projet ADAPT au sein de la direction de la production nucléaire et thermique d'EDF s'accompagne de la nécessité d'anticiper les événements de canicule et d'étiage les plus sévères susceptibles de survenir à l'horizon 2050. La méthodologie repose sur la génération stochastique d'un grand nombre de séries temporelles de température et de précipitations équivalentes aux séries observées ou projetées, à l'aide de générateurs de temps. Ces séries constituent les données d'entrée du modèle hydrologique MORDOR, qui produit le même nombre de séries temporelles de débit, à partir desquelles il est possible de faire des statistiques robustes. Un nombre limité de scénarios possibles d'évolution du climat, représenté par des couples modèle climatique/scénario d'émissions de gaz à effet de serre et aérosols, produisant des projections contrastées, est sélectionné dans l'ensemble de projections. Cette méthodologie permet également d'estimer l'évolution de fréquences

2. La méthode a été publiée dans le journal *Climatic Change* en 2007 et son adaptation pour les températures de l'eau dans *Natural Hazards Earth System Sciences* en 2008. Elle a également fait l'objet d'une validation par Météo-France à la demande spécifique d'EDF.

3. Thèse coencadrée avec le professeur Dacunha-Castelle du laboratoire de mathématiques de l'université d'Orsay.

4. La consolidation de cette méthode a été publiée dans *Natural Hazards* en 2019.

d'événements observés à l'horizon 2050. À titre d'exemple, cette approche a permis d'estimer les évolutions de fréquence d'un événement caniculaire du type de celui de juin 2022 à l'horizon 2050 pour l'un de nos sites.

Un épisode est défini comme un nombre de jours au cours desquels la température moyenne journalière dépasse le quantile 98% de la distribution des températures moyennes journalières en été sur la période 1981-2010. Son intensité est la somme des écarts à ce seuil sur la durée de l'épisode et le maximum est la température maximale atteinte au cours de l'épisode.

Tableau C2 : Évolution de fréquence d'un événement caniculaire.

	En termes d'intensité	En termes de maximum
Actuellement (1981-2010)	= tous les 10 ans	= tous les 20 ans
2050 scénario bas	= tous les 5 ans	= tous les 10 ans
2050 scénarios intermédiaires	= tous les 2 ans	= tous les 5 à 7 ans
2050 scénario haut	= 3x par an	= 2x par an

Source : EDF R&D – Service climatique.

Par ailleurs, une étude publiée en 2021 (Parey and Marty, 2021) a permis d'analyser les évolutions à l'horizon 2050 pour cinq aléas majeurs impactant le réseau de distribution d'électricité, dont les canicules et les feux de forêt. Elle montre qu'il faut se préparer à des températures extrêmes chaudes plus élevées de 5 à 10 °C selon les modèles climatiques considérés et à une extension à la fois de la saison et de la zone à risque de feux de forêt.

Les études réalisées ont démontré la robustesse du parc de production du groupe EDF, tout en identifiant les points à surveiller. Si le changement climatique, mais aussi les autres changements anthropiques sont source supplémentaire d'incertitudes à prendre en compte dans les évaluations, le principe d'un réexamen tous les dix ans de la sûreté des ouvrages nucléaires et hydrauliques constitue un pilier fondamental de la robustesse sur le long terme (Burtin et Parey, 2022).

Poursuivre et accélérer les dynamiques d'adaptation

Le retour d'expérience de l'été 2022 amène à s'interroger sur :

- la prise en compte du dérèglement dans les choix d'investissement dès maintenant et les études sur les marges techniques ;
- le partage de l'eau entre les différents usages avec un changement de paradigme dans le cadre d'une analyse systémique de l'impact du dérèglement climatique sur la résilience des territoires ;
- une analyse approfondie sur les seuils de température des cours d'eau en vigueur et la prise en compte du retour d'expérience et des données recueillies selon le milieu considéré ;

– un travail par la distribution, notamment sur le remplacement des éléments sensibles à la chaleur (câble papier imprégné) et le passage de câbles aériens à souterrains dans les zones boisées.

Pour prendre en compte à la fois le caractère systémique et évolutif du dérèglement climatique et l'évolution de la demande d'électricité, le secteur a besoin de pouvoir compter sur des moyens de production pilotables et très bas carbone pour assurer la sûreté et la résilience des systèmes électriques et contribuer à l'habitabilité des territoires.

Le groupe EDF a dans ce but publié en mars 2022 son plan de transition climatique⁵, articulé autour de trois axes, complétés d'un volet gouvernance répondant aux meilleures pratiques préconisées par la TCFD⁶ :

- Réduire les émissions de gaz à effet de serre du groupe.
- Adapter les installations du groupe au changement climatique.
- Développer les usages de l'électricité décarbonée.

Adapter les installations du groupe au changement climatique

Avec des ouvrages dont la durée de vie technique dépasse potentiellement 40 ans, le groupe EDF doit adapter ses installations aux conséquences physiques du changement climatique. Dès la publication du premier rapport du GIEC en 1990, le groupe EDF a mis en œuvre des projets de recherche sur le changement climatique, en collaboration avec le Laboratoire de météorologie dynamique (LMD) et une des premières versions du modèle climatique du LMD a été utilisée à EDF pour des études de sensibilité. À partir de 1995, le modèle ARPEGE-Climat de Météo-France a également été utilisé. Dès 2004, le groupe EDF s'est doté d'un plan « Aléas climatiques », puis d'une stratégie d'adaptation au changement climatique en 2010. En 2014, il a mis en place un service climatique, unique parmi les grands électriciens, pour appuyer les entités du groupe dans la prise en compte de l'impact du changement climatique. Le risque climatique est inscrit depuis 2018 comme risque prioritaire à l'échelle du groupe EDF, une cotation confortée par les conclusions du rapport sur les impacts, l'adaptation et la vulnérabilité du changement climatique publié par le GIEC en février 2022.

● *Définir la politique d'adaptation des installations*

Le plan de transition climatique du groupe EDF intègre un volet adaptation, aux termes duquel le groupe s'engage notamment à évaluer les impacts du changement climatique selon les hypothèses d'évolution du climat, à adapter les installations existantes pour les rendre moins sensibles aux conditions climatiques et résilientes aux situations extrêmes, et à intégrer ces projections dans la conception des nouvelles installations.

5. <https://www.edf.fr/sites/groupe/files/2022-03/2022-03-14-plan-transition-climatique-groupe-edf.pdf>

6. Taskforce on Climate-related Financial Disclosure.

- *Les phénomènes extrêmes et le passage de l'été*

En 2003, certaines centrales avaient dû réduire leur production afin d'éviter de contribuer au réchauffement de l'eau des rivières, entraînant une perte de production équivalente à 1% de la production d'EDF. Le plan « Grand Chaud » a par la suite conduit EDF à procéder à l'amélioration de l'efficacité du refroidissement de certaines de ses centrales et à renforcer l'électronique des bâtiments réacteurs afin de pouvoir supporter des températures supérieures à 50 °C. Les centrales en cours de construction du groupe EDF ont toutes été dimensionnées en intégrant les scénarios climatiques les plus récents.

- *Adapter les installations de tous les grands métiers du groupe*

Le groupe a lancé le programme ADAPT en vue d'analyser le niveau d'adaptation du parc nucléaire existant au dérèglement climatique. Une étude détaillée est menée à Chooz, qui permet de produire une analyse en grandeur nature de l'ensemble des fragilités potentielles au regard des conséquences du dérèglement climatique, puis de proposer un plan d'actions. Afin de renforcer la résilience des ouvrages hydrauliques aux aléas climatiques extrêmes et aux risques liés à l'afflux massif d'eau dans les réservoirs, le groupe procède à une réévaluation régulière des débits de crues extrêmes – afin de s'assurer du maintien de la capacité des ouvrages à évacuer ces crues – et a développé et installé sur certains de ses ouvrages une technologie innovante dite « Piano Key Weir⁷ » qui permet le déversement d'une quantité d'eau plus importante, sans pour autant accroître les dimensions des barrages. Pour réduire la vulnérabilité des réseaux de distribution, Enedis travaille à l'enfouissement des réseaux HTA aériens et a créé une force d'intervention rapide (FIRE) qui permet de repositionner, sur l'ensemble du territoire, des moyens et des hommes afin de rétablir au plus tôt l'alimentation électrique. La FIRE est un dispositif clé du groupe EDF vis-à-vis des risques climatiques extrêmes.

- *Renforcer l'action menée grâce aux nouveaux plans d'adaptation*

Au-delà de ces actions engagées de longue date par le groupe, de nouveaux plans d'adaptation au changement climatique sont aujourd'hui déployés afin de renforcer les actions menées au plus près des entités du groupe exposées aux risques physiques du changement climatique.

7. Ces déversoirs de crue en forme de touches de piano (« Piano Key Weir ») sont constitués de bacs d'alimentation et d'évacuation. Leur forme en créneau offre une plus grande surface pour l'écoulement de l'eau, tout en occupant un espace réduit, un avantage pour les barrages encaissés dans des lieux étroits.

Impacts des vagues de chaleur sur le réseau électrique

Laurent Dubus et Catherine Lelong,
Réseau de Transport d'Électricité (RTE)

RTE est le gestionnaire du réseau de transport d'électricité français. En sa qualité d'entreprise de service public, RTE a pour mission l'exploitation, la maintenance et le développement du réseau à haute et très haute tension et garantit le bon fonctionnement et la sûreté du système électrique.

Celui-ci est dépendant des conditions météorologiques à toutes les échelles de temps (WMO, 2017). La température de l'air et des rivières, les précipitations, le vent, l'ensoleillement... ont en effet des impacts tant sur la consommation d'électricité que sa production, mais aussi sur le fonctionnement du réseau lui-même. Le changement climatique va par ailleurs modifier substantiellement ces dépendances.

Les canicules et les vagues de chaleur impactent la consommation et la production d'électricité

La consommation d'électricité en France est historiquement sensible aux températures froides en hiver, en raison du développement du chauffage électrique. La dépendance aux températures chaudes en été est plus récente ; elle est due d'une part au développement des systèmes de climatisation dans les bâtiments mais aussi au besoin croissant de froid industriel. Les vagues de chaleur ont donc de plus en plus d'impact sur la consommation, en raison de l'augmentation du nombre d'installations de froid et du nombre et de l'intensité des vagues de chaleur.

La plupart des moyens de production sont également impactés par les vagues de chaleur :

- La production thermique subit des pertes de rendement en raison de la diminution de l'écart de température avec l'air extérieur (rendement des cycles de Carnot), le phénomène étant encore accentué si l'air est sec.
- Le refroidissement des centrales électriques thermiques (classiques et nucléaires) est contraint par des réglementations visant à protéger les écosystèmes. La capacité de refroidissement peut être réduite aussi bien pour les installations en circuit fermé (avec tours aéroréfrigérantes) qu'en circuit ouvert (par prélèvement d'eau de rivière ou de mer) du fait de l'augmentation de la température d'eau et de la baisse du débit éventuellement associée en période de sécheresse.
- La production éolienne peut-être réduite car l'air chaud est moins dense, ce qui diminue le rendement des pales des turbines.

- Le rendement des panneaux solaires diminue pour des températures d'air supérieures à environ 25 °C.
- La production hydroélectrique n'est pas directement impactée par les vagues de chaleur, mais elle peut l'être indirectement puisque les canicules sont souvent associées à des périodes de sécheresse, et donc de diminution des débits des cours d'eau. Les fortes chaleurs contribuent par ailleurs à une évaporation accrue des lacs de retenue des barrages, diminuant d'autant les stocks d'eau.

Les vagues de chaleur et les canicules ont donc tendance à augmenter la consommation d'électricité, et à limiter la production disponible. Toutefois, ces épisodes interviennent encore essentiellement entre juin et août, lorsque la consommation est plus réduite. À ce stade, elles n'ont donc pas posé de difficulté majeure au système électrique.

Les vagues de chaleur impactent aussi le réseau électrique

Le réseau électrique lui-même est également impacté par les vagues de chaleur et les canicules :

- L'échauffement des lignes aériennes entraîne la dilatation des câbles qui se rapprochent alors du sol avec une possible dégradation du matériel sur les ouvrages anciens. Il convient alors de réduire le transit du courant sur certaines lignes anciennes pour assurer la sécurité des personnes et des biens. Cette réduction de la capacité de transit du réseau a de possibles impacts sur les schémas d'exploitation du réseau et peut engendrer une désoptimisation coûteuse du mix électrique. Les matériels anciens peuvent par ailleurs être endommagés (notamment par dégradation des huiles qu'ils contiennent).
- L'augmentation des températures dans les bâtiments de postes électriques peut endommager des matériels (dont l'électronique), en particulier en cas de panne des ventilations/climatisations concomitantes avec une vague de chaleur. Ces dommages peuvent entraîner des coûts de réparation ou de remplacement.
- Il existe des risques de dommages sur certains matériels anciens, comme les jonctions de câbles oléostatiques (câbles sous pression d'huile) du réseau enterré. Toutefois, depuis la canicule de 2003, cette technologie ancienne de câbles fragiles à la température est progressivement remplacée (toutes les installations concernées devraient être sécurisées d'ici 2030).
- Les périodes de canicule, en particulier lorsqu'elles sont couplées avec la sécheresse, sont propices aux incendies. Pour permettre l'intervention des pompiers, les liaisons aériennes doivent alors être mises hors tension, ce qui peut conduire à perturber l'alimentation de poches de consommations. Plusieurs liaisons ont ainsi dû être mises hors tension pendant l'été 2022 à la demande des pompiers.
- Le risque d'incendie provoqué par l'amorçage d'une ligne en période de forte chaleur est étroitement lié à la politique de gestion de la végétation du gestionnaire de réseau. Le gestionnaire de réseau de transport Californien Pacific Gas and Electric Company a ainsi été accusé d'avoir provoqué des incendies

en 2018 et 2020 par son défaut d'élagage et de débroussaillage sous ses liaisons aériennes. Cela a provoqué sa mise en faillite.

– Les chaleurs extrêmes présentent par ailleurs des risques sur la santé des équipes d'exploitation et de maintenance.

Le réseau électrique, essentiellement construit en extérieur, est donc fortement soumis aux conditions climatiques et à leur évolution. La hausse des températures extrêmes chaudes représente des risques d'augmentation des contraintes de transit (pouvant conduire à des coupures) et d'augmentation des coûts de réparation ou de remplacement des matériels.



Figure C 38 : Réseau électrique aérien traversant le Rhône.

Crédits : © Arnaud Bouissou/Terra.

Des solutions techniques et des besoins de recherche et développement

Des solutions techniques existent déjà ou sont envisageables pour limiter ou supprimer les impacts sur les matériels neufs ou existants, mais elles ont un coût, qu'il convient d'optimiser sur la base des connaissances disponibles relatives aux conditions climatiques actuelles et futures. L'optimisation économique dépend de l'intensité des phénomènes possibles pris en compte dans le dimensionnement des ouvrages, du niveau de risque acceptable et de la durée de vie ou de la fréquence de remise à niveau des installations et des équipements

Dans le cadre incertain lié à l'évolution du climat, le besoin en projections à différents horizons temporels est important. Ces horizons sont ceux des grandes décisions d'orientation du secteur, et des cycles d'investissement, le tout devant être éclairé autant que possible par une vision à long terme, c'est-à-dire la fin de siècle, correspondant à la durée de vie la plus longue des éléments du système constitué par les grandes centrales et le réseau de grand transport principalement.

Les derniers étés ont montré de façon très nette le besoin toujours très important de la science et des services climatiques pour venir informer et éclairer les décisions.

En particulier, les extrêmes de température de l'été 2022 dépassent déjà nettement certaines projections climatiques effectuées pour 2050, y compris selon le pire scénario d'émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5). Des travaux récents tendent également à montrer que les modèles climatiques, y compris régionaux, simulent sur les 50-70 dernières années des tendances sur les extrêmes inférieures à celles observées, d'un facteur 1,5 à 2 (Vautard *et al.*, 2020 ; Van Oldenborgh *et al.*, 2022). Des progrès sont donc encore nécessaires en modélisation du climat pour réduire les erreurs des modèles.

Il y a donc un besoin très fort de développer les connaissances scientifiques pour comprendre les limites des modèles climatiques et y remédier, et de continuer à développer les services climatiques pour apporter des réponses concrètes aux acteurs économiques. Pour cela, la collaboration entre les scientifiques et les gestionnaires du système électrique doit être encore renforcée, afin d'apporter les meilleures réponses possibles, compte tenu de l'état des connaissances. Des choix stratégiques de long terme doivent être faits de manière urgente pour anticiper le changement climatique et ne pas prendre de retard dans l'adaptation.

RTE mène des études liées à la météorologie et au climat, actuel et futur, et à leurs impacts sur le réseau électrique et le fonctionnement global du système français et européen (Lelong et Dubus, 2022). Ces études se font en partie en partenariat avec Météo-France ou encore l'Institut Pierre-Simon-Laplace, mais aussi avec le programme européen COPERNICUS Climate Change Service. Le changement climatique a ainsi été intégré dans l'étude prospective « Futurs énergétiques 2050 »¹ qui a montré que la transformation du système électrique doit intégrer dès à présent les conséquences probables du changement climatique, notamment sur les ressources en eau, les vagues de chaleur ou les régimes de vent. RTE mène également des études sur les impacts du changement climatique sur les éléments du réseau lui-même ; les canicules font l'objet d'une attention particulière dans le projet RÉSILIENCE².

1. https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-10/Futurs-Energetiques-2050-principaux-resultats_0.pdf

2. <https://www.rte-france.com/rte-en-bref/nos-engagements/laction-de-rte-face-au-changement-climatique>

Impacts des vagues de chaleur sur les transports et infrastructures de transport

Cet article traite des impacts directs des vagues de chaleur (températures extrêmes) mais aussi des impacts indirects tels que les incendies de forêt et de broussailles sur les transports et les infrastructures de transport ferroviaires, routiers, portuaires (port et aéroports) et aériens. Il est composé de deux parties distinctes provenant de deux directions du ministère (DGITM et DGAC).

Impact des vagues de chaleur sur les transports ferroviaires, routiers et maritimes

Teodora Popescu,

Direction générale des infrastructures,
des transports et des mobilités (DGITM)

Grâce aux contributions de :

David Courteille, Régis Coene,
RATP

**Valérie Darmaillacq, Clément Philippe,
Christelle Mary,**
SNCF Voyageurs

Et de :

SNCF Réseau

Société du Grand Paris

Voies navigables de France

DGITM

CEREMA

● *Impacts des vagues de chaleur sur le transport ferroviaire et guidé*

Une baisse de la régularité à 5 minutes (i. e. du nombre de trains avec moins de 5 minutes de retard) a été observée chez les transporteurs de SNCF Voyageurs durant l'été 2022, en particulier sur les voyages longue distance. Ainsi, sur la période estivale, les TGV et Intercités ont affiché une régularité d'environ 3% inférieure à l'objectif affiché pour 2022 et une perte en régularité de 4 à 4,5% par rapport à 2021 sur les mois de juillet et août. Les fortes chaleurs de l'été 2022 sont responsables au moins partiellement de cette perte de performance, puisque les journées avec les épisodes alertes rouges canicules ont concentré à elles seules le tiers des minutes perdues par les trains opérés par SNCF Voyageurs. Plus généralement, SNCF Voyageurs note une baisse de la régularité dès que la température extérieure dépasse 28 °C.

Cette baisse de régularité est le résultat des impacts des vagues de chaleur sur l'infrastructure ferroviaire et sur le matériel roulant.

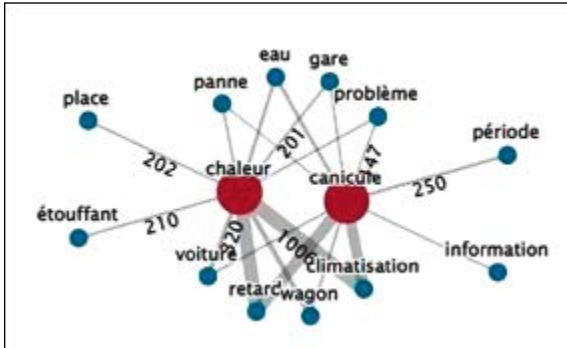


Figure C 39 : Termes revenant le plus souvent dans les commentaires des voyageurs SNCF sur la période mai-octobre 2022.

Source : www.voixduclientsncf.fr

Impacts des vagues de chaleur sur les infrastructures du réseau ferroviaire

SNCF Réseau comptait 8500 incidents dus aux fortes chaleurs touchant l'infrastructure entre le 19 mars et le 9 septembre 2022. Ceux-ci ont conduit à 8500 trains supprimés et 142000 minutes perdues. Les minutes perdues sont estimées à environ 2,8 milliards d'euros de pertes socio-économiques par SNCF Réseau. La performance du réseau semble tout de même meilleure qu'en 2019, où les seuls épisodes caniculaires avaient été responsables de 149100 minutes perdues sur le réseau ferroviaire. Les perturbations ont été plus limitées au niveau de l'Île-de-France sur le réseau RATP.

Les incidents observés sur le réseau ferroviaire sont dus à plusieurs impacts des vagues de chaleur.

Dilatation des rails

L'impact le plus important des vagues de chaleur sur le réseau ferroviaire est la dilatation des rails au-delà d'une certaine température. La déformation de la voie provoquée par cette dilatation peut endommager le rail et conduire à un risque de déraillement des trains circulant sur l'infrastructure. C'est pourquoi des limitations temporaires de vitesse (LTV) sont imposées sur le réseau ferroviaire par temps de fortes chaleurs. Par exemple, sur le réseau aérien RATP, celles-ci sont appliquées dès que la température des rails se maintient au-dessus de 57 °C. Ces limitations de vitesse peuvent être assez importantes : sur le réseau RATP, elles réduisent de près de 50% la vitesse des métros et RER par rapport à leur vitesse maximale.

SNCF Réseau estime qu'entre 2011 et 2021, les limitations de vitesse ont constitué près de la moitié des incidents dus aux fortes chaleurs sur le réseau ferroviaire. En 2022, les seules LTV liées à la chaleur ont par exemple causé plus de 5000 minutes perdues sur les trains opérés par Intercités, soit

plus de 88 heures, entre mai et septembre, avec un pic atteint en juillet. Sur le réseau RATP, les LTV appliquées pendant 2 heures le 19 juillet 2022 pour cause de fortes chaleurs ont impacté 68 000 voyageurs sur la ligne A et causé un certain nombre de tours perdus (i. e. d'aller-retour non effectués sur une ligne) sur les métros, en particulier la ligne 6 (25 tours perdus) et la ligne 13 (8 tours perdus).

Il convient également de souligner que le risque physique de dilatation des rails subsiste malgré la mise en place des limitations de vitesse préventives. Sur les 10 dernières années, les défauts de géométrie de la voie relevés sur le réseau SNCF correspondent à plus de 10% des incidents imputables aux fortes chaleurs. Sur le réseau RATP, les phénomènes observés restent généralement assez localisés sans impact notable sur l'exploitation (3 incidents relevés en 2022).



Figure C 40 : Déformation de la voie sous l'effet de fortes chaleurs.

Source : © SNCF Réseau.

Impacts sur les équipements électriques

L'autre infrastructure ferroviaire la plus sujette à dilatation en cas de fortes chaleurs est la caténaire. Le risque est alors un arrachement de celle-ci par le pantographe, dû au fait que les câbles ne sont plus rectilignes. Les vagues de chaleur peuvent également causer la surchauffe de composants électriques, utilisés pour l'alimentation des voies ou pour le fonctionnement de la signalisation.

Sur les 10 dernières années, les incidents sur les caténaires représentent 5 % des incidents dus aux fortes chaleurs sur le réseau SNCF, tandis que les dysfonctionnements des installations de signalisation représentent plus de 10 % de ces incidents. Sur le réseau RATP, peu d'incidents électriques ont été relevés en 2022. Le plus significatif n'était pas directement lié aux fortes chaleurs, mais aux mouvements de terrain liés à la sécheresse, qui ont causé l'endommagement de câbles enterrés connectés au poste de redressement de Créteil-Préfecture, ayant conduit à une fragilité du réseau d'alimentation se traduisant par une quinzaine de tours perdus sur la ligne 8 début septembre 2022. Concernant la signalisation, la RATP n'a identifié aucun lien de causalité entre les incidents techniques sur la signalisation et les vagues de chaleur. En effet, les équipements utilisés pour la signalisation sont conçus pour fonctionner dans une plage comprise entre - 25 °C et + 70 °C, qui est suffisamment importante par rapport aux températures observées en Île-de-France. Les systèmes informatiques récents permettant de piloter la signalisation peuvent être plus sensibles, mais ils sont dans la grande majorité des cas situés dans des locaux techniques, moins soumis aux élévations de température, et climatisés au besoin.

Incendies

De fortes chaleurs associées à la sécheresse augmentent le risque d'incendie, qui peut être provoqué par les étincelles de freinage des trains eux-mêmes, notamment les trains de marchandises. Sur le réseau ferroviaire, si les incendies n'ont causé que 4 % des incidents dus aux fortes chaleurs sur les 10 dernières années, il doit cependant être noté que le nombre d'incidents dus aux incendies durant l'été 2022 a augmenté de 50 % par rapport à l'été 2019. Sur les réseaux de type métro, l'exposition est moindre car les sections aériennes sont limitées.

Impacts à plus long terme

Des impacts à plus long terme des vagues de chaleur sur les infrastructures ferroviaires méritent également d'être signalés. Sur les ouvrages en terre (talus, remblais, déblais...), des vagues de chaleur répétées pourraient être à l'origine d'une augmentation des dégradations mécaniques pouvant conduire à des tassements localisés (dus à l'évapotranspiration) ou encore à des instabilités superficielles de talus liées au phénomène de retrait ou à l'engazonnement moins efficace en cas de sécheresse. Sur les ouvrages d'art, elles pourraient se traduire par une dégradation des performances de fonctionnement des appareils d'appui des ouvrages aériens (viaducs, ponts...).

Enfin, les vagues de chaleur répétées, qui se traduisent déjà, selon la RATP, par une augmentation du taux de pannes et une diminution de la disponibilité de certains équipements en gare (escaliers mécaniques, ascenseurs, trottoirs roulants, installations de climatisation de locaux techniques ou sociaux...), pourraient conduire à un vieillissement prématuré de certains sous-composants de ces équipements.

Impacts sur le matériel roulant ferroviaire

Les fortes chaleurs peuvent provoquer la surchauffe des composants électriques embarqués dans le matériel roulant, ce qui peut notamment causer des défaillances de la climatisation. Un tel impact est observé à la fois sur le parc de SNCF Voyageurs et celui de la RATP. Par ailleurs, la climatisation du matériel roulant est dimensionnée pour fonctionner de manière réduite au-delà d'une certaine température.

En dehors de la climatisation, d'autres fonctionnalités peuvent aussi être touchées par la chaleur, avec une sensibilité variable selon le modèle de matériel roulant considéré. Le RER B est particulièrement touché par les variations brutales des températures mais pas nécessairement par des épisodes longs et réguliers de chaleurs caniculaires. Au contraire, aucune corrélation n'a été observée entre le nombre d'incidents relevés sur le RER A et les variations de température. Le matériel roulant tramway est, quant à lui, touché par les variations de température, en particulier sur les fonctions de freinage et de traction. La RATP note également un impact relatif des vagues de chaleur sur le métro, principalement limité aux modèles de métro pneumatique (dysfonctionnement des pneumatiques porteurs et des équipements électroniques dès qu'ils atteignent une température de 55 °C). Les modèles de métro pneumatique les plus récents sont ceux qui voient le plus la fiabilité de leurs équipements diminuer en période de fortes chaleurs. Cela peut s'expliquer par leur plus grand nombre de fonctionnalités, en particulier leur niveau d'automatisation croissant, qui, tout en améliorant la performance des lignes, peut avoir un impact négatif sur la fiabilité globale des systèmes en cas de vagues de chaleur.

En plus des impacts directement observés en période de fortes chaleurs, la RATP signale qu'il pourrait y avoir des impacts à plus long terme des vagues de chaleur sur le matériel roulant, notamment sur la durée de vie de certains sous-ensembles embarqués sur le matériel roulant. Ces phénomènes de dégradation accélérée concerneraient en particulier les équipements électroniques de puissance, qui sont généralement conçus pour fonctionner sous une température ambiante de 40 °C maximum (qui est atteinte lors des pics de chaleur) et les équipements électropneumatiques ou hydrauliques. Les études de fiabilité à venir par la RATP permettront de confirmer ou non cette possibilité. À ce jour, la RATP n'a pas détecté de précurseurs nous permettant d'établir ces vieillissements dus aux fortes chaleurs.

Impacts sur les voyageurs

Les pannes ou l'absence de climatisation peuvent conduire à l'insatisfaction des voyageurs. SNCF Voyageurs constate d'ailleurs que les mots-clés « chaleur » et

« canicule » sont ceux qui reviennent le plus souvent dans les commentaires des voyageurs sur la période estivale. Les commentaires des voyageurs sur les malaises liés à la chaleur dans les trains restent marginaux (80 commentaires sur 5 000). Cependant, l'activité Intercités (dont les temps de trajets sont les plus longs) note une augmentation du nombre de malaises voyageurs en période de canicule.

Les mesures de satisfaction client de l'activité TGV montrent également une hausse du nombre de voyageurs insatisfaits de la température à bord en été, principalement en cas de voyage dans une rame sujette à une avarie matérielle. Cependant, le pic mesuré en 2022 reste modéré, avec seulement 5% de clients insatisfaits. Cela est cependant peut-être à nuancer par le nombre de répondants aux enquêtes de satisfaction client.

Impacts sur les bus

L'un des impacts notables des vagues de chaleur sur les bus est l'augmentation de la température, d'autant plus que tous les bus ne sont pas pourvus de climatisation. Par exemple, moins d'un quart des bus du parc RATP sont équipés de climatisation. En 2019, des températures suffocantes dans les bus, estimées à 55 °C, ont conduit à l'exercice du droit de retrait de 64 machinistes (conducteurs de bus) et au malaise de 21 machinistes sur le réseau RATP. La situation semble s'être améliorée en 2022, puisque aucun droit de retrait n'a été exercé, et seulement 6 malaises de machinistes ont été relevés. Ceci s'explique d'une part par le renouvellement du parc de bus depuis 2019, qui a permis d'améliorer le confort machiniste et les équipements de climatisation embarquée. D'autre part, le résultat peut être nuancé par le fait que le trafic n'est pas revenu à la normale depuis la crise Covid, le trafic sur les mois de juillet et août 2022 ne correspondant qu'à 72% du trafic sur les mois de juillet et août 2019.

De plus, sur l'ensemble de l'été 2022, de juin à septembre plus d'un million de kilomètres commerciaux contractualisés n'ont pas pu être parcourus. Cela correspond à une baisse de 1,8% de l'offre de référence.

● *Impacts observés sur les routes*

Dommmages sur l'infrastructure routière

Le CEREMA a détaillé dans son retour d'expérience sur la canicule de 2019 les différents impacts que les fortes chaleurs peuvent avoir sur les routes. Des ornières peuvent se former à cause de la déformation de la structure routière ou de la chaussée (aussi appelée « fluage »). Lorsque la température de surface de la chaussée est trop importante, le bitume peut aussi devenir visqueux, voire se déplacer au sein des matériaux sous la pression du trafic. Ce phénomène, appelé « ressuage », se traduit par des taches brillantes et glissantes sur la chaussée, qui constituent un risque pour les automobilistes en raison de la perte d'adhérence occasionnée. Enfin, les dalles qui constituent la chaussée peuvent se dilater et entrer en confrontation les unes avec les autres, générant des bourrelets transversaux. En plus de l'impact direct sur la circulation, ce phénomène occasionne

également des dégâts dans la structure routière, qui peuvent causer la destruction locale de la chaussée à plus long terme. Enfin, il doit être noté que ce sont surtout les variations de température importantes qui ont une conséquence néfaste sur les chaussées. Ainsi, les périodes de canicule impliquant à la fois de fortes chaleurs de jour et de nuit ne constituent pas le risque thermique le plus important pour les chaussées.

Des dégâts ponctuels avaient été relevés lors des vagues de chaleur de 2019 d'après le rapport du CEREMA, à la fois sur le réseau routier national (déformations ponctuelles et fissures), sur les réseaux départementaux (ressuage, fissures et bourrelets relevés dans deux départements) et sur certains réseaux urbains (bourrelets massifs apparus devant les giratoires et les arrêts de bus). En 2022, les directions interdépartementales des routes (DIR) n'ont pas fait remonter de dégâts particuliers suite aux fortes chaleurs ou aux périodes de canicule. Concernant les réseaux départementaux, quelques remontées ponctuelles de phénomènes liés aux vagues de chaleur de 2022 ont été faites au CEREMA.

Un autre impact des vagues de chaleur est la surchauffe des composants électroniques de certains éléments faisant partie de l'infrastructure routière, en particulier les panneaux à messages variables (PMV) ou les caméras. Le rapport du Conseil général à l'environnement et au développement durable (CGEDD) sur le retour d'expérience sur la canicule de 2019 mentionnait notamment la mise en veille automatique de PMV au-delà d'une certaine température. Aucune remontée notable n'a été effectuée au niveau national sur ce sujet depuis 2019.

Incendies

Les vagues de chaleur peuvent aggraver une sécheresse déjà en cours et ainsi favoriser les incendies. Durant les fortes chaleurs de l'été 2019, les incendies en période de canicule et sécheresse ont constitué la cause principale de coupure des routes. En 2022, les incendies ont également provoqué des interruptions de trafic. Une mesure particulièrement importante qui peut être citée est la coupure d'une portion de l'autoroute A 63 du mercredi 10 août au vendredi 12 août 20 h 00 du fait de la proximité d'un incendie. L'axe Bordeaux-Bayonne (et Espagne) a donc été coupé, faisant l'objet de déviations. Aux mêmes dates, les incendies en Gironde et dans les Landes ont également occasionné des coupures et restrictions de trafic sur les réseaux locaux (13 routes départementales coupées en Gironde, 6 routes départementales coupées dans les Landes et 6 routes départementales avec des restrictions poids lourds dans les Landes).

Ouvrages d'art

L'effet du changement climatique sur les ouvrages d'art a été détaillé par le CEREMA dans une note d'information en 2021. Les impacts principaux de l'augmentation de la température sur les ouvrages d'art étant la dilatation de l'acier et du béton constituant les ouvrages d'art et la dilatation des joints de chaussées. Mais les risques demeurent limités, d'après le CEREMA, et sont maîtrisables par la surveillance et l'adaptation de certains équipements (appareils d'appui, joints

de chaussée). En France, aucun désordre récent lié à une augmentation des températures du fait du changement climatique n'a été relevé sur les ouvrages d'art routiers.

● *Impacts observés sur les infrastructures portuaires*

Le rapport du CGEDD sur le retour d'expérience de la canicule de 2019 a mis en évidence quelques impacts de celle-ci sur les ports, à savoir l'accélération de l'apparition de fissures sur des rails de grue, sur des structures de bâtiments et sur la voirie. Cependant, depuis 2019, les ports n'ont fait aucune remontée particulière relative à l'impact des vagues de chaleur sur leurs infrastructures.

Étant donné le peu d'impacts observés, un enjeu est donc la prévision des impacts futurs des fortes chaleurs sur les ports. En effet, les fortes chaleurs induisent plusieurs risques sur les ports, pouvant affecter à la fois les infrastructures physiques et le fonctionnement de l'activité portuaire. Par exemple, dans l'étude de vulnérabilité menée en 2018 par le CEREMA sur le Grand Port maritime de Bordeaux, l'impact sanitaire et économique des canicules avait été identifié comme le troisième risque le plus important derrière les dégradations dues aux submersions et inondations et les changements induits par la hausse du niveau marin. Plusieurs risques liés aux canicules ont été identifiés : un inconfort et des risques sanitaires au travail pour les salariés, des risques de feux de forêt, un dysfonctionnement possible des systèmes électriques/électroniques des rails desservant le port, un risque d'interruption des circulations terrestres desservant le port, une dégradation de certains stocks, une usure plus rapide des maçonneries, ainsi qu'un risque de modification des profondeurs d'eau dans le chenal. Il convient de noter que ces phénomènes ne sont pas spécifiques au port de Bordeaux. Les autres ports pourraient être sujets à des risques similaires, avec cependant quelques variations possibles en fonction de leur localisation géographique. Des précisions sur les risques encourus par les différents ports français à cause du réchauffement climatique pourront être apportées grâce aux études de vulnérabilité qui sont en cours dans de nombreux grands ports maritimes.

● *Impacts observés sur le réseau des voies navigables*

Les vagues de chaleur, associées à la baisse des débits qu'elles génèrent, provoquent une augmentation de la température de l'eau. Celle-ci peut avoir des conséquences négatives sur l'activité de gestion de l'eau par le gestionnaire du réseau de voies navigables. En effet, le seuil de 25 °C constitue la limite maximale pour certains usages (alimentation en eau potable notamment, nécessitant des dérogations préfectorales en cas de dépassement). De plus, pour une telle température, la teneur en oxygène de l'eau diminue, ce qui peut engendrer une mortalité accrue de la faune piscicole si le taux d'oxygène dissous dans l'eau diminue en dessous de 6 mg/L. Enfin, l'augmentation de la température de l'eau entraîne également des pollutions et peut favoriser le développement des cyanobactéries et des espèces invasives. À titre d'exemple, une forte augmentation des cyanobactéries présentes sur le réseau de Voies navigables de France (VNF) a été

observée en 2022. Pour VNF, ces impacts ne sont pas anodins, car la gestion de l'eau de son réseau joue un rôle central pour son activité. En effet, VNF est le deuxième plus grand distributeur d'eau en France.

L'augmentation de la température extérieure a également un impact direct sur les conditions de navigation, qui peuvent être rendues plus pénibles, en particulier dans les canaux où les systèmes de voûtes arborées disparaissent. Les ouvrages peuvent également présenter un risque de dysfonctionnement, en cas de surchauffe des automates ou systèmes informatiques permettant de les piloter à distance, et qui ne sont pas toujours installés dans des locaux techniques climatisés.

Les vagues de chaleur pouvant aggraver les sécheresses, la diminution de la ressource en eau et la régulation fine de celle-ci peuvent avoir d'autres impacts sur le réseau de Voies navigables de France. Les périodes de restriction ou d'arrêt de la navigation peuvent devenir plus fréquentes si la ressource en eau devient inférieure aux besoins, dans un contexte de partage de la ressource pour divers usages. Plus largement, la diminution des niveaux d'eau rend plus difficile la gestion hydraulique du réseau des voies navigables, ce qui peut affecter de nombreuses activités : distribution d'eau potable, irrigation, activités industrielles, activités de loisir... Pour les canaux qui nécessitent des prélèvements en rivière respectant les débits réservés, les autorisations de prélèvements diminuent et les barrages réservoirs peinent à assurer le relais. Les rivières, dont les niveaux d'eau sont tenus par les barrages de navigation, sont moins sensibles que les canaux mais doivent assurer le maintien de débits minimums. Les sécheresses prolongées peuvent également fragiliser les digues par un phénomène de vieillissement prématuré des matériaux qui les constituent.

Enfin, même en cas de restriction et d'arrêt de la navigation, les activités de maintenance et de gestion hydraulique du réseau mobilisent des agents de VNF dans des conditions de travail difficiles pendant les vagues de chaleur.

Impact des vagues de chaleur sur le transport aérien

Constance Anelli,

Direction générale de l'aviation civile (DGAC)

- *Domaine transport aérien*

L'ensemble des acteurs du secteur aérien (compagnies aériennes, constructeurs aéronautiques, exploitants aéroportuaires, service de la navigation aérienne, etc.) est concerné directement ou indirectement par les vagues de chaleur. Dans un contexte de changement climatique qui intensifie ces vagues et les rend plus fréquentes, identifier les vulnérabilités de chaque acteur et les interconnexions entre elles est une étape fondamentale pour la résilience du secteur.



Figure C 41 : Vue aérienne d'un seuil de piste.

Source : © Richard METZGER, DGAC/STAC.

Le transport aérien fait partie des modes de transports inclus dans les plans nationaux d'adaptation au changement climatique (PNACC), dont une révision est prévue avant le 1^{er} juillet 2024.

La DGAC (direction générale de l'aviation civile) est impliquée dans les PNACC depuis leur création. Dans ce cadre, le STAC (service technique de l'aviation civile) a développé l'outil VULCLIM¹ pour évaluer les vulnérabilités des aéroports face au changement climatique.

1. Demande d'accès à l'outil VULCLIM du STAC : <https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/fr/outil-devaluation-vulnerabilite-au-changement-climatique>

En 2022, des ateliers et séminaires ont été organisés pour les aéroports, avec l'Union des aéroports français et francophones associés (UAF&FA) et l'association PROAVIA, sur le sujet de l'adaptation face au changement climatique. À ces occasions, Météo-France a fait un point sur les évolutions météorologiques à prévoir et certaines plateformes ont présenté leurs retours d'expérience sur la gestion de phénomènes extrêmes.

Par ailleurs, le STAC est impliqué dans des groupes de travail internationaux traitant de cette problématique, tels que le Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP).

Enfin, la DSAC (direction de la sécurité de l'aviation civile) a rédigé une information sécurité dont l'objectif est d'appeler l'attention des pilotes sur les menaces de l'exploitation des aéronefs par forte chaleur en leur fournissant une liste de recommandations².

Le tableau des impacts potentiels ou avérés pour le transport aérien est dressé ci-après par thématique.

Performances avions



Figure C 42 : Airbus A319 au décollage.

Source : © Richard METZGER, DGAC/STAC.

Lors des vagues de chaleur, les performances des avions sont dégradées. Cela peut avoir des conséquences sur les distances de décollage et d'atterrissage, ainsi que sur les capacités en montée et lors des remises de gaz.

Ces conséquences physiques, qui sont plus importantes sur des plateformes situées en altitude, peuvent avoir des répercussions importantes sur l'exploitation des aéroports et des compagnies aériennes.

2. Info Sécurité n° 2022/03 Maîtrise des risques associés aux conditions météorologiques de forte chaleur : <https://www.ecologie.gouv.fr/info-securite-dgac>

En effet, il est possible que :

- des limitations d'emport de fret ou passager soient nécessaires ;
- sans allongement de piste ou modification des obstacles, certains types d'aéronefs ne puissent plus être exploités sur des plateformes ;
- les cadences au décollage de certains aéroports soient diminuées ;
- des procédures, reposant notamment sur des contraintes d'atteinte de niveaux de vol à des points précis, nécessitent une vigilance particulière, les profils de vols pouvant être modifiés.

Les évolutions techniques sur la performance des moteurs et sur la masse des matériaux utilisés par les constructeurs pourraient néanmoins limiter ces conséquences.

Par ailleurs, chaque type avion a une plage de températures pour lequel il est certifié. Il est possible que certains types ne puissent plus opérer ponctuellement pendant des pics de températures trop élevées, notamment sur des terrains en altitude.

Le cas de l'aéroport de Phoenix en 2017 illustre le cas extrême de ces impacts. En effet, une cinquantaine de vols ont été annulés à cause des températures avoisinant les 120 °F (≈ 49 °C).

En France, des compagnies aériennes sont déjà confrontées à des limitations d'emport sur des terrains tels que des îles grecques ou en Corse durant les vagues de chaleur. À terme, cela pourrait devenir plus fréquent, et d'autres terrains pourraient devenir limitatifs.

Chaussées aéroportuaires

Une augmentation de la fréquence et de l'intensité des journées chaudes peut induire un endommagement accéléré des chaussées aéronautiques impliquant un risque de diminution des durées de vie et d'augmentation de la fréquence d'entretien. En effet, les températures dans le corps de chaussée ont un impact direct sur la rigidité des matériaux bitumineux et l'augmentation des températures accroît par conséquent les risques de formation d'ornières, tandis que les gradients thermiques dans les dalles béton ont une incidence directe sur le comportement des chaussées rigides.

Par ailleurs, les chaussées, tout comme les bâtiments, pourraient être détériorées (fissures longitudinales ou déformations) par le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux faisant suite à une période de sécheresse. Ce phénomène est d'autant plus possible si le drainage n'est pas bon.



Ces événements peuvent avoir des conséquences directes sur l'exploitation des plateformes.

L'arrêt temporaire du trafic survenu en août 2022 à l'aéroport de Luton à Londres, lorsque la hausse des températures a provoqué le soulèvement d'une petite section de l'asphalte, illustre ce type d'impact. À titre d'exemple sans conséquence sur l'exploitation, le bitume de l'aire de stationnement d'un aéroport du sud de la France a souffert de déformations modérées en 2022 malgré un revêtement neuf (travaux achevés en 2020).

Figure C 43 : Dégradation de chaussée.

Source : © Richard METZGER, DGAC/STAC.

Une étude est en cours au sein du STAC pour évaluer les effets du réchauffement climatique sur la portance des chaussées aéronautiques et leur résistance en fatigue, à l'aide du suivi des températures dans le corps.

Cette étude s'appuie sur les données de la planche instrumentée du STAC construite en 2009³ qui est équipée de capteurs permettant d'assurer, depuis la fin de la construction, un suivi en continu des températures dans la chaussée pour l'ensemble des infrastructures aéronautiques qui la composent (chaussées souples et rigides).

Bâtiments et installations

Les vagues de chaleur et l'évolution de celles-ci dans le contexte du changement climatique ont pour conséquence une augmentation de la demande en énergie pour refroidir les bâtiments (besoins plus importants et plus fréquents). L'assurance de la disponibilité de celle-ci est nécessaire pour maintenir une exploitation nominale.

3. <https://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/fr/chaussees-aeronautiques/recherche-developpement/planches-dessais>



Figure C 44 : Aéroport passagers.

Source : © Richard METZGER, DGAC/STAC.



Figure C 45 : Installations avion en escale.

Source : © Richard METZGER, DGAC/STAC.

En effet, accueillant du public (passagers, agents aéroportuaires), les aéroports et passerelles doivent être maintenues à une température correcte. C'est également le cas dans les tours de contrôle (contrôleurs aériens) presque entièrement vitrées, ainsi que dans les avions sur l'aire de trafic (passagers, personnels navigants) dont la climatisation repose sur l'équipement des escales en groupes de conditionnement d'air. De plus, certains locaux techniques de la navigation aérienne contiennent du matériel (serveurs informatiques) qui a besoin d'être refroidi pour fonctionner normalement.

Pour s'adapter à cette demande énergétique croissante, des projets tels que des aéroports bioclimatiques voient le jour, comme sur l'aéroport de Roland-Garros de l'île de La Réunion. Grâce à la ventilation naturelle dans l'aéroport, les besoins de climatisation se limiteront aux zones fermées recevant la plus forte densité de public. D'autres méthodes comme les stores et les ombrages extérieurs peuvent également être utilisés pour ne pas accentuer la dépendance vis-à-vis de la climatisation. La désartificialisation et la végétalisation des sols des zones publiques peuvent également atténuer l'effet îlot de chaleur.

Enfin, les vagues de chaleur pourraient dégrader les performances de certaines installations électriques aéroportuaires dont le fonctionnement est essentiel pour l'exploitation (passerelles, tracteurs, balisage lumineux...).

Personnels

Certains agents, notamment les fonctions liées à l'escale de l'avion sur l'aire de trafic, sont directement exposés aux vagues de chaleur. Outre une baisse de performance, la pénibilité du travail dans ces conditions, en particulier aux heures les plus chaudes de la journée, pourrait induire un taux d'absentéisme important qui limitera en conséquence l'exploitation.



Figure C 46 : Agent d'escale en fonction.

Source : © Richard MetzgerR, DGAC/STAC.

Des rotations d'équipes plus fréquentes ou une réduction des efforts physiques par de l'assistance mécanique pourraient par exemple limiter l'exposition aux chaleurs et donc contenir cet impact en diminuant les risques sanitaires des travailleurs exposés

Demandes passagers

Dans un contexte de changement climatique, les vagues de chaleur pourraient à terme entraîner une modification durable des destinations touristiques et donc des lignes aériennes et flux aériens.

Environnement

La sécheresse induite par les vagues de chaleur sur une longue durée pourrait augmenter le risque de feux de forêts. Outre le risque d'incendie sur des plateformes situées en bordure de massifs forestiers, cela pourrait avoir des répercussions sur l'exploitation.



En effet :

- les fumées, réduisant la visibilité, peuvent induire des perturbations de trafic ;
- certains aéroports peuvent devenir des acteurs importants dans la gestion de crise de la région, devant adapter leur exploitation pour accueillir les aéronefs de surveillance et de lutte d'incendies.

Figure C 47 : Canadair en vol.

Source : © Sylvie ROLLAND, DGAC/STAC.

Par exemple, les incendies en Gironde en juillet 2022 ont conduit la navigation aérienne à mettre en place plusieurs zones interdites temporaires (ZIT) interdisant l'accès dans les espaces définis à tout aéronef sauf ceux assurant les missions d'assistance, de sécurité, de sauvetage et d'extinction d'incendie. Pendant plusieurs jours, les atterrissages et les décollages étaient également interdits sur un terrain, sauf pour les aéronefs autorisés par le directeur des vols.

De plus, durant ces vagues de chaleur :

- l'impact sonore et les émissions de CO₂ sont plus importants en raison d'une plus grande poussée pour le décollage de l'avion dans un air moins dense ;
- l'apparition des mirages chauds sur les chaussées pourrait altérer la visibilité, et donc la fluidité et la sécurité du déroulement des manœuvres ;
- la formation d'orages peut être plus fréquente sous certaines conditions, ayant pour conséquence des retards de vols.

Par ailleurs, dans les Alpes-Maritimes, les restrictions préfectorales de consommation d'eau, dont la fréquence et la durée d'activation sont de plus en plus importantes, ont impacté l'aéroport de Nice pour ses espaces verts et pourraient à terme interroger sur son système de climatisation qui repose sur cette ressource.

Enfin, dans un contexte de changement climatique, les modifications liées à la température pourraient induire à terme des changements dans la présence aviaire (types d'oiseaux, aires de répartition, périodes de migration) et donc dans la gestion du risque animalier sur les plateformes.

Impacts des vagues de chaleur sur la santé

Les canicules en France : impacts actuels et futurs sur la santé, et coûts associés

**Karine Laaidi, Mathilde Pascal, Robin Lagarrigue,
Lucie Adélaïde, Guillaume Boulanger, Sébastien Denys,**
Santé publique France

Introduction

Le dernier rapport de l'Organisation météorologique mondiale sur l'état du climat en 2019 (WMO/OMM) montre que les signes de changement climatique et de ses impacts ont augmenté sur la période 2015-2019, qui est la période de 5 ans la plus chaude jamais enregistrée. La température moyenne du globe a augmenté de 1,1 °C depuis l'ère préindustrielle, et de 0,2 °C par rapport à la période 2011-2015 (IPCC AR6 WGI et World Meteorological Organization, 2022). Par ailleurs, les 8 dernières années, 2022 inclus, sont en voie d'être les plus chaudes jamais enregistrées selon un rapport provisoire de l'OMM, et le réchauffement se poursuit¹. Les récents rapports du GIEC mettent en avant des atteintes aux écosystèmes marins et terrestres plus précoces et plus importants qu'anticipés, une réduction des ressources en eau et en nourriture, des impacts sur la santé (mortalité, maladies émergentes, impact de la chaleur et de la pollution de l'air, etc.), des événements extrêmes qui dépassent les capacités de résilience et d'adaptation de plusieurs systèmes naturels et humains. Ces effets sont irréversibles, même dans l'hypothèse d'une limitation de la hausse des températures à 1,5 °C comme le prévoit l'accord de Paris. « Les éléments scientifiques sont sans équivoque : le changement climatique menace le bien-être de l'humanité et la santé de la planète. Tout retard dans l'action mondiale concertée nous ferait perdre un temps précieux et limité pour instaurer un avenir viable »².

Le programme des agences de santé publique s'intéresse largement à cette thématique, principalement sur les événements climatiques extrêmes, les maladies vectorielles, l'accès à l'alimentation, la sécheresse ou la pollution de l'air, mais en pratique, la santé est très peu présente dans les projets d'adaptation et quasiment absente des politiques d'atténuation.

1. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>

2. <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/changement-climatique-une-menace-pour-le-bien-%C3%AAtre-de-l%E2%80%99humanit%C3%A9-et-la>.

Le tournant de 2003

La canicule d'août 2003, qui a largement touché l'Europe et en particulier la France, a certainement constitué un tournant dans la prise en compte de la santé dans les plans d'adaptation au changement climatique. En août 2003, pendant 15 jours les températures ont été de 10 °C supérieures aux températures normales pour cette période de l'année sur une grande partie de la France. Les températures maximales ont dépassé 35 °C sur une grande partie du territoire, et même 40 °C dans 15% des stations météorologiques, y compris en Bretagne. Cette canicule a le bilan sanitaire le plus important jamais observé en France, estimé à près de 15 000 décès. Quatre-vingts pour cent des décès se sont concentrés sur 4 jours, du 11 au 14 août 2003. Depuis 1947, aucune canicule n'avait égalé la durée et l'intensité de celle de 2003. Les personnes de 75 ans et plus ont été les plus touchées (60% de surmortalité) mais les 45-64 ans ont également contribué à cette surmortalité (30% de surmortalité). Si quasiment toutes les régions métropolitaines ont été touchées, l'Île-de-France et la région Centre ont été les plus impactées, la première ayant contribué pour 33% à la surmortalité totale (Hémon *et al.*, 2003a).

Dans son rapport publié dès septembre 2003 (Hémon *et al.*, 2003b), l'INSERM a mis en évidence les principales causes de mortalité pendant cette canicule exceptionnelle. Presque toutes ont augmenté, au premier rang desquelles les causes directement attribuables à la chaleur que sont les hyperthermies et les déshydratations, suivies par les maladies de l'appareil génito-urinaire et respiratoires. Une étude cas témoin réalisée auprès des personnes de 65 ans et plus a mis en évidence différents facteurs de risque au niveau individuel et environnemental (Vandentorren *et al.*, 2006). Ainsi, la perte d'autonomie était le principal facteur de risque (avec un risque de décès multiplié par 4 à presque 10 selon le degré d'autonomie), suivi par le fait de dormir dans une chambre située sous les toits (risque de décès multiplié par 4), pièce généralement la plus chaude d'un bâtiment ; le fait d'avoir une pathologie préexistante (cardiovasculaire, respiratoire ou psychiatrique) multipliait le risque de décès par 3,5 à 5. Inversement, le fait de vivre dans un logement récent ou ancien mais bien isolé diminuait le risque de décès, de même que les comportements adaptatifs (se vêtir légèrement, se rafraîchir). Cette étude a été complétée par la prise en compte de données satellitaires afin d'estimer le risque lié à la chaleur environnementale, et en particulier aux micro-îlots de chaleurs urbains, de nuit et de jour (Laaidi *et al.*, 2012b). Elle a montré que le fait de vivre dans un quartier plus chaud d'un demi-degré la nuit doublait le risque de décès si cette chaleur persistait pendant au moins une semaine.

La sévérité de la canicule de 2003, son impact en termes de mortalité, l'absence d'un cadre préétabli pour la gestion d'une telle crise³, ainsi que les études menées pour déterminer les personnes vulnérables et les facteurs de risques ont conduit à mettre en place un plan national de prévention et de gestion des risques liés aux

3. <https://www.assemblee-nationale.fr/12/rap-info/i1091-t1.asp>

canicules⁴ (PNC : plan national canicule), prévoyant notamment un système d’alerte canicule et santé (SACS). D’autres pays ayant souffert de la canicule d’août 2003 ont également mis en place des mesures de surveillance, d’alerte, de prévention et/ou de gestion à des degrés divers (World Health Organization, 2009).

Les impacts sanitaires en France depuis le plan canicule

● Mortalité

En France, les canicules sont les événements extrêmes avec l’impact le plus élevé en termes de mortalité, totalisant plus de 39 000 décès en excès observés pendant les canicules depuis 1970. Cet impact est en augmentation malgré les efforts de prévention et d’alerte : plus de 9 900 décès depuis la mise en place du plan canicule en 2004, 78 % de cet impact étant observé sur les années récentes (2015-2020)⁵.

Le tableau C3 résume les excès de mortalité sur différentes périodes depuis les années 1970 (Pascal *et al.*, 2021a).

Tableau C 3 : Tendances historiques de la surmortalité pendant les vagues de chaleur en France depuis 1970 (Pascal *et al.*, 2021a).

	Nombre de départements ayant eu au moins 1 canicule	Nombre de jours de vigilance x nb départements	Nombre d’années sans canicule	Nombre de départements avec au moins 1 canicule/an	Sévérité cumulée (°C)	Exposition cumulée (a)	Surmortalité moyenne pendant les canicules
1970–1979	50	515	5	0	1 273	943	6547
1980–1989	85	666	5	0	758	356	4113
1990–1999	76	681	2	0	717	511	3 111
2000–2009	96	2 130	1	0	5 991	3794	17 190
2003	96	1 267	-	-	5 114	3154	15 257
2010–2019	95	2 859	1	11	2 676	2027	6 407
2015–2019	95	2 252	0	11	2 103	1717	5 700

(a) L’exposition cumulée est définie comme la population exprimée en millions d’habitants multipliée par la part de la température exprimée en °C située au-dessus du seuil.

La première canicule de grande ampleur après la mise en place du PNC a eu lieu en juillet 2006, avec des records de chaleur battus à certains endroits malgré une intensité globalement moindre par rapport à 2003, et des durées d’un mois dans certains départements du Sud-Est. Sur la période de canicule commune à l’ensemble des départements touchés (11-28 juillet), un excès de 1 533 décès a été estimé (+ 6 %) (Le Tertre *et al.*, 2007). Cette canicule a été l’occasion de donner un premier élément d’évaluation du PNC, en comparant la mortalité observée à celle

4. <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/climat/fortes-chaieurs-canicule/documents/article/canicule-2004-mobilisation-generale.-editorial>

5. <https://geodes.santepubliquefrance.fr/#c=indicator&i=canicules.surmortalite&s=2021&t=a02&view=map1>

attendue selon un modèle de régression France entière fondé sur la période 1975-2003 (Fouillet *et al.*, 2008), soit avant la mise en place du plan. Le modèle prévoyait plus de 6 000 décès en excès, la réalité a été bien en dessous de cette estimation. Bien que ces chiffres bruts ne permettent pas de conclure quant aux raisons de cette différence, plusieurs hypothèses ont été avancées : mise en place du système d’alerte canicule et des mesures de prévention et de gestion du PNC, meilleure prise de conscience des risques liés aux fortes chaleurs depuis 2003, ainsi que les caractéristiques intrinsèques de la vague de chaleur.

Des travaux récents (Pascal *et al.*, 2022) portant sur l’évolution des risques de mortalité liés à la chaleur en France entre 1970 et 2015 ont par ailleurs mis en évidence :

- une diminution progressive de ce risque depuis les années 1980, probablement liée à l’amélioration de l’état de santé de la population et de sa prise en charge médicale ;
- une augmentation du risque de décès liés aux températures inhabituellement chaudes pour une année donnée par rapport aux années précédentes ;
- une augmentation de la fraction de la mortalité attribuable aux températures les plus chaudes (supérieures au percentile 90).

Les étés suivants ont connu des canicules moins longues et moins intenses, voire pas de canicule, et surtout moins étendues géographiquement, avec des impacts sanitaires modérés. Cependant, depuis 2015 les canicules se sont multipliées, elles ont touché des régions jusque-là épargnées comme la Bretagne, la Normandie ou les Hauts-de-France, ont parfois battu des records de chaleur et les premières vigilances rouges (niveau le plus élevé de la vigilance météorologique) ont été observées en 2019, puis 2020, et en 2022 avec la vigilance rouge la plus précoce mi-juin (figure C 48).

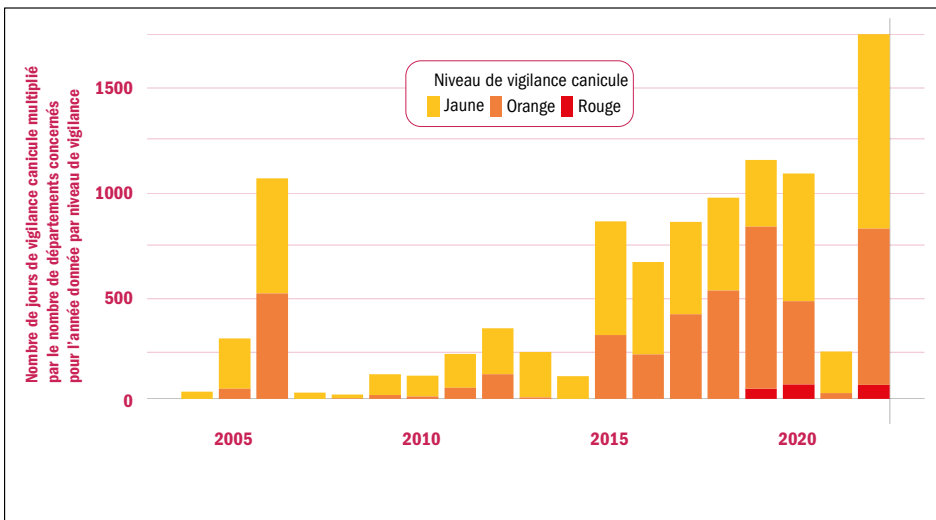


Figure C 48 : Les vigilances depuis la mise en place du plan canicule en 2004.

Sources : Météo-France et Santé publique France.

Sur les étés récents, la surmortalité pendant les canicules a varié de 200 à près de 3 000 décès en excès (tableau C 4)⁶.

L'impact le plus élevé a été observé en 2022 (Santé publique France, 2022), avec 2 816 décès en excès (+ 16,7%) lors des trois épisodes de canicule (14-22/06, 9-27/07 et 29/07-14/08) dans les départements concernés. La classe d'âge des plus de 75 ans a été la plus touchée (2 272 décès en excès ; + 20,2%) et l'excès de mortalité relatif observé dans les départements placés en vigilance rouge (+ 19,9%) a été plus important que celui des autres départements. Sur les mêmes périodes et zones, 894 décès liés à l'épidémie de Covid 19 ont été enregistrés. La Covid-19 a pu augmenter la vulnérabilité à la chaleur pour certaines personnes, et réciproquement. Sur toute la période de surveillance estivale (1^{er} juin-15 septembre), 10 420 décès en excès toutes causes (+ 6,1%) ont été estimés en France métropolitaine : une part de cet excès de mortalité estivale est vraisemblablement due à une exposition de la population à des températures élevées mais n'atteignant pas les seuils canicule. L'estimation de cette part attribuable fait l'objet de travaux d'étude par Santé publique France.

Tableau C 4 : La surmortalité pendant les canicules de 2015 à 2022.

Année	Surmortalité (nombre de décès en excès)
2021	239
2016	378
2017	474
2019	1 462
2018	1 641
2015	1 739
2020	1 924
2022	2 816

Source : Santé publique France.

● *Morbidité*

Les canicules s'accompagnent également d'une recrudescence des recours aux soins d'urgences. Ainsi, pendant les étés 2015 à 2021, plus de 120 000 passages aux urgences et plus de 25 000 consultations SOS Médecins ont été recensés dans SurSaUD⁷ pour la France métropolitaine, en ce qui concerne l'indicateur composite suivi dans le cadre de la gestion sanitaire des vagues de chaleur⁸ (iCanicule), qui rassemble les coups de chaleur ou hyperthermies, les déshydratations

6. <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/climat/fortes-chaleurs-canicule/donnees/#tabs>

7. SurSaUD[®] est un système de surveillance des urgences et des décès.

8. <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/risques-climatiques/article/la-gestion-sanitaire-des-vagues-de-chaleur>

et les hyponatrémies (Santé publique France, 2019). Ce recours aux soins d'urgences pour l'indicateur iCanicule est observé tout au long de l'été, y compris en dehors des périodes de vigilance jaune, orange ou rouge canicule : ainsi sur les années récentes, jusqu'à 85% des passages aux urgences, et jusqu'à 80% des consultations SOS Médecins ont eu lieu en dehors des périodes de vigilance canicule. Mais les pics de recours aux soins d'urgences pour iCanicule sont observés pendant les périodes où une large part de la population est concernée par une vigilance canicule.

En 2022, plus de 20 000 recours aux soins ont été observés durant toute la période de surveillance pour l'indicateur sanitaire suivi (iCanicule, regroupant hyperthermies, déshydratations et hyponatrémies). Ces recours aux soins ont été multipliés par deux aux urgences et par trois pour les consultations SOS Médecins durant les canicules, par rapport aux périodes hors canicules.

● *Données sur les travailleurs*

La surveillance par Santé publique France de l'influence des vagues de chaleur sur la santé des travailleurs (Iwatsubo *et al.*, 2020) reposait, jusqu'en 2017, sur deux types de recueils en lien avec l'inspection médicale du travail et la direction générale du travail (DGT) : un dispositif passif de signalement par les médecins du travail (depuis 2006) des incidents ou accidents de santé lié à la chaleur, et une remontée de fiches d'enquête de décès de travailleurs survenant sur le lieu du travail en lien possible avec la chaleur.

Du 1^{er} juin au 31 août 2015, 2016 et 2017, respectivement 33, 8 et 73 signalements d'événements sanitaires impliquant la chaleur chez des travailleurs ont ainsi été remontés, et en 2017 10 décès liés à la chaleur dont 7 pendant la canicule du 17 au 25 juin. La première partie de ce dispositif peu réactif et non exhaustif a été abandonnée en 2018.

Une étude pilote de surveillance épidémiologique a été mise en place en 2018 et 2019 sur les passages aux urgences en Île-de-France et les dossiers de régulation SAMU en Provence-Alpes-Côte d'Azur, en lien avec la chaleur et le travail. Si des augmentations ont pu être observées durant les périodes de canicule, un meilleur déploiement national et codage des circonstances des nouveaux relevés de passages aux urgences (RPU) et des systèmes d'information SAMU (SI-SAMU) restent nécessaires pour pouvoir poursuivre la surveillance de la morbidité chez les travailleurs.

Les données de décès ont quant à elle permis de remonter 8 décès en lien possible avec la chaleur en 2018, dont 4 pendant la canicule de fin juillet-début août, et 10 décès en 2019 dont 9 pendant les périodes de canicule. Ces décès se produisent le plus souvent chez des hommes, dès la trentaine, et chez des travailleurs en extérieur (BTP, milieu agricole...). Par ailleurs, la DGT a reçu 112 fiches d'accidents du travail mortels pendant l'été 2019. Les accidents du travail mortels en lien possible avec la chaleur représentent ainsi 9% de l'ensemble des accidents du travail mortels survenus pendant cette période.

En 2020, douze accidents du travail mortels en lien possible avec la chaleur ont été notifiés par l'inspection médicale du travail, dont cinq survenus durant les vagues de chaleur. Il n'y en a eu aucun en 2021 et sept en 2022⁹.

● *Mortalité dans les territoires ultramarins*

Le système d'alerte canicule et santé (SACS) a été élaboré en France métropolitaine, sur la base d'un indicateur biométéorologique double (moyenne sur 3 jours consécutifs des températures minimales et moyenne sur 3 jours consécutifs des températures maximales), associé à un seuil d'alerte minimal et maximal par département. Ce seuil local permet de tenir compte de l'adaptation des populations à la chaleur, et correspond à un potentiel doublement de la mortalité en l'absence de toute mesure de prévention et de gestion (Laaidi *et al.*, 2012a). Si la question se pose depuis plusieurs années d'une extension de ce système d'alerte aux territoires ultramarins, des priorités sanitaires locales plus prégnantes, en particulier infectieuses, de faibles variations des températures qui restent à un niveau élevé tout au long de l'année, et une supposée bonne adaptation des populations à la chaleur, n'ont pas conduit à cette extension. Cependant, plusieurs études ont montré que, quelle que soit la région du globe, un effet de la température peut être observé au-dessus d'une température de mortalité minimale, celle-ci se situant autour du percentile¹⁰ 60 de la distribution des températures en climat tropical (Gasparrini *et al.*, 2015).

Une étude a donc été menée dans les territoires ultramarins français (Guyane, Guadeloupe continentale, Martinique, La Réunion et Mayotte) entre 2000 et 2015, afin d'établir l'influence de la température sur la mortalité et par la suite de déterminer les besoins de prévention et d'adaptation à court et à moyen terme (Pascal *et al.*, 2021b). La relation température-mortalité a été modélisée, puis les résultats ont été combinés dans une méta-analyse (à l'exception de Mayotte, par manque de données disponibles). La forme générale de la relation température-mortalité et les ordres de grandeurs des risques relatifs (RR) calculés se sont avérés cohérents avec ceux observés dans d'autres zones du monde et ont confirmé l'influence de la température sur la mortalité et une augmentation rapide du risque de décès vers les températures les plus inhabituelles.

La méta-analyse a mis en évidence un risque relatif de décès cumulé sur 0-10 jours suivant une exposition à une température au percentile 99 de la distribution des températures : il était de 1,20 (intervalle de confiance à 95% [1,06 : 1,42], en référence au percentile 50). La prise en compte de l'humidité relative ne montre pas d'influence significative. Sur l'ensemble des zones et de la période d'étude, 3 380 décès [851 : 5 632] ont pu être attribués à des températures non optimales

9. <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/climat/fortes-chaleurs-canicule/donnees/#tabs>

10. Un percentile est un paramètre statistique qui détermine où la valeur mesurée se situe par rapport à l'ensemble des observations. Chaque percentile représente le centième de l'occurrence du paramètre mesuré dans l'ensemble des observations. Dans le cas du percentile 60, cela signifie que 60% des températures observées sont au-dessous de ce seuil.

(supérieures ou inférieures à la température de mortalité minimale), principalement chaudes, représentant 5% de la mortalité totale. Les températures extrêmes contribuaient à cette mortalité, avec 979 [531 : 1 359] décès attribuables à des températures dépassant le percentile 90 (Pascal *et al.*, 2022).

Le fardeau économique des effets sanitaires des vagues de chaleur

Bien que les canicules soient les événements climatiques extrêmes les plus importants en termes de mortalité, et que la morbidité associée soit également conséquente comme on a pu le voir avec les données de passages aux urgences ou de consultations SOS Médecins, ces événements sont souvent sous-représentés dans les analyses économiques des événements climatiques extrêmes. Santé publique France et le CNRS ont proposé une méthode pour estimer l'impact de la mortalité, du recours aux soins et de la perte de bien-être associés aux canicules en France (Adélaïde *et al.*, 2021 ; Adélaïde *et al.*, 2022). Pour le recours aux soins, l'approche prend en compte les coûts médicaux directs (passages aux urgences, consultations SOS Médecins, hospitalisations) et indirects (arrêts de travail). Le consentement à payer pour réduire le risque d'un passage aux urgences ou d'une hospitalisation est utilisé pour estimer les coûts des impacts intangibles (souffrance, peur...). Pour la mortalité, les valeurs recommandées pour l'évaluation des politiques publiques en France sont utilisées. Les estimations sont exprimées en euros constants 2017 (€2017).

Au total, l'étude estime que la mortalité pendant les canicules représente 143 milliards €2017 de coût pour l'ensemble de la période 1974-2020, avec un impact plus marqué pour les années marquées par un plus grand nombre de décès : 2003, 1976, 1983, 2006 et 2015-2020.

L'impact de la perte de bien-être, estimé uniquement pour les jours respectant les critères de la vigilance rouge pendant lesquels des modifications importantes d'activité sont nécessaires, représente 13 milliards €2017, dont 93% se concentrant sur les seules années 2003, 2019 et 2020.

Enfin, l'analyse sur le recours aux soins s'est concentrée sur la période 2015-2020 et sur un nombre limité de causes de recours. Les coûts estimés sont de 31 millions €2017 dont 80% associés à des hospitalisations.

Cette étude a permis de mieux objectiver l'impact économique de ces événements climatiques extrêmes et a souligné l'importance et l'urgence de mesures d'action permettant de renforcer l'adaptation aux canicules, dont la fréquence, la durée et la sévérité devraient s'accroître avec le réchauffement climatique.

Impacts prévisibles des canicules à moyen et long termes

Depuis 1947, aucune canicule n'a égalé la durée et l'intensité de celle de 2003. Dans un contexte de changement climatique, des événements aussi graves que

la canicule de 2003 se produiront de plus en plus fréquemment. Si les émissions de gaz à effet de serre, responsables de l'augmentation des températures, ne sont pas réduites, des canicules plus intenses et d'une durée cinq fois plus longue que celle de 2003 pourraient survenir en France.

Selon Météo-France¹¹, l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des vagues de chaleur est déjà visible. Ainsi sur les 43 qui ont été détectées depuis 1947, neuf ont eu lieu avant 1989 contre 33 entre 1989 et 2022, 25 d'entre elles, soit plus de la moitié, ont eu lieu après 2000 et il y en a eu 19 depuis 2010. Les projections climatiques réalisées sur la France métropolitaine indiquent une augmentation globale de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur au cours du XXI^e siècle : d'ici 2050 elles devraient être deux fois plus nombreuses que sur la période 1976-2005, et en fin de siècle elles pourraient être bien plus fréquentes qu'aujourd'hui mais aussi beaucoup plus sévères et plus longues. Elles pourraient aussi être plus précoces ou plus tardives qu'actuellement. Ces prévisions dépendront en partie des politiques de lutte contre le changement climatique.

L'impact du réchauffement climatique sur la santé est d'ores et déjà observable, ainsi que l'a montré une étude sur 43 pays au cours de la période 1991-2018 (Vicedo-Cabrera *et al.*, 2021) : 37 % de la mortalité liée à la chaleur peut être attribuée au changement climatique anthropogénique, l'augmentation de la mortalité est présente sur tous les continents, avec un fardeau variable au niveau géographique mais de l'ordre de douzaines à des centaines de morts par an dans de nombreux endroits. À Shanghai, une modélisation de la relation température-mortalité selon deux scénarios d'évolution du climat a prédit une augmentation de la mortalité de 48 ou 53 % selon le scénario, à l'horizon 2030-2059, et de 148 ou 254 % selon le scénario, à l'horizon 2070-2099 (Guo *et al.*, 2012). Une étude sur trois pays asiatiques (Japon, Corée et Chine) (He *et al.*, 2022) a mis en évidence un risque de mortalité plus élevé de 50 % lors des nuits chaudes, dont la fréquence devrait augmenter de 30 % et l'intensité de 50 % d'ici 2100. La fraction attribuable de la mortalité due à ces nuits chaudes serait de 3,7 % selon un scénario de contrôle strict des émissions de gaz à effet de serre, et de 5,8 % selon un scénario moyen de réduction.

En France, une étude sur 18 villes (Pascal *et al.*, 2022) a été réalisée sur la période 1970-2015 afin d'estimer l'évolution temporelle de la mortalité. Les résultats suggèrent une diminution des risques relatifs liés aux très fortes chaleurs (percentiles 99 et plus des températures), ce qui semble marquer une acclimatation à la chaleur (pouvant résulter d'une adaptation de la population, des améliorations socio-économiques et médicales et/ou d'une efficacité des mesures de prévention organisées à partir de 2004). Cependant, cette évolution à la baisse n'est pas observée pour des percentiles moins élevés, pour lesquels les risques relatifs augmentent régulièrement sur la période, sans rupture à partir de 2004. De plus, les risques liés aux températures inhabituellement chaudes pour une année

11. <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/climat/changement-climatique-des-canicules-deux-fois-plus-frequentes>

donnée par rapport aux années précédentes augmentent depuis les années 1970. Par ailleurs la fraction de la mortalité attribuable aux températures les plus chaudes (supérieures au percentile 90) augmente, passe de 0,11% [0,08 : 0,13] de la mortalité dans les années 1970 à 0,23% [0,21 : 0,24] dans les années 2010. Les fractions attribuables reflètent le croisement entre un niveau de risque et une fréquence d'exposition. Malgré une diminution des risques relatifs liés aux températures élevées, l'augmentation du nombre de jours chauds conduit ainsi à une augmentation de la fraction attribuable à la chaleur dans les années récentes et donc à une augmentation des impacts de la chaleur.

Que faire pour prévenir les impacts sanitaires des canicules ?

Au cours des presque 20 années qui ont suivi la mise en place du plan canicule, des éléments d'évaluation ont été mis en place régulièrement (Laaidi *et al.*, 2012a) afin d'améliorer la prévention et la gestion des risques :

1. Avant l'été : des enquêtes sur la gestion du risque canicule par les acteurs nationaux et locaux ont permis d'identifier les mesures prises, les difficultés ainsi que des pistes d'amélioration (Laaidi *et al.*, 2018 ; Laaidi *et al.*, 2019). Celles-ci concernent notamment :

- l'amélioration des capacités de thermorégulation individuelles, en favorisant la pratique d'activité physique adaptée ;
- l'identification et la protection des personnes vulnérables (registres municipaux, sans-abris) et des scolaires ;
- des actions sur les environnements pour réduire l'exposition (végétalisation, matériaux, volets, isolation : en ville, à l'école, dans les bâtiments accueillant du public...);
- la préparation de conduites à tenir en cas de canicule (modification des horaires de travail et des activités scolaires...);
- la formation de la population et des professionnels aux bons gestes à adopter.

2. Pendant les canicules : le plan de gestion des risques définit les mesures pour alerter, prendre soin des plus vulnérables, adapter les traitements médicamenteux si nécessaire, organiser l'offre de soins, diffuser les conseils de comportements (hydratation, diminution de l'activité physique, aération...), sensibiliser au risque pour tous (spots télé et radio). Une enquête auprès de la population française métropolitaine a été menée en 2015 sur les connaissances et pratiques pendant les fortes chaleurs (Laaidi *et al.*, 2019). Elle a montré que les adultes de plus de 18 ans avaient une bonne connaissance des gestes de prévention et suivaient bien les recommandations, mais que la perception de ses propres risques était faible, y compris chez les personnes âgées (2% des 18-64 ans se sentaient très à risque pendant une canicule, et seulement 4% des 65 ans et plus). Par ailleurs le recours aux registres municipaux pour se signaler ou demander de l'aide restait une pratique marginale alors que c'est un élément central de la prévention au niveau local, qu'il semble donc nécessaire de faire évoluer.

3. Après l'été : les retours d'expériences annuels entre les partenaires du plan et du système d'alerte permettent de les faire évoluer si besoin. Par ailleurs une étude qualitative a été réalisée en 2019 (Verrier *et al.*, 2022) afin d'évaluer les freins à l'adoption des gestes de prévention chez les adultes résidant dans des départements ayant été en vigilance canicule orange ou rouge. Les principaux freins identifiés étaient la perception du risque pour soi, les conditions de travail et la méconnaissance des dispositifs existants (cartographie de lieux frais, des points d'eau potable...). Ces résultats ont mis en exergue la nécessité de renforcer la communication sur les mesures existantes et d'étudier la faisabilité d'adapter les conditions de travail par voie réglementaire.

Conclusion

Les impacts sanitaires de la chaleur, pendant et en dehors des périodes de canicule, sont les plus importants de tous ceux associés à des événements climatiques extrêmes. Ils ont déjà augmenté ces dernières années et ce phénomène va s'accélérer à moyen et long terme avec l'augmentation des canicules en fréquence, durée, intensité et répartition spatiale, et avec l'extension temporelle des périodes chaudes (de mai à octobre).

Malgré un large panel de mesures de prévention et de gestion mis en place, les impacts restent importants et force est de constater que les mesures d'atténuation et d'adaptation sont insuffisantes et devront être élargies et améliorées afin de minimiser les impacts sanitaires du changement climatique, en particulier ceux dus aux vagues de chaleur.

Parmi ces mesures, une meilleure évaluation des impacts pendant les canicules permettrait de réagir plus rapidement et de façon plus ciblée. Ceci passe par une amélioration du circuit des données de mortalité, en particulier *via* la certification électronique des décès qui permet d'obtenir des données sous 24 heures (contre un mois actuellement avec les données INSEE).

Une fois l'alerte lancée, les mesures sont variées et intersectorielles : prévention et protection de la population, en particulier mise à l'abri des plus vulnérables, adaptation des conditions de travail, mesures renforcées de lutte contre les îlots de chaleur urbains (végétalisation, revêtements absorbant peu la chaleur, etc.). De manière plus large, en été il est important de mieux sensibiliser au risque, pour les personnes âgées, les malades chroniques, les jeunes enfants, les personnes sans abri, mais aussi les travailleurs en ambiance chaude, les sportifs, et plus largement toute la population lorsque la chaleur devient extrême et que chacun est susceptible d'être affecté.

Par ailleurs Santé publique France s'est engagée dans une démarche de plaidoyer afin de sensibiliser au risque et à ses impacts des partenaires hors du champ de la santé : d'une part les urbanistes et les architectes afin qu'ils contribuent à construire et rénover les bâtiments et les villes en prenant en compte le confort thermique des habitants, et d'autre part les employeurs afin qu'ils améliorent la protection de leurs employés contre la chaleur.

Enfin, il est nécessaire d'évaluer les mesures prises en termes de réduction de l'impact sanitaire, afin de les adapter et améliorer si besoin et ainsi réduire davantage les impacts sanitaires des canicules, et les coûts économiques et sociaux associés.

Encadré 3

Mission de Santé publique France

Les impacts sanitaires du changement climatique sont une des priorités de la programmation de Santé publique France depuis plusieurs années. Les travaux de l'agence dans ce domaine s'articulent autour de grands axes :

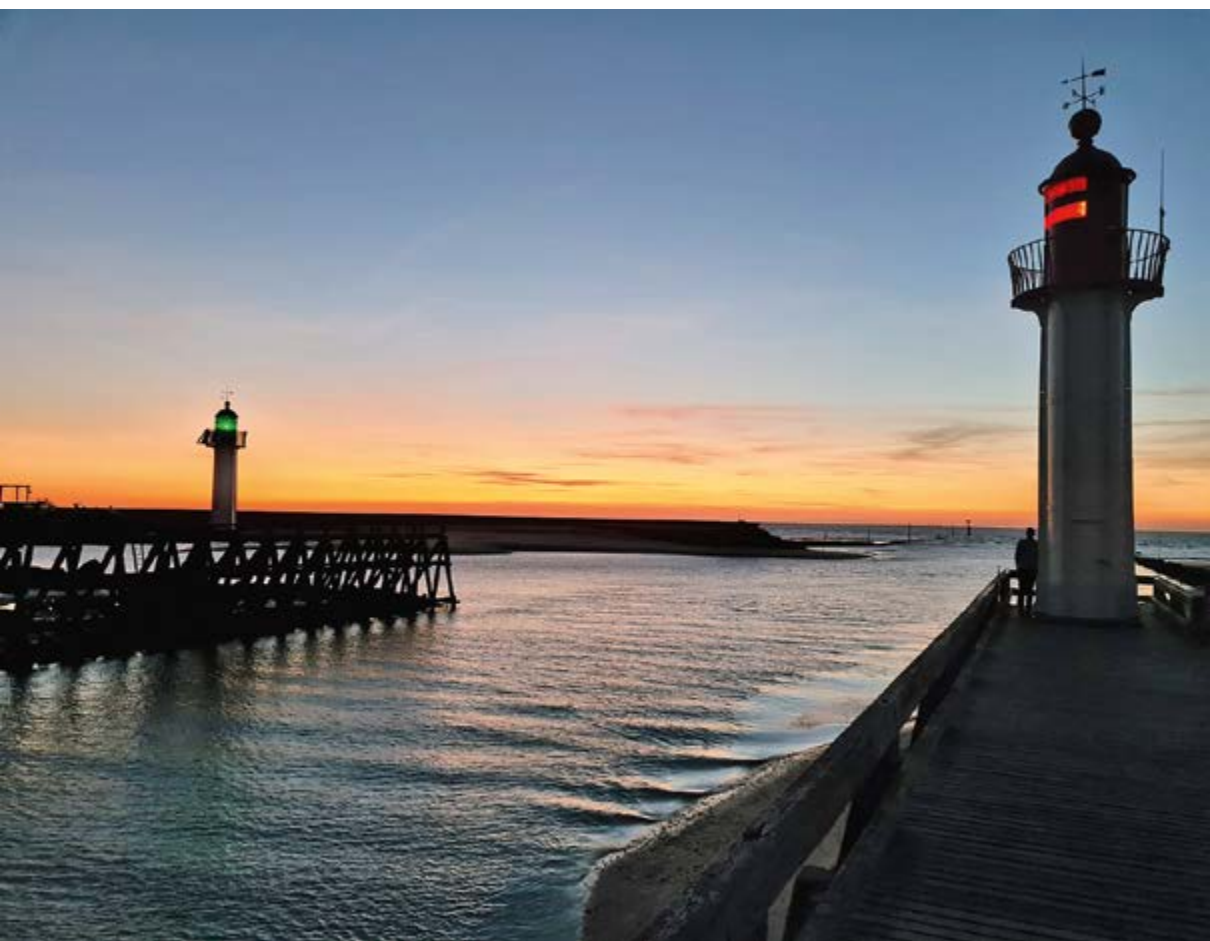
- promouvoir une meilleure prise en compte des liens entre climat et santé, *via* l'organisation de rencontres scientifiques, de partenariat (Météo-France, ADEME, INSERM notamment), de collaboration entre agences de santé publiques ;
- analyser les connaissances et produire des outils et des indicateurs pour mettre en évidence l'impact du changement climatique sur la santé en France, mais également l'impact d'interventions sur des déterminants favorables à la santé et au climat (par exemple, les mobilités douces, la nature en ville) ;
- soutenir l'adaptation à la chaleur, *via* un corpus d'études épidémiologiques, et la promotion de l'adaptation des populations à la chaleur à travers la définition et la mise en œuvre d'une stratégie de plaidoyer ;
- optimiser et assurer la surveillance sanitaire dans le cadre du plan national de gestion des vagues de chaleur ;
- répondre aux urgences sanitaires en lien avec le climat (événements extrêmes, épidémies infectieuses...).

Ces travaux font l'objet de plusieurs publications sur le site de l'agence (Changement climatique – Santé publique France (santepubliquefrance.fr)). L'agence est également active au niveau international *via* l'Association internationale des agences de santé publique (IANPHI), qui s'est dotée d'un comité permanent changement climatique et santé, et d'une feuille de route dont les principales conclusions ont été récemment soutenues par le G7.



Chapitre D

Politiques d'adaptation aux vagues de chaleur



Ce chapitre montre quelques exemples des politiques publiques qui prennent en compte les vagues de chaleur et leurs impacts. Ainsi le premier article décrit la partie de la réglementation environnementale, la RE2020, en vigueur pour les constructions à partir du 1^{er} juillet 2022, le second article parle de l'extension aux vagues de chaleur du dispositif de vigilance météorologique. Enfin, le troisième article décrit le plan vague de chaleur qui pourra compléter le plan canicule sans se limiter à l'impact sanitaire des vagues de chaleur.

La RE2020

Les récentes adaptations de la réglementation technique de la construction face aux vagues de chaleur

Quentin Deslot, Sylvain Pradelle, Amandine Vernier,

Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature (DGALN)

Introduction

Nous passons plus de 80% de notre temps dans des lieux clos, et en grande partie à l'intérieur des bâtiments. Nous y travaillons, nous y mangeons, nous y dormons, et nous y faisons tant d'autres activités essentielles à notre vie. Les articles précédents du chapitre A ont illustré que les vagues de chaleur seront de plus en plus fréquentes et de plus en plus intenses à l'avenir. Il est donc essentiel que nos environnements intérieurs s'adaptent afin de nous offrir des conditions de vie toujours aussi satisfaisantes alors que le climat évolue. De nombreux acteurs se mobilisent aujourd'hui afin de construire des bâtiments mieux conçus et rénover les bâtiments existants. Il s'agit d'aller vers un meilleur confort dans les bâtiments lors des vagues de chaleur, notion qui sera appelée par la suite « confort d'été ».

De son côté, l'État dispose de plusieurs leviers afin d'accélérer cette transformation vers un meilleur confort d'été. En particulier, plusieurs réglementations techniques régissent l'acte de construire et de rénover nos bâtiments. Ces dernières années, la réglementation technique de la construction a connu plusieurs évolutions notables en ce sens.

Constructions neuves : l'entrée en vigueur de la RE2020 incite à la conception bioclimatique des bâtiments et prend en compte l'impact énergétique de la climatisation

Les bâtiments construits aujourd'hui feront partie du parc immobilier français en 2100 lorsque le climat aura changé. Il est donc essentiel d'assurer le confort d'été dans ces bâtiments dès aujourd'hui. Or, les retours d'expérience sur les constructions de la précédente décennie ont montré que la réglementation alors en vigueur, c'est-à-dire la réglementation thermique 2012 (RT2012), n'assurait pas suffisamment le confort des occupants lors des fortes chaleurs estivales. La nouvelle réglementation pour les constructions neuves, appelée réglementation environnementale 2020 (RE2020), intègre donc parmi ses trois enjeux prioritaires le confort d'été au même titre que la réduction des consommations d'énergie ou la prise en compte de l'impact sur le climat des constructions. Il s'agit donc bien d'un défi majeur pour les constructions de la prochaine décennie.

De manière pratique, la méthode de calcul de la RE2020 intègre dans ses scénarios météorologiques une vague de chaleur pendant la période estivale. Celle-ci est issue des données de la canicule de 2003, puisque cette dernière est considérée aujourd'hui comme représentative des futures vagues de chaleur qui toucheront la France en 2050, voire en 2100.

Sur la base de ces nouveaux scénarios, la RE2020 a mis en place un nouvel indicateur représentatif du confort du bâtiment en été, appelé indicateur « degré.heure » (DH). Celui-ci permet de quantifier l'impact de la vague de chaleur sur la température à l'intérieur du bâtiment. Plus concrètement, cet indicateur s'apparente à un compteur qui cumule sur l'année, chaque degré inconfortable de chaque heure. Il est central dans le fonctionnement de la réglementation puisque deux seuils y sont adossés.

Afin de respecter la réglementation, il est interdit de dépasser un seuil haut, fixé autour de 1250 DH, ce qui correspond à une durée de 25 jours durant laquelle le logement serait continument à 30 °C le jour et 28 °C la nuit. En parallèle, un second seuil bas est fixé autour de 350 DH, soit une semaine en continu à 30 °C le jour et 28 °C la nuit. En-dessous de ce seuil bas, la réglementation est satisfaite sur ce volet du confort d'été. Au-dessus de ce seuil bas, des pénalités sont appliquées dans le calcul de la performance énergétique pour tenir compte des besoins potentiels en rafraîchissement du bâtiment.



Figure D 1 : Schéma de principe du calcul du confort d'été selon la RE2020.

Source : MTECT/DGALN.

Cette méthodologie s'impose désormais à tous les projets de construction sur le territoire national, en commençant par les projets de construction de bâtiments d'habitation à partir du 1^{er} janvier 2022, puis des bâtiments de bureaux et d'enseignement primaire et secondaire dès le 1^{er} juillet 2022. Suivront ensuite les bâtiments tertiaires plus spécifiques comme les hôtels, les restaurants, les commerces...

À travers ce nouvel indicateur, la RE2020 incitera fortement à la conception bioclimatique des constructions neuves. Les leviers de construction passifs, c'est-à-dire ceux qui ne consomment pas ou peu d'énergie, seront à privilégier : forme du bâtiment, orientation, protections solaires, brasseurs d'air ou encore puits climatiques... La RE2020 permettra également l'installation de solutions de climatisation pour les projets qui le nécessiteraient. Cependant, elle prendra en compte

l'impact énergétique de cette climatisation, ce qui nécessitera la mise en œuvre de leviers complémentaires.

Logements existants : le diagnostic de performance énergétique, nouveau baromètre de la performance énergétique des logements, informe également du confort estival dans votre logement

Au 1^{er} juillet 2021, une nouvelle version du diagnostic de performance énergétique (DPE) des logements est entrée en vigueur. Le DPE est désormais plus fiable et plus lisible, au bénéfice des usagers. La refonte du DPE en a fait l'outil de référence des Français pour la rénovation des logements, au service notamment de la lutte contre les passoires énergétiques.

La refonte du DPE a également permis d'indiquer des informations supplémentaires sur le document remis, dont une concernant le confort d'été.

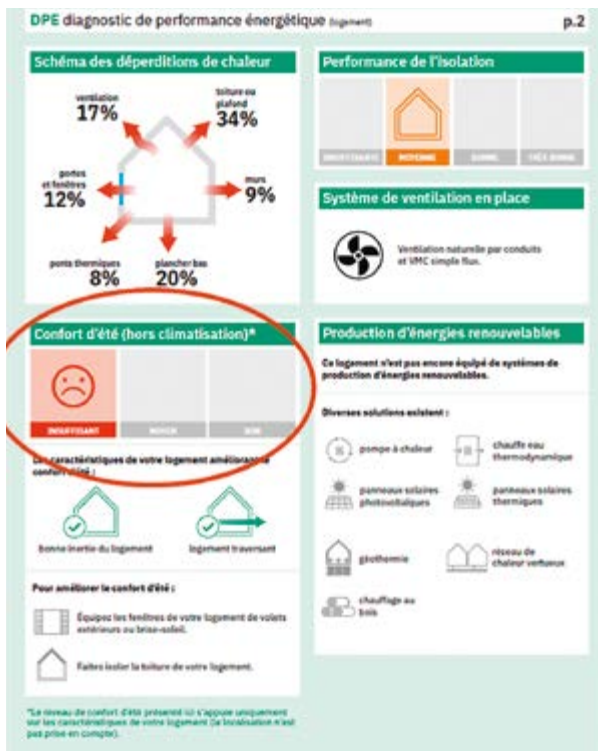


Figure D 2 : Nouvel indicateur de confort d'été dans le DPE.

Source : MTECT/DGALN.

Cet indicateur demeure simple. Il permet de classer le logement en trois catégories de confort d'été : insuffisant, moyen ou bon. Ce classement est réalisé grâce à la prise en compte de certaines caractéristiques constructives clés du logement : l'aspect traversant du logement qui traduit la capacité à créer des courants d'air permettant de rafraîchir le logement durant la nuit, son inertie qui

traduit sa capacité à conserver la fraîcheur le jour, la présence de protections solaires couvrant les principales ouvertures du rayonnement solaire, l'isolation des parties clés du logement... Cet indicateur ne prend pas en compte la climatisation qui pourrait être installée dans le logement, et ce afin de privilégier, de la même manière qu'en RE2020, les leviers passifs. Cependant, au contraire de la RE2020 pour les constructions neuves, l'indicateur de confort d'été du DPE demeure indicatif, c'est-à-dire qu'aucune obligation réglementaire à ce jour n'y est adossée. Il s'agit uniquement de donner une première information qualitative au futur acheteur ou locataire du comportement du logement face aux chaleurs estivales afin qu'il puisse avoir une vision plus claire de la performance du logement.

Au-delà de cet indicateur, le DPE contient également des recommandations de travaux permettant de corriger certains aspects importants du bâtiment. Par exemple, le DPE affiché en figure D 2 recommande l'installation de volets extérieurs ou de brise-soleil sur certaines fenêtres ainsi que l'isolation de la toiture. Cela permettra au futur acheteur de ce logement de connaître les travaux à réaliser avant de s'installer afin d'améliorer sa qualité de vie en période estivale. Enfin, il contient des recommandations d'usage du logement qui visent à maintenir des conditions de température satisfaisantes malgré ces événements.

Par ailleurs, afin de poursuivre dans son rôle d'information des particuliers, l'État a mis en place diverses mesures de communication visant à améliorer le confort des logements en été. Par exemple, des recommandations utiles sont données par l'ADEME (ADEME, 2022) dans son guide : « Comment garder son logement frais en été ? »

Conclusion

Une réglementation technique en évolution qui nécessitera des travaux de recherche et des enquêtes de terrain afin de s'améliorer.

Le constat est clair, nous devons aller vers des bâtiments plus confortables en été, que ce soit dans le flux de constructions neuves ou dans le stock de bâtiments existants. La réglementation technique pose de nouveaux jalons importants mais il convient dès aujourd'hui de prendre en compte ces aspects lors de la construction ou la rénovation de nos bâtiments, en particulier lors de l'accueil de publics sensibles. Il faudra s'attendre à voir ces sujets progresser dans les prochaines années, notamment dans la réglementation technique mais aussi et surtout au niveau de la connaissance générale et des pratiques sur le terrain. Des travaux de recherche ou des enquêtes de terrain seront extrêmement utiles pour dresser un diagnostic clair de la situation, en particulier en ce qui concerne l'impact des vagues de chaleur sur la santé des occupants.

La vigilance « canicule » de Météo-France

Un dispositif d'adaptation au changement climatique

**Sylvain Mondon, Véronique Ducrocq,
Céline Jauffret, Michel Lambert, Christophe Landalle,**
Météo-France

Au moment de la conception et de la mise en place du dispositif de vigilance météorologique en 2000 et 2001, les vagues de chaleurs n'ont pas fait partie des phénomènes à prendre en compte (Lepape, 2004 ; Calmet, 2018). Leur impact sur la population n'a été formellement établi qu'après l'occurrence de la canicule de 2003, entraînant une prise de conscience du caractère dangereux des vagues de chaleur. Les études épidémiologistes conduites par l'Institut national de veille sanitaire (InVS, aujourd'hui Santé publique France) ont en particulier démontré la corrélation entre le phénomène physique de vague de chaleur et la surmortalité, de plus de 15 000 personnes constatée à l'issue de l'événement de 2003, et confirmé ensuite lors des canicules de 2006 et 2015 (Pascal *et al.*, 2015). Une analyse fine des temporalités relatives entre les paramètres météorologiques (température quotidienne minimum et maximum) et la variation de mortalité a permis de mettre en évidence, au moyen d'une comparaison historique sur 13 villes de référence, le caractère explicatif de l'indice biométéorologique (IBM) qui vise à décrire l'effet cumulé sur 3 jours consécutifs des températures élevées le jour et la nuit.

L'IBM se décline en deux composantes : la moyenne sur 3 jours consécutifs des températures quotidiennes maximales (IBMx) et la moyenne sur 3 jours consécutifs des températures quotidiennes minimales (IBMn). Les effets de la canicule de 2003 ont permis d'établir, pour chaque département, des couples de seuils d'IBMx et d'IBMn au-delà desquels la surmortalité est significative (proche d'un doublement de la mortalité habituelle). Il est ainsi possible d'évaluer un risque de danger pour la population liée à la chaleur par le biais de la prévision des températures sur les jours à venir et d'un dépassement des seuils pour les IBMx et IBMn. Les prévisions de températures sont relativement fiables plusieurs jours à l'avance, il est ainsi possible d'évaluer un risque sanitaire à venir.

À partir de l'objectivation de ces connaissances, une importante activité en matière d'action publique a été engagée notamment sur 3 dimensions complémentaires structurées par le plan national canicule de 2004 :

- le renforcement des dispositifs d'avertissement en temps réel, avec en particulier l'incorporation du phénomène « canicule » au dispositif de vigilance de Météo-France ;
- la préparation des équipes gérant les situations d'urgence sanitaire et sociale (ex. : formation, moyens, organisation) pour faire face, à court terme, aux prochaines canicules dans de meilleures conditions ;

– la prévention des risques induits par les vagues de chaleur (ex. : sensibilisation, réglementation, référentiels de confort d’été) pour renforcer la résilience à moyen et long terme des catégories de population les plus sensibles ou des professions les plus exposées.

L’ensemble de ces trois axes matérialisant l’engagement d’une démarche volontariste d’action publique sanitaire contribue à l’adaptation au changement climatique dans un climat en transition où les vagues de chaleurs deviennent progressivement plus intenses et plus fréquentes (IPCC, 2022). Bien entendu, les effets des vagues de chaleur ne dépendent pas uniquement des politiques sanitaires, les phénomènes d’îlots de chaleur urbains ou les problématiques de qualité de l’air ou encore les modes de vie constituent des facteurs à intégrer dans l’analyse fine de la sensibilité à la chaleur des zones à forte densité de population et donc des besoins d’adaptation au climat et à son évolution (Euzen *et al.*, 2017).

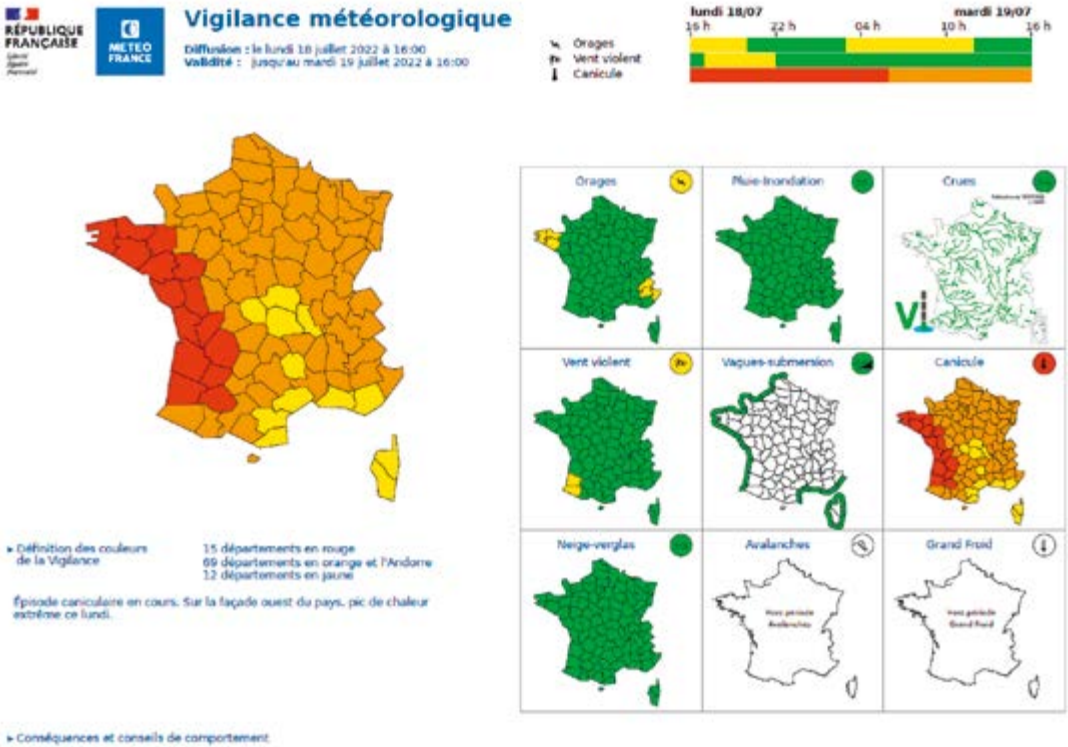


Figure D 3 : Carte de vigilance émise par Météo-France le 16 juillet 2022 à 16 h.

Source : Météo-France.

Tableau D 1 : Caractéristiques synthétiques des épisodes de vigilance canicule orange ou rouge observés en France métropolitaine depuis 2004.

Années	Nb épisodes de vigilance orange ou rouge canicule*	Nb de jours cumulés*	Nb de départements concernés par au moins un jour*	Anomalie de température en moyenne estivale (°C) référence 1991-2020*	Surmortalité**
2003	sans objet	sans objet	sans objet	2,7	15 257
2004	0	-	-	- 0,2	
2005	3	11	12	0,1	
2006	3	28	67	0,7	1 048
2007	0	-	-	- 1,1	
2008	1	3	1	- 0,8	
2009	1	4	8	0,2	
2010	2	5	5	- 0,1	
2011	1	6	12	- 1,0	
2012	1	7	33	- 0,1	
2013	1	4	2	0,0	
2014	0	-	-	- 0,6	
2015	3	14	49	1,1	1 739
2016	2	9	48	0,1	378
2017	4	22	78	1,1	474
2018	3	21	73	1,5	1 641
2019	2	20	89	1,3	1 462
2020	2	11	65	0,6	1 924
2021	2	14	6	0,0	239
2022	3	33	93	2,3	2 816

Sources : * Météo-France; ** Santé publique France .

Le tableau D 1 récapitule les principales caractéristiques des vigilances canicule et la surmortalité associée depuis 2004. Le nombre d'épisodes et d'années n'est pas suffisant pour tirer des conclusions statistiques robustes en matière d'évolution de la sensibilité de la population française ni en matière de renforcement de sa résilience. Cependant, il est légitime aujourd'hui de se préparer à traiter une question que ne manquera pas de soulever l'accumulation des épisodes au cours des prochaines années, et l'augmentation de leur sévérité, qui est celle de l'efficacité du dispositif de la vigilance canicule et des critères de déclenchement des niveaux de vigilance les plus élevés. L'évolution progressive des modes de vie et du comportement des personnes s'adaptant à des températures élevées ou la banalisation des vigilances orange ou rouge si elles deviennent fréquentes, sont des facteurs à prendre en compte. Si, tous les ans, la majorité de la France métropolitaine est placée en vigilance orange la moitié de l'été et qu'aucune

surmortalité significative n'est détectée, est-ce que le dispositif a encore un intérêt sous cette forme ?

Il s'agira alors de définir la logique qui sera la plus utile pour protéger la population :

- conserver les référentiels de vigilance canicule calibrés sur la base des événements passés pour que chacun puisse comparer des événements courants et futurs à partir d'un référentiel stable (les seuils d'IBMn/IBMx); ou bien :
- modifier les référentiels pour que les niveaux les plus élevés de vigilance continuent de véhiculer un signal de danger élevé (un niveau de surmortalité potentiel).

En matérialisant une relation concrète entre population, vague de chaleur et action publique, la vigilance canicule contribue directement à l'effort de transition climatique. Sur le plan institutionnel, cette matérialisation est portée principalement par l'instruction du 14 juin 2021 relative au dispositif de vigilance (NOR : INTE2114719J) et l'instruction du 7 mai 2021 relative à la gestion des vagues de chaleur dans les plans ORSEC (NOR : SSAP2114388J). Bien entendu, tout dispositif d'avertissement aussi performant qu'il soit ne saurait suffire en matière d'adaptation. En effet, même si son caractère évolutif maintient une utilité importante en temps réel, un dispositif d'avertissement ne saurait remplacer des actions multidimensionnelles de prévention des risques pour protéger la population durablement (Ostrom, 2014).

Gérer des vagues de chaleur de plus en plus extrêmes : des impacts sanitaires aux impacts systémiques

Marie Carrega et Sarah Voirin,

Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC)

La surveillance sanitaire et environnementale

À la suite de la vague de chaleur sans précédent qui a généré une surmortalité de l'ordre de 15 000¹ personnes en 2003, la France s'est dotée en 2004 d'un premier plan national canicule afin de prévenir et réduire les conséquences sanitaires des vagues de chaleur. Ce plan s'est accompagné de la mise en place d'une surveillance sanitaire et environnementale comprenant un système de vigilance météorologique et un système de surveillance et d'alerte canicule et santé.

- **Vigilance météorologique**

Le dispositif de vigilance météorologique permet d'identifier la survenue d'une vague de chaleur susceptible d'avoir un impact sanitaire et d'alerter les autorités et la population. Il concerne actuellement la France métropolitaine uniquement.

Ce dispositif repose sur la mesure et la prévision des températures minimales et maximales sur 3 jours consécutifs, qui sont comparées à des seuils départementaux prédéfinis pour chaque département et réévalués en tant que de besoin. Les vagues de chaleur sont prises en compte par le dispositif de vigilance météorologique pendant la période qui s'étend du 1^{er} juin au 15 septembre de chaque année. Cette période peut être avancée ou prolongée de quelques jours si les conditions météorologiques l'exigent.

La vigilance météorologique se matérialise sous la forme d'une carte de France métropolitaine qui signale si un danger météorologique menace un ou plusieurs départements, à l'aide de quatre couleurs (vert, jaune, orange, rouge). En cas de phénomène dangereux de forte intensité, la zone concernée apparaît en orange, et en rouge en cas de phénomène très dangereux d'intensité exceptionnelle. Elle est réactualisée 2 fois par jour *a minima*, à 6 h et 16 h, et peut être réactualisée à tout moment si un changement notable intervient. Elle est accessible à tous en permanence sur le site Vigilance météorologique de Météo-France.

1. <https://www.santepubliquefrance.fr>

● *Système de surveillance et d'alerte canicule et santé*

Afin d'anticiper la survenue d'un phénomène épidémique de grande ampleur en rapport avec une vague de chaleur, l'InVS a élaboré en juin 2004, en collaboration avec Météo-France, un système de surveillance et d'alerte biométéorologique. Son but est d'alerter les autorités sanitaires, avec trois jours d'anticipation, et de permettre la mise en œuvre des actions prévues du 1^{er} juin au 30 septembre par le plan canicule.

Le système de surveillance syndromique SurSaUD (Surveillance sanitaire des urgences et des décès) est fondé sur une remontée informatisée de l'activité des services d'urgence des établissements de santé, de certains SAMU et SMUR, des services départementaux d'incendie et de secours (SDIS) et des associations comme SOS Médecins.

Le système d'alerte est fondé sur une veille quotidienne d'indicateurs météorologiques et sanitaires qui ont été testés pour 14 villes pilotes² à partir des données rétrospectives de 1973 à 2003.

Les données météorologiques ont été fournies par Météo-France, les données sanitaires par l'InVS et les données de mortalité par l'INSEE.

L'instruction interministérielle du 7 mai 2021 relative à la gestion sanitaire des vagues de chaleur en France métropolitaine

La survenue de canicules extrêmes, qui a nécessité l'activation du niveau rouge de la vigilance météorologique canicule pour la première fois en 2019, a révélé la nécessité d'adapter le dispositif de préparation et de gestion des canicules en mettant en avant l'implication des acteurs locaux. En conséquence, l'instruction interministérielle de 2021 précise les nouvelles orientations en matière de préparation et de gestion sanitaire des vagues de chaleur, qui reposent dorénavant, en plus du dispositif de vigilance et de surveillance sanitaire, sur une disposition spécifique ORSEC³ gestion sanitaire des vagues de chaleur et sur un dispositif national d'appui et de conduite de crise sanitaire.

À l'échelle départementale, le préfet de département peut s'appuyer sur le guide ORSEC départemental S6 : « Dispositions spécifiques gestion sanitaire des vagues de chaleur », publié en mai 2021 par le ministère de la Santé et des Solidarités, pour organiser la mobilisation des services départementaux face aux vagues de chaleur.

2. Bordeaux, Dijon, Grenoble, Le Havre, Lille, Limoges, Lyon, Marseille, Nantes, Nice, Paris, Strasbourg, Toulouse et Tours.

3. Le dispositif ORSEC (organisation de la réponse de sécurité civile) est un programme d'organisation des secours à l'échelon départemental, en cas de catastrophe. Il permet une mise en œuvre rapide et efficace de tous les moyens nécessaires sous l'autorité du préfet. Ce dispositif prévoit des dispositions générales applicables en toutes circonstances et des dispositions propres à certains risques particuliers ou liées au fonctionnement d'installations déterminées.

L'objectif de ce guide est de permettre aux préfets de département, ainsi qu'à l'ensemble des acteurs territoriaux, d'assurer la protection non seulement des populations vulnérables à la chaleur, mais aussi de l'ensemble des populations exposées.

Ce guide propose trois types de fiches pouvant être reprises dans les dispositifs départementaux : les fiches de doctrine qui présentent le dispositif de gestion des vagues de chaleur ; les fiches de gestion décrivant les mesures de gestion sanitaire à mettre en œuvre au niveau territorial, notamment pour le niveau rouge de la vigilance météorologique ; les fiches opérationnelles par acteurs qui décrivent les actions que doivent mener les préfetures dans le cadre de leurs travaux de planification opérationnelle (préparation de la réponse collective), et les mesures de gestion que chaque acteur peut être amené à mettre en œuvre, en fonction du contexte.

La fiche opérationnelle destinée au préfet de département indique qu'en cas de survenue d'une canicule extrême correspondant au niveau rouge de vigilance météorologique, il est possible par exemple d'interdire temporairement tout grand rassemblement, y compris les manifestations sportives, les sorties des écoles ou des centres aérés ainsi que le déroulement des chantiers et grands travaux ; de fermer les services publics pendant les heures les plus chaudes de la journée, si les locaux ne sont pas climatisés, ou de décaler leurs horaires d'ouverture ; de réglementer la circulation des véhicules pendant les heures les plus chaudes de la journée ; de prendre toute décision ou rendre tout arbitrage nécessaire au maintien des activités des secteurs essentiels à la prise en charge sanitaire des personnes, en soutien du dispositif ORSAN⁴ piloté par l'ARS (permanence des soins de ville, continuité du service public hospitalier, coopération entre les secteurs hospitalier et médico-social, disponibilité et capacités des transporteurs sanitaires et des opérateurs funéraires) ; etc.

À l'échelle communale, le maire peut s'appuyer sur le guide « Faire face aux vagues de chaleur avec votre plan communal de sauvegarde⁵ – Recommandations et bonnes pratiques », publié en juin 2021 par le ministère de l'Intérieur, pour organiser la mobilisation des services communaux face aux vagues de chaleur. L'objectif de ce guide est d'aider les maires et leurs services à :

– organiser la veille et le suivi de la vigilance météorologique ;

4. Le dispositif ORSAN (organisation de la réponse du système de santé en situations sanitaires exceptionnelles) est un dispositif d'organisation des soins qui date de 2014. Avant 2014, le dispositif de réponse à ce type de situations exceptionnelles s'appuyait principalement sur les établissements de santé avec les dispositifs « plans blancs ». Le dispositif ORSAN formalise une coordination régionale des dispositifs existants dans les 3 secteurs sanitaires (secteurs ambulatoire, hospitalier et médico-social), organise et adapte les soins en situation sanitaire exceptionnelle afin de prendre toutes les mesures nécessaires pour que les personnes malades puissent bénéficier des soins appropriés.

5. Le plan communal de sauvegarde (PCS) est un outil à disposition du maire depuis 2004 lui permettant d'organiser la mobilisation des services communaux au profit d'une réponse communale face à la survenue d'un événement. Le PCS n'est pas obligatoire dans toutes les communes mais seulement dans celles soumises à un risque particulier.

- développer le registre nominatif communal⁶ ;
- anticiper et hiérarchiser les mesures à prendre pour faire face aux vagues de chaleur ;
- structurer la diffusion des recommandations de protection contre les vagues de chaleur.

Les recommandations de ce guide s'appuient sur des pratiques déjà mises en place dans certaines communes. Dans le domaine de la mise à disposition de locaux rafraîchis et de la distribution d'équipement, des communes ont par exemple mis en place les actions suivantes : maraudes avec des bénévoles à destination des SDF ; appel à la solidarité des grandes surfaces ; distribution de colis alimentaires et d'eau ; installation d'un camion-douche ; mise à disposition d'une pièce rafraîchie de 10 h à 17 h *via* une convention entre la commune et une résidence de personnes âgées ; etc.

Vers un plan national de gestion de tous les impacts des vagues de chaleur

● *Bilan du dispositif de gestion des impacts sanitaires des vagues de chaleur*

Alors qu'avec le changement climatique les vagues de chaleur sont devenues plus précoces, plus fréquentes et plus intenses depuis la mise en place du premier plan national canicule en 2004, la surmortalité liée aux vagues de chaleur a diminué dans le même temps, passant de plus de 15 257 décès en 2003 à 2 816 décès en 2022⁷. Si les vagues de chaleur continuent d'entraîner systématiquement un excès de morbidité et de mortalité, le dispositif de préparation et de gestion des vagues de chaleur a donc contribué depuis sa mise en place en 2004 à réduire les impacts sanitaires des vagues de chaleur par rapport au bilan de 2003.

Des études publiées par Santé publique France en 2019 (Laaidi *et al.*, 2019) et en 2021 (Verrier *et al.*, 2021) montrent que l'absence de perception du risque pour soi est le principal obstacle à l'adoption de gestes de prévention par les citoyens. En effet, les personnes qui se jugent bien portantes ne se sentent pas concernées, associent le risque lié aux fortes chaleurs à l'âge ou l'état de santé et non à une surexposition à la chaleur. Cette distanciation a pu être favorisée par le dispositif de prévention public qui jusqu'en 2019 était centré sur une communication d'urgence avec des outils non différenciés pour l'ensemble de la population. Le

6. Le registre nominatif communal est un outil à disposition du maire pour recueillir les éléments relatifs à l'identité, à l'âge et au domicile des personnes âgées et des personnes handicapées qui en ont fait la demande afin de favoriser l'intervention des services sociaux et sanitaires. Ces données sont notamment utilisées par les services susmentionnés pour organiser un contact périodique avec les personnes répertoriées lorsque le plan d'alerte et d'urgence est mis en œuvre. Le maire peut également procéder à ce recueil à la demande d'un tiers à la condition que la personne concernée, ou son représentant légal, ne s'y soit pas opposée (cf. article L. 121-6-1 du code de l'action sociale et des familles, modifié par l'article 1^{er} de la loi n° 2004-626 du 30 juin 2004 relative à la solidarité pour l'autonomie des personnes âgées et des personnes handicapées).

7. <https://www.santepubliquefrance.fr>

dispositif de marketing social, mis en place par la suite, met en scène plusieurs populations (enfants, travailleurs, sportifs, personnes âgées) dans des situations de la vie courante afin d'accroître la perception du risque pour soi.

Travailler en période de forte chaleur peut également présenter un risque pour la santé. L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) considère en effet qu'au-delà de 30 °C pour un salarié sédentaire, et 28 °C pour un travail nécessitant une activité physique, la chaleur peut constituer un risque pour les salariés. Certaines dispositions du code du travail prévoient des mesures contribuant à la protection des salariés en cas de forte chaleur : évaluation des risques pour la santé et la sécurité des travailleurs liés à l'ambiance thermique⁸, renouvellement régulier de l'air et évitement des élévations exagérées de température⁹, aménagement des postes de travail pour protéger les salariés contre les conditions atmosphériques¹⁰, mise à disposition de chaque salarié d'au moins trois litres d'eau par jour sur les chantiers du BTP¹¹, arrêt de chantier si les températures extrêmes rendent l'accomplissement du travail dangereux ou impossible¹², interdiction d'affecter les jeunes travailleurs de moins de 18 ans à des travaux qui les exposeraient à une température extrême susceptible de nuire à la santé¹³. La norme internationale NF X35-203/ISO 7730 relative au confort thermique¹⁴ complète ces dispositions légales en précisant des seuils de température permettant de prévenir les risques pour la santé. Les plages qui sont préconisées dépendent de la saison et d'autres paramètres tels que l'humidité relative mais aussi l'usage et l'environnement (murs, plafond...). Par exemple, une température de 23,5 à 25,5 °C est préconisée l'été dans un bureau. Pour autant, la réglementation ne fixe pas de seuil de température maximale au-delà duquel il serait interdit de travailler afin de prévenir les dangers liés aux vagues de chaleur. Malgré une mobilisation importante des directions régionales du ministère en charge du Travail avec des contrôles, notamment dans le BTP, le rappel des consignes de prévention, la diffusion et le relais des messages nationaux, dix accidents mortels du travail ont ainsi été recensés pendant les épisodes caniculaires de 2019.

8. Article R. 4121-1 du code du travail, en application de l'article L. 4121-3, modifié par l'article 3 de la loi n° 2021-1018 du 2 août 2021 pour renforcer la prévention en santé au travail.

9. Article R. 4222-1 du code du travail, créé par le décret n° 2008-244 du 7 mars 2008 relatif au code du travail.

10. Article R. 4225-1 du code du travail, créé par le décret n° 2008-244 du 7 mars 2008 relatif au code du travail.

11. Article R. 4534-143 du code du travail, créé par le décret n° 2008-244 du 7 mars 2008 relatif au code du travail.

12. Article L. 5424-9 du code du travail, modifié par l'article 4 de l'ordonnance n° 2017-1386 du 22 septembre 2017 relative à la nouvelle organisation du dialogue social et économique dans l'entreprise et favorisant l'exercice et la valorisation des responsabilités syndicales.

13. Article D. 4153-36 du code du travail, modifié par l'article 4 du décret n° 2009-289 du 13 mars 2009 rectifiant certaines dispositions du code du travail.

14. NF X35-203/ISO 7730 relative au confort thermique «Ergonomie des ambiances thermiques – Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local».

● *Les impacts non sanitaires des vagues de chaleur*

Les deux épisodes de canicule de l'été 2019, remarquables tous deux par leur intensité et, pour l'un par sa précocité (dès le 24 juin), pour l'autre par son étendue géographique (20 départements du Nord en vigilance rouge), ont par ailleurs impacté l'ensemble de la population et ont eu des conséquences majeures dans de nombreux domaines : fermeture de classes et de crèches, report d'examens scolaires, annulation de manifestations sportives et culturelles, perturbations dans les transports en commun et grande pénibilité pour les usagers, mortalité animale, assèchement des cours d'eau et difficultés d'approvisionnement en eau potable, feux de récolte, tensions sur le cycle de refroidissement des centrales nucléaires, etc.

À la suite de ces constats, des travaux ont été initiés pour compléter le dispositif de gestion des canicules (limité aux impacts sanitaires) par un plan national de gestion des vagues de chaleur pour lutter contre l'ensemble des impacts des vagues de chaleur sur la vie quotidienne des Français, la continuité des services publics essentiels et de la vie économique, ainsi que la protection des milieux et ressources naturels. Des travaux, coordonnés par le ministère en charge de la Transition écologique ont permis d'identifier les mesures concrètes à mettre en œuvre dans le cadre de ce nouveau plan d'actions, sur la base des propositions issues d'un retour d'expérience interministériel.

Le plan national de gestion des vagues de chaleur, actuellement en phase de finalisation, a pour objectifs de se préparer de façon systématique en amont de la période estivale puis d'anticiper l'arrivée prévue d'une vague de chaleur et de définir les actions à mettre en œuvre aux niveaux national et local pour en prévenir et en limiter les impacts non sanitaires. Certaines de ses actions seront mises en œuvre tous les ans, en amont des périodes favorables aux vagues de chaleur. D'autres actions ont vocation à être mises en œuvre lorsqu'une vague de chaleur est annoncée ou en cours. En effet, les épisodes de forte chaleur sont bien prévus une semaine environ avant leur survenue, grâce aux modèles de prévision météorologique de Météo-France. Ce délai peut être mis à profit pour alerter les différents acteurs de la prévention et de la gestion des risques.

Ces actions sont mises en œuvre par les ministères concernés¹⁵, en lien le cas échéant avec le ministère de l'Intérieur en fonction de la situation. Elles viennent compléter le dispositif national d'appui et de conduite de crise sanitaire piloté par le ministère chargé de la Santé décrit par l'instruction interministérielle de 2021 et par les guides à destination des préfets dans le cadre du plan ORSEC départemental et des maires dans le cadre du plan communal de sauvegarde.

Lorsqu'il sera publié, le plan national de gestion des vagues de chaleur devrait s'appuyer sur le dispositif de vigilance météorologique spécifique à ce phénomène (cf. chapitre D : La vigilance canicule de Météo-France).

15. Ministères en charge de l'Agriculture, de la Biodiversité, du Climat, de la Cohésion des territoires, de l'Eau, de l'Économie, de l'Éducation nationale, de l'Élevage, de l'Énergie, de la Forêt, des Outre-mer, de la Santé, des Sports, de la Transition écologique, des Transports, du Travail.

Chapitre E

Les outils pour la mise en œuvre de l'adaptation



Ce chapitre est consacré aux quelques outils qui sont à la disposition des différents acteurs de l'adaptation (élus locaux, techniciens des collectivités, acteurs économiques, bureaux d'études, particuliers), pour la mise en œuvre des mesures d'adaptation. Cette liste, qui n'a pas vocation à être exhaustive, comprend le Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique, Drias les futurs du climat et Climat HD, Bat-ADAPT et les guides de l'ADEME. Le dernier article résume une publication d'I4CE qui a dressé en 2022 un premier état des lieux consolidés des besoins de financement des mesures d'adaptation.

Le Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique

Vincent Bourcier et Jérôme Duvernoy,

Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC)

Le climat change : quels en sont les effets concrets ? Est-il possible d'anticiper, et comment s'adapter au changement climatique ? Quelles sont les bonnes expériences à connaître, et les acteurs de l'adaptation au changement climatique ?

Pour apporter des réponses concrètes, le Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique¹ a été mis en ligne en décembre 2020. Développé dans le cadre du deuxième plan national d'adaptation au changement climatique, il est le fruit d'un partenariat entre le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (DGEC/SCEE/ONERC), le CEREMA, l'ADEME et Météo-France. Ce centre de ressources a pour objectif de faciliter l'accès aux informations pertinentes pour l'adaptation des territoires au changement climatique, pour différents types d'acteurs.

Il a été conçu pour mieux faire connaître la réalité du changement climatique, mais aussi pour outiller tous les acteurs de l'adaptation et les mettre en capacité d'agir. Ainsi, ce centre propose des parcours adaptés aux différents utilisateurs : élus, techniciens des collectivités, acteurs économiques, bureaux d'études, particuliers. Un sixième parcours pour les enseignants est en cours d'élaboration. Une entrée par région est également disponible, pour découvrir les acteurs locaux du changement climatique, ainsi que des ressources variées portant sur les enjeux spécifiques de chaque région.

Les ressources proposées sont sélectionnées pour leur pertinence, validées et éprouvées afin que le parcours des utilisateurs réponde au mieux à leur besoin.

Une recherche sur la thématique des canicules permet ainsi de découvrir à ce jour pas moins de 87 pages dédiées à cette thématique :

Des sélections plus fines sont alors possibles soit par type de public visé (technicien de collectivité, bureau d'études, acteur économique, particulier, enseignant ou élu), soit par thématique (parmi les vingt disponibles), soit par type de ressources parmi les seize disponibles.

Ainsi, par exemple, sélectionner « élu » comme type de public et ajouter un filtre sur « Information/sensibilisation » permet de visualiser, entre autres, deux lettres aux élus de l'ONERC « Le Climat change, agissons », consacrées à ce sujet. La lettre n° 21² traite de la climatisation et des systèmes de rafraîchissement. La lettre

1. <https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/>

2. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_lettre_21.pdf



n° 32³ est quant à elle dédiée exclusivement aux canicules. On trouvera en outre des actualités ou des événements en lien directs avec cette thématique, un outil numérique pour lutter contre l'îlot de chaleur urbain, un recensement d'initiatives locales inspirantes, des fiches techniques et des formations spécifiques.

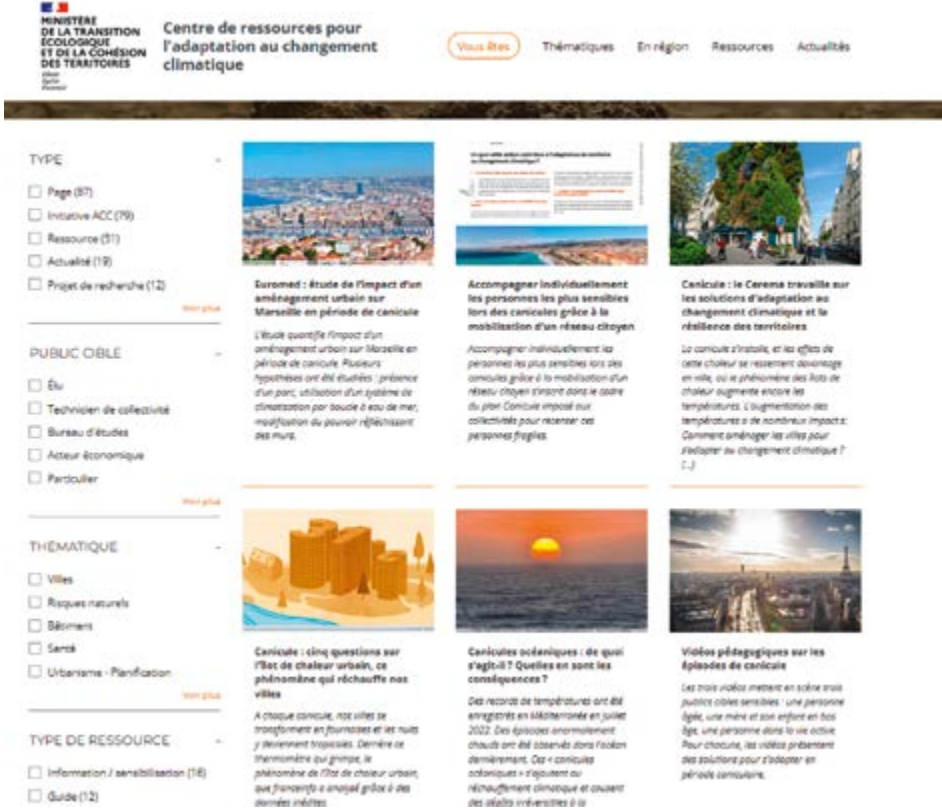


Figure E 1 : Copie d'écran de la recherche thématique sur les canicules.

Source : Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique⁴.

3. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Lettre_32.pdf

4. <https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/>



Drias les futurs du climat, Climat HD

Maryvonne Kerdoncuff,
Météo-France

Mesure phare du premier plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-1), le portail Drias les futurs du climat a ouvert le 24 juillet 2012. Il s'agit du premier service climatique mis à disposition gratuitement. Il est issu du projet Drias (Donner accès aux scénarios climatiques régionalisés français pour l'impact et l'adaptation de nos sociétés et environnement) financé par le programme Gestion et impact du changement climatique (GICC) du ministère de la Transition écologique (MTE) et il répond à un important besoin exprimé par l'ensemble des acteurs concernés par le changement climatique, de disposer aisément d'informations et d'aides pour étudier les impacts et décider de mesures d'adaptation au changement climatique.

Plus récemment, l'application web Climat HD propose une vision intégrée de l'évolution du climat passé et futur, aux plans national et régional. Climat HD synthétise ainsi de manière plus simplifiée les derniers travaux des climatologues et les mets à disposition de tous. Des messages clés et des graphiques sont également disponibles pour que chacun puisse mieux appréhender le changement climatique et ses impacts.

Drias les futurs du climat

Le portail Drias les futurs du climat¹ est le portail pour l'accès aux projections climatiques de référence pour la France, et plus récemment aux données du jeu Drias-2020. Il met ainsi librement à disposition un grand nombre d'informations permettant de qualifier les vagues de chaleur et les événements de températures extrêmes en climat futur.

Ce sont en particulier des indicateurs climatiques disponibles dans l'espace Découverte (en mode visualisation interactive) et dans l'espace Données et produits (téléchargement de données numériques).

Les indicateurs climatiques (définition au standard ETCDDI²) permettant de qualifier ces événements de températures extrêmes sont les suivants :

– **nombre de jours de vague de chaleur** : nombre de jours avec une température maximale supérieure (\geq) de plus de 5 °C à la température maximale quotidienne de référence sur la période 1976-2005 pendant une séquence de plus de 5 jours consécutifs ;

1. www.drias-climat.fr

2. http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml

- **nombre de jours de forte chaleur** : nombre de jours avec une température maximale supérieure (>) 35 °C ;
- **nombre de jours (nuits) anormalement chauds : nombre de jours (nuits) avec une température maximale (minimale) quotidienne** supérieure (\geq) de plus de 5 °C à la température maximale (minimale) quotidienne de référence sur la période 1976-2005 ;
- **nombre de nuits tropicales** : nombre de jours avec une température minimale quotidienne supérieure (>) à 20 °C.

Ces indicateurs sont déclinés à différentes fréquences temporelles :

- saisonnière en séries chronologiques ;
- annuelle en séries chronologiques ;
- mensuelle par horizon temporel de 30 ans ;
- saisonnière par horizon temporel de 30 ans ;
- annuelle par horizon temporel de 30 ans.

Par ailleurs ils sont disponibles modèle par modèle (couple GCM/RCM), mais aussi en quantiles de la distribution de l'ensemble multimodèle (ensemble Drias-2020 de 12 couples GCM/RCM). Un diagnostic issu de ces données est notamment disponible dans le rapport Drias-2020 (Soubeyroux et al, 2021).

Dans l'espace Découverte, seuls les indicateurs par horizon temporel sont visualisables.

À noter que courant 2023, un nouveau jeu d'indicateurs sur les vagues de chaleur pourra être ajouté selon la définition événementielle telle que décrite dans l'encadré 1 de ce rapport.

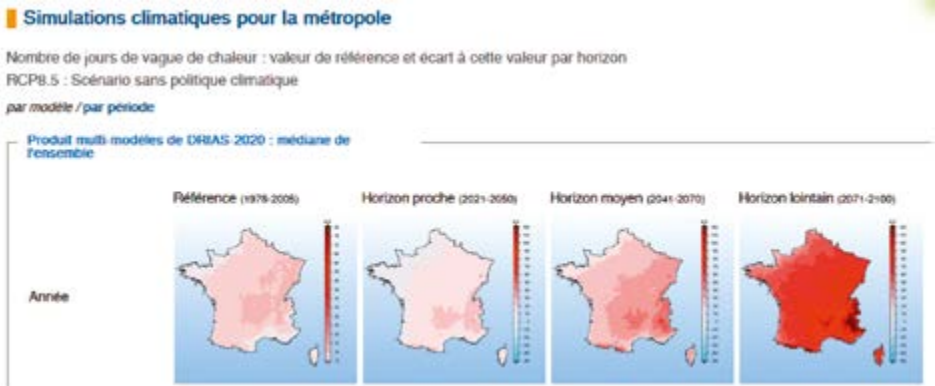


Figure E 2 : Copie d'écran du site Drias les futurs du climat.

Source : Drias les futurs du climat³.

3. www.drias-climat.fr

Dans l'espace Données et produits, toutes les fréquences temporelles sont disponibles.

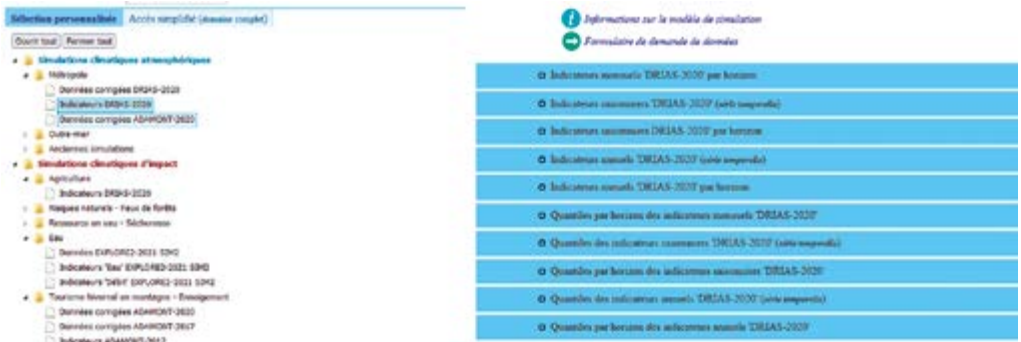


Figure E 3 : Copie d'écran du site Drias les futurs du climat.

Source : Drias les futurs du climat, <https://www.drias-climat.fr>

Climat HD

L'application Climat HD⁴ propose une vision intégrée à l'échelle régionale de l'évolution du climat passé (jusqu'à nos jours) et du climat futur.

Les territoires disponibles dans Climat HD sont la Métropole, La Réunion et les Antilles. Des travaux sont en cours (projet CLIPSSA) pour l'élaboration de projections climatiques sur le Pacifique. Cela permettra à terme d'intégrer les territoires de la Polynésie française et de la Nouvelle-Calédonie.

Concernant le diagnostic sur les vagues de chaleur, il faut se rendre dans la rubrique « Phénomènes ».

En climat passé on y trouve aussi bien pour la Métropole que chaque région métropolitaine (ancien découpage) et l'île de La Réunion, une présentation des vagues de chaleur passées sous forme de graphique « à bulles », avec l'axe des ordonnées pour l'intensité de la vague de chaleur et l'axe des ordonnées pour la durée de la vague de chaleur.

Un curseur permet de modifier la fenêtre temporelle d'intérêt.

4. <https://meteofrance.com/climathd>

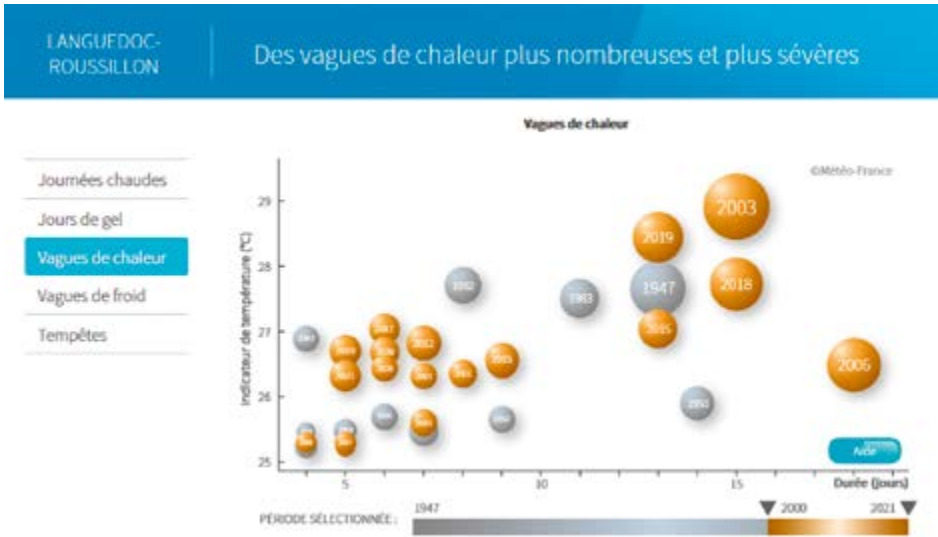


Figure E 4 : Copie d'écran de l'application web Climat HD.

Source : Météo-France/Climat HD⁵.

Un commentaire accompagne chaque graphique, mettant en exergue les caractéristiques de l'évolution des vagues de chaleur sur les dernières décennies et en particulier le fait qu'elles sont de plus en plus nombreuses.

En climat futur on trouve également dans la rubrique « Phénomènes » un diagnostic d'évolution des vagues de chaleur, mais à ce jour uniquement pour le territoire de la Métropole.

Il s'agit d'un graphique « à bulles » du même type que celui présenté en climat passé. Cependant il y a des possibilités supplémentaires de sélection interactive pour mettre en évidence le comportement des vagues de chaleurs dans différents contextes d'évolution du climat : scénario RCP 2.6 ou 8.5, horizon temporel proche (2021-2050) ou éloigné (2071-2100).

Un commentaire accompagne également le graphe pour préciser l'évolution de ces vagues de chaleur dans le futur, aussi bien pour les aspects intensité, durée que sévérité.

Perspectives

À ce jour il n'y a pas dans Climat HD de diagnostic d'évolution des vagues de chaleur en climat futur pour les territoires d'outre-mer. Des études complémentaires sont nécessaires pour préciser les critères d'identification de ces phénomènes pour

5. <https://meteofrance.com/climathd>

ces territoires, aux climats tropicaux insulaires, connaissant une typologie des événements de vague de chaleur très différente à celle de la Métropole.

Par ailleurs des travaux sont en cours pour enrichir le diagnostic sur les vagues de chaleur dans Climat HD. Ainsi il est prévu :

- d'ajouter plusieurs indicateurs, notamment le nombre annuel de jours en vague de chaleur (qui sera décliné à l'échelle nationale et régionale), ainsi qu'un indicateur sur le calendrier annuel des occurrences (échelle nationale uniquement). Ce dernier indicateur permet notamment de voir la façon dont la période potentielle en vagues de chaleur s'étend au printemps et en automne ;
- la présentation sous forme de graphes à bulles sera déclinée à l'échelle régionale, permettant ainsi un diagnostic plus fin à l'échelle régionale.

Bat-ADAPT

Sakina Pen Point,

Observatoire de l'immobilier durable

Bat-ADAPT est un outil d'adaptation au changement climatique à destination des acteurs de l'immobilier, qui a pour vocation de mettre à disposition une analyse des risques climatiques et des préconisations pour adapter les bâtiments au changement climatique.

Un outil d'adaptation au changement climatique dans le secteur de l'immobilier

Les acteurs du secteur de l'immobilier sont particulièrement concernés par les enjeux du changement climatique car ils ont la charge de la construction ou la gestion de systèmes évoluant sur un temps long : les bâtiments ont une durée de vie conventionnelle de 50 ans. Le changement climatique atteindra donc lourdement les constructions actuelles, et encore davantage celles qui ne sont qu'à l'état de projet en 2022.

Par ailleurs, le secteur est à la fois responsable d'une grande part des émissions carbone de la France (23% en 2021¹), et a l'opportunité de mettre en place des mesures d'adaptation peu carbonées, en prenant notamment exemple sur les méthodes architecturales traditionnelles. Ces mesures sont d'autant plus essentielles que la fonction première des constructions immobilières est d'abriter l'usager et les occupations du lieu, ce qui sous-tend un impératif de protection face aux aléas extérieurs tels que ceux du changement climatique.

Dans ce contexte, les professionnels de l'immobilier ont exprimé le besoin de monter en compétence sur la compréhension des risques climatiques, et de disposer d'un outil permettant une analyse rapide et détaillée. C'est l'objectif auquel l'outil Bat-ADAPT répond, s'inscrivant dans un cadre plus général de la résilience, avec la plateforme Resilience for Real Estate (R4RE).

Exposition aux risques climatiques des bâtiments

Les aléas climatiques tels que les vagues de chaleur sont exacerbés par le changement climatique, lui-même dépendant des émissions de gaz à effet de serre. Il est donc primordial de réduire ces émissions à l'échelle mondiale afin de limiter le réchauffement. Notre capacité à opérer ces réductions est conditionnée par

1. Site du ministère de la Transition écologique, <https://www.ecologie.gouv.fr/construction-et-performance-environnementale-du-batiment>

des choix pertinents en termes de modèles de société. Les scénarios climatiques modélisés par le GIEC permettent d'envisager le climat selon des augmentations de températures maintenues en deçà de seuils de température allant de + 1,5 °C à + 5 °C. Les risques climatiques pour les aléas concernant les bâtiments varient donc selon ces divers scénarios.

- **Scénarios ambitieux (SSP1-2.6), intermédiaire (SSP2-4.5) ou Business as Usual (SSP5-8.5)**

L'outil Bat-ADAPT s'appuie sur les scénarios du GIEC et met à disposition les données de risques climatiques pour les scénarios suivants :

- un scénario ambitieux, impliquant une politique climatique visant à diminuer les émissions de CO₂. Les risques du scénario ambitieux s'appuient sur les données des scénarios du GIEC RCP 2.6 ou SSP1-2.6 ;
- un scénario intermédiaire, impliquant une politique climatique visant à stabiliser les concentrations de CO₂. Les risques du scénario intermédiaire s'appuient sur les données des scénarios du GIEC RCP 4.5 ou SSP2-4.5 ;
- un scénario *Business-as-Usual*, sans politique climatique. Les risques du scénario intermédiaire s'appuient sur les données des scénarios du GIEC RCP 8.5 ou SSP5-8.5.

Cartographies sur le périmètre de la France ou de l'Europe

Bat-ADAPT propose des périmètres géographiques et horizons temporels adaptés aux besoins des acteurs de l'immobilier :

- les cartographies de risques à l'échelle européenne sont déclinées aux horizons proche, moyen et long terme. La maille de la cartographie est de 100 km, la précision est donc moyenne, mais cette cartographie assure une comparabilité entre des bâtiments situés partout en Europe ;
- les cartographies de risques à l'échelle française sont déclinées aux horizons 2020, 2030, 2050, 2070 et 2090. La maille de la cartographie est de 8 km, la précision est donc meilleure, cependant cette cartographie n'assure une comparabilité qu'entre des bâtiments situés en France.

Indicateurs pour l'évaluation de l'exposition aux chaleurs

Pour évaluer l'exposition au risque de chaleurs, il convient de considérer, à l'adresse du bâtiment, des indicateurs traduisant la durée et fréquence des vagues de chaleur, leur intensité, mais aussi les indicateurs traduisant une modification du climat existant. Tous les indicateurs décrits ci-dessous s'appuient sur les modélisations du GIEC.

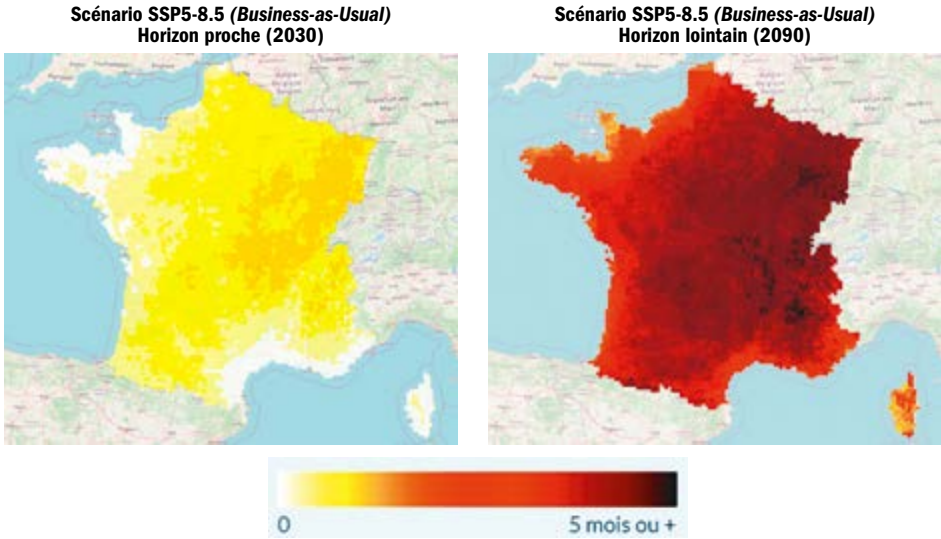


Figure E 5 : Nombre de jours de vagues de chaleur/an.

Source : Données Drias les futurs du climat ; traitement : Bat-ADAPT.

Cet indicateur traduit des fréquences et/ou durées de périodes chaudes de plus en plus importantes, et donc une dégradation du confort thermique. Toute la moitié sud de l'Europe est très concernée par la variation de cet indicateur.

D'autres indicateurs sont mis à disposition de l'utilisateur, tels que : le changement dans les températures maximales (°C), l'anomalie des maximums des températures maximales (°C), le nombre de nuits anormalement chaudes, le nombre de jours de vague de chaleur...

Cette évaluation de l'exposition des risques climatiques, à l'aide de plusieurs indicateurs, est complétée par la prise en compte des phénomènes d'îlots de chaleur urbain, sur 42 métropoles de France, et dont les données issues du projet MApUCE, coordonné par le Centre national de recherche météorologique.

À chaque adresse, un indice de risque est déterminé à partir de ces indicateurs, afin de permettre de comparer le niveau d'exposition au risque à une adresse par rapport aux autres zones. Ces analyses sont notamment utilisées par les acteurs de l'immobilier dans le cadre de processus d'acquisition.

Vulnérabilité des bâtiments face à l'aléa chaleurs

Afin de connaître le risque réel encouru, l'analyse d'exposition au risque est complétée par une analyse de vulnérabilité du bâtiment, qui tient compte des caractéristiques techniques et d'usage des bâtiments étudiés. L'outil Bat-ADAPT propose de répondre à des questions relatives à ces caractéristiques et utilise ces informations

pour déterminer la vulnérabilité. Les questions concernent l'enveloppe du bâtiment (inertie thermique, isolation et types d'ouvertures), ses capacités de ventilation et rafraîchissement, ses espaces artificialisés et/ou verts et ses usages.

En croisant exposition au risque et vulnérabilité face à l'aléa chaleurs, une notation de 1 à 5 est attribuée à chaque bâtiment, permettant ainsi, au sein d'un parc immobilier, de prioriser les bâtiments à risque fort, et d'appliquer une stratégie d'adaptation basée sur la réduction de la vulnérabilité des bâtiments.

Les actions d'adaptation au changement climatique pour préserver le confort thermique

En fonction du profil de risque des bâtiments, les stratégies d'adaptation sont variables. Des actions à prioriser seront proposées à l'occasion des prochaines mises à jour de l'outil, parmi une liste non exhaustive présentée dans le Guide des actions adaptatives au changement climatique de l'Observatoire de l'immobilier durable. Parmi la liste de ces actions à mettre en place sur les bâtiments exposés à de fortes chaleurs, sont citées les choix de revêtements clairs pour les façades, toitures, et voiries, la végétalisation des mêmes surfaces, l'amélioration de l'isolation, inertie, ventilation et rafraîchissement, la protection des ouvertures, la prévention, communication et gestion des risques ainsi que la flexibilisation des pratiques.

Au service des acteurs de l'immobilier

Les acteurs de l'immobilier ayant un parc à gérer peuvent, sous réserve d'adhésion à l'association, accéder à un espace professionnel. Cet espace permet de disposer d'une base de données comportant les informations d'identification, techniques, et de risques climatiques pour tous les bâtiments importés. Une synthèse de patrimoine permettra également d'évaluer l'état de risque climatique d'un patrimoine immobilier dans son ensemble. Ces informations sont notamment essentielles pour répondre aux exigences de la Taxinomie européenne.

Perspectives de Bat-ADAPT au sein de la plateforme Resilience for Real Estate (R4RE)

Bat-ADAPT est disponible gratuitement sur la plateforme Resilience for Real Estate (R4RE), qui a pour objectif de fournir aux acteurs de l'immobilier des informations sur les divers volets de la résilience. Ceux-ci incluent le changement climatique, mais également la biodiversité, avec un outil à paraître fin 2022 : BIODI-Bat.

Guides de l'ADEME

Élodie Briche,

Agence de la transition écologique (ADEME)

Introduction

Le changement climatique est de plus en plus central dans les transformations et la gestion des territoires, en particulier des territoires urbains. La hausse globale des températures et l'intensification des aléas climatiques extrêmes, tels que les canicules (en intensité, durée et fréquence) auxquelles s'ajoute l'effet d'îlot de chaleur urbain, rendent les villes, leurs infrastructures et leurs populations, particulièrement vulnérables. Les villes, qui concentrent une population toujours plus nombreuse, tentent de lutter contre la surchauffe urbaine afin de maintenir ou améliorer les conditions de vie tout en réduisant leur empreinte écologique (ADEME, 2021a). Ces dernières années, plusieurs études nationales et internationales ont été réalisées à l'ADEME concernant les solutions de rafraîchissement urbain.

Le rafraîchissement est un levier majeur pour les villes dans un contexte de changement climatique et notamment d'intensification des canicules (ADEME, 2020). Les collectivités s'engagent de manière croissante, et ce partout dans le monde, dans la mise en œuvre de projets d'aménagement en lien avec la transition écologique des villes. La prise en compte de l'atténuation et de l'adaptation au changement climatique dans les documents de planification et dans les projets d'aménagement opérationnel reste néanmoins sommaire partout dans le monde. Les collectivités s'interrogent sur ce phénomène de surchauffe urbaine et mettent en œuvre des solutions de rafraîchissement dont certaines contribuent à l'adaptation au changement climatique. En effet, les retours d'expérience présentés dans le recueil montrent que les solutions vertes mises en œuvre sont des solutions d'adaptation fondées sur la nature (SAfN). Les territoires s'adaptent aux effets du changement climatique en limitant leurs vulnérabilités. L'aménagement est un levier d'adaptation aux risques climatiques, tels que les inondations, qui peuvent évoluer avec le climat futur. À titre d'exemple, l'aménagement des berges d'un cours d'eau peut à la fois lutter contre le risque d'inondation et également contribuer au rafraîchissement urbain actuel et futur. Certaines solutions sont mises en place rapidement pour pallier l'urgence climatique et ne sont pas forcément réfléchies en termes de durabilité, en cohérence avec les temporalités climatiques. Par exemple, le recours massif au végétal peut être dans certains cas contradictoire avec l'augmentation des périodes de sécheresse et la raréfaction de la ressource en eau.

Les types de solutions de rafraîchissement urbain (ADEME, 2021b)

Selon l'Agence européenne de l'environnement (AEE), la grande variété de solutions rafraîchissantes existantes peut être classée de la façon suivante (classification de 2013) :

- les solutions vertes et bleues ;
- les solutions grises ;
- les solutions douces : elles désignent l'accompagnement des changements de comportement, d'usages et de pratiques de l'humain en ville (non développées ici). Ces solutions invitent à mener une réflexion sur leur utilisation optimale à travers le monde en fonction notamment des diversités climatiques. Leur efficacité dépend en effet grandement des contextes climatiques, géographiques et topographiques dans lesquels elles sont implantées. Certains dispositifs rafraîchissants reconnus comme efficaces dans les zones tempérées ne sont ainsi pas adaptés dans des territoires au climat plus chaud et aride (ADEME, 2021a).

● La végétalisation

La végétalisation est une solution de rafraîchissement régulièrement utilisée dans les projets d'aménagement urbain. Elle fonctionne grâce à l'action conjointe de deux phénomènes : l'évapotranspiration et l'ombrage.

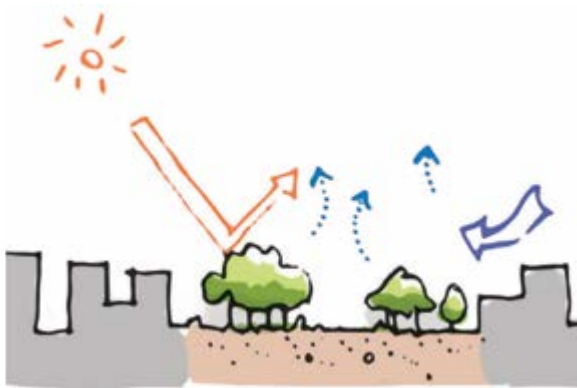


Figure E 6 : Mécanismes physiques en jeu : évapotranspiration, ombrage, absorption du rayonnement solaire.

Source : ©TRIBU/ADEME.

L'évapotranspiration désigne un phénomène physique de changement d'état de l'eau liquide présente dans les végétaux, qui s'évapore au contact de l'air en passant par les feuilles et le sol. Ce phénomène de changement d'état entraîne la diminution de la température ambiante. Un arbre mature peut transpirer jusqu'à 450 litres par jour (Johnston et Newton, 2004). L'ombrage offert par les végétaux permet quant à lui de créer des espaces de fraîcheur pour les urbains, puisque la canopée capte entre 60 et 98% de l'énergie solaire (Giguère, 2009). Couplé au rafraîchissement créé par l'évapotranspiration, il a un effet bénéfique sur le confort thermique et sur la diminution de la température ambiante. La combinaison de différentes strates de végétation maximise le potentiel rafraîchissant et diversifie

les cobénéfices pour la biodiversité. On peut par exemple considérer la combinaison de trois strates végétales : herbacée, arbustive et arborée, qui agiront en synergie pour le rafraîchissement.

Points forts et points de vigilance

La végétalisation des espaces urbains est une solution très intéressante puisque, outre sa qualité d'agrément des villes, elle permet de nombreux cobénéfices. On retrouve parmi eux l'augmentation du bien-être des urbains (Reeves-Latour, 2017) et des effets bénéfiques sur leur santé (Beaudoin et Levasseur, 2017), la sauvegarde de la biodiversité (Clergeau, 2018), la séquestration du carbone et la limitation de la pollution avec la filtration de près de 85% des particules polluantes dans l'atmosphère (Johnston et Newton, 2004). Tous ces cobénéfices confèrent à la végétalisation une place importante dans les opérations d'aménagement. Il faut cependant conserver une vigilance quant à l'opportunité de son application dans les différents contextes climatiques. Le type de climat, actuel comme futur, a un impact important sur la capacité des végétaux à se développer et à résister. De plus, les plantes les plus résistantes aux épisodes de sécheresse sont les moins efficaces dans la lutte contre la surchauffe urbaine, puisqu'elles transpirent peu. C'est par exemple le cas des plantes grasses, particulièrement résistantes aux climats chauds et arides puisqu'elles stockent l'eau et transpirent très peu. Il s'agit alors de bien déterminer les essences plantées afin de garantir leur survie et leur bon développement pour les années à venir. L'état des sols enfin, est un paramètre déterminant du succès d'une opération de végétalisation, car il ne permet pas toujours aux végétaux d'absorber les nutriments nécessaires à leur croissance (ADEME, 2021a).

● *Les solutions bleues*

La gestion de l'eau en ville, ou hydrologie urbaine, constitue un ensemble de solutions au fort potentiel rafraîchissant. Le cycle naturel de l'eau est perturbé par les activités anthropiques, et notamment par l'urbanisation et l'imperméabilisation des sols. Il s'agit alors de réintroduire ce cycle dans nos espaces urbains, pour permettre le phénomène d'évaporation responsable de l'effet rafraîchissant.



Mécanismes physiques en jeu : évaporation, vents, absorption du rayonnement solaire
©TRIBU/ADEME

Figure E 7 : Mécanismes physiques en jeu : évaporation, vents, absorption du rayonnement solaire.

Source : © Tribu/ADEME.

Au contact des rayonnements solaires, l'eau liquide présente dans les cours d'eau, les plans d'eau, les fontaines et les sols s'évapore. L'énergie consommée durant ce changement d'état fait baisser la température ambiante (Volker *et al.*, 2013). L'effet rafraîchissant est ressenti aux abords des espaces aquatiques, c'est pourquoi il est intéressant d'aménager ou de réhabiliter leurs rives afin de permettre aux urbains de fréquenter ces espaces frais (ASTEE, 2020). Le rafraîchissement permis par la (ré) introduction de l'eau dans la ville est parfois un objectif secondaire des opérations urbaines. Les aménagements de gestion du risque inondation par exemple, sont susceptibles d'avoir pour cobénéfice un effet sur le rafraîchissement.

Points forts et points de vigilance

Comme la végétalisation, la présence d'eau en ville est vectrice de nombreux cobénéfices liés à la qualité des espaces. De plus, les solutions bleues se conjuguent aux solutions vertes et grises de manière intéressante : la présence d'eau encourage l'évapotranspiration des végétaux, l'arrosage des surfaces de voirie est une méthode japonaise ancestrale de rafraîchissement (Solcerova *et al.*, 2018), et le potentiel rafraîchissant de la ventilation naturelle est maximisé par la présence de masses d'eau. L'utilisation de solutions bleues pour rafraîchir la ville est cependant grandement conditionnée au contexte hydro-climatique de chaque territoire. Si le potentiel rafraîchissant de l'eau est élevé dans les villes au climat sec, son utilisation est coûteuse en ressources. Le recours à un apport d'eau extérieur doit être limité, et la valorisation de l'existant encouragée. La présence naturelle de cours d'eau et la proximité du littoral sont également des facteurs déterminants. Enfin, il est important de noter les risques sanitaires liés à la présence d'étendues d'eau stagnante qui peuvent être vectrices de maladies et d'espèces nuisibles, comme le moustique tigre (GRAIE, 2013).

● **Les solutions grises**

Les solutions grises pour le rafraîchissement urbain regroupent l'action sur les matériaux utilisés dans la construction de la voirie et des bâtiments, ainsi que les questions de typomorphologie (l'analyse des formes urbaines, de la trame viaire¹, des volumes et de l'implantation du bâti... (ADEUS, 2014)). Les matériaux utilisés dans les villes sont en grande partie responsables du phénomène d'ICU. Dans nombre de villes modernes, les revêtements des routes sont noirs et asphaltés, et les toitures couvertes de matériaux sombres (Gilbert *et al.*, 2017). Le comportement des matériaux dépend de leurs propriétés thermiques et de leur couleur. En cas de forte émissivité, ils peuvent contribuer à augmenter significativement les températures ambiantes, notamment la nuit (Akbari *et al.*, 2009). Dans un objectif de rafraîchissement, il s'agit alors d'étudier les propriétés des matériaux face au soleil. L'albédo est un premier indicateur incontournable. Il correspond à la part d'énergie solaire réfléchi vers l'espace quand elle atteint une surface. Plus il est élevé, plus la surface est réfléchissante, moins elle absorbe de rayonnement solaire et moins elle émet de chaleur.

1. Le réseau viaire est le réseau formé par toutes les voies de circulation qui desservent une ville, des autoroutes urbaines aux venelles, rues privées, impasses, en passant par tous les types de rues.

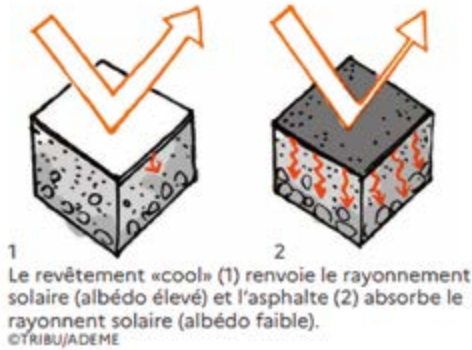


Figure E 8 : Le revêtement « cool » (1, à gauche) renvoie le rayonnement solaire (albédo élevé) et l'asphalte (2, à droite) absorbe le rayonnement solaire (albédo faible).

Source : © Tribu/ADEME.

L'organisation de l'espace urbain bâti et non bâti et l'étude de la typomorphologie ont un impact sur la température des villes. La densité des volumes bâtis et leur distribution sur la trame viaire peuvent bloquer la circulation de l'air, entraînant des effets canyon et la surchauffe des rues. En adoptant une réflexion multiscale afin d'imbriquer les échelles de l'aménagement du territoire, de la ville, du quartier et de chaque îlot, il est possible d'agir pour le rafraîchissement de la ville (Akbari, 1999). Il s'agit alors d'étudier l'orientation de la trame viaire pour favoriser la ventilation naturelle de la ville, et protéger les rues d'un trop fort ensoleillement.

Points de vigilance

Agir sur la typomorphologie des villes et sur les matériaux utilisés pour leur construction peut s'avérer délicat. Dans les pays grandement urbanisés, la ville de demain est déjà construite en grande partie, et il est difficile d'agir dessus. Il est en revanche possible d'agir sur les revêtements pour améliorer les propriétés thermiques des matériaux. Il est possible d'installer des solutions grises pour le rafraîchissement dans tous les types de climat, même si leur efficacité varie légèrement en fonction du contexte. La ventilation facilitée par les formes urbaines par exemple est grandement conditionnée par l'existence de brises naturelles, la présence de masses végétales et de plans d'eau. Les revêtements frais, à albédo élevé, sont quant à eux, efficaces dans les villes au climat chaud et à fort ensoleillement. Enfin, l'aménagement qui modifie les typomorphologies et les matériaux des villes n'est pas anodin pour leur apparence. Le changement de couleur des surfaces notamment peut avoir un impact esthétique important, ainsi que sur le confort visuel des urbains. Les surfaces non horizontales peuvent réfléchir les rayonnements solaires sur d'autres surfaces de la ville, et ainsi uniquement déplacer le problème. La question des usages des espaces traités par les revêtements frais notamment est primordiale. Les grands parkings urbains qui ne sont pas utilisés en continu, comme les parkings de zones commerciales, stades ou centres des congrès sont des candidats idéaux (Chester *et al.*, 2015). Comme le revêtement blanc des espaces publics qui peut prendre plusieurs formes, l'utilisation de la typomorphologie à des fins rafraîchissantes passe également par plusieurs canaux :

- l'action sur les trames aérauliques² et sur l'emprise au sol pour favoriser la circulation de l'air à l'échelle de l'îlot (fiches La Possession, Zenata, Bruxelles, Bouéni, ADEME, 2021b);
- l'action sur l'orientation de la trame viaire pour protéger de l'ensoleillement (fiches Dakar, Tétouan, La Possession, Zenata, ADEME, 2021b); Les toitures blanches, à albédo élevé ou « *cool roofs* » (fiches Ahmedabad, Penrith, ADEME, 2021b);
- les revêtements à l'albédo élevé sur les voiries ou « *cool pavements* » (fiche Los Angeles, ADEME, 2021b).

L'utilisation de matériaux à forte inertie thermique dans les bâtiments (fiches Dakar, Tétouan, ADEME, 2021b) fréquentés par des piéton(ne)s peut induire des effets pervers. Outre l'éblouissement mentionné plus tôt, il peut diminuer le confort thermique en augmentant la température corporelle des passants. Ces derniers absorbent en effet les rayonnements réfléchis par le sol (Middel et Turner, 2020).

Applications et phénomènes en jeu suivant les solutions possibles

La grille de lecture (figure E 9) présente de façon simplifiée si les solutions proposées sont applicables à l'échelle de la ville, de l'espace public ou du bâtiment. La figure E 9 présente également quels phénomènes entrent en jeu lors de l'utilisation de telles ou telles solutions.

Par exemple, la mise en œuvre d'une toiture ou d'une façade végétalisée est possible à l'échelle du bâtiment. La toiture végétalisée va chercher à améliorer l'inertie thermique, l'ombrage et l'évaporation alors que la façade végétalisée ne va agir que sur l'ombrage et l'évaporation.

2. Par analogie avec la trame d'une étoffe, la trame aéraulique désigne le réseau et le maillage d'écoulements d'air identifiables dans une ville. L'étude de la trame aéraulique permet de comprendre les écoulements d'air dans la ville et ainsi les potentiels rafraîchissants de la ventilation naturelle.

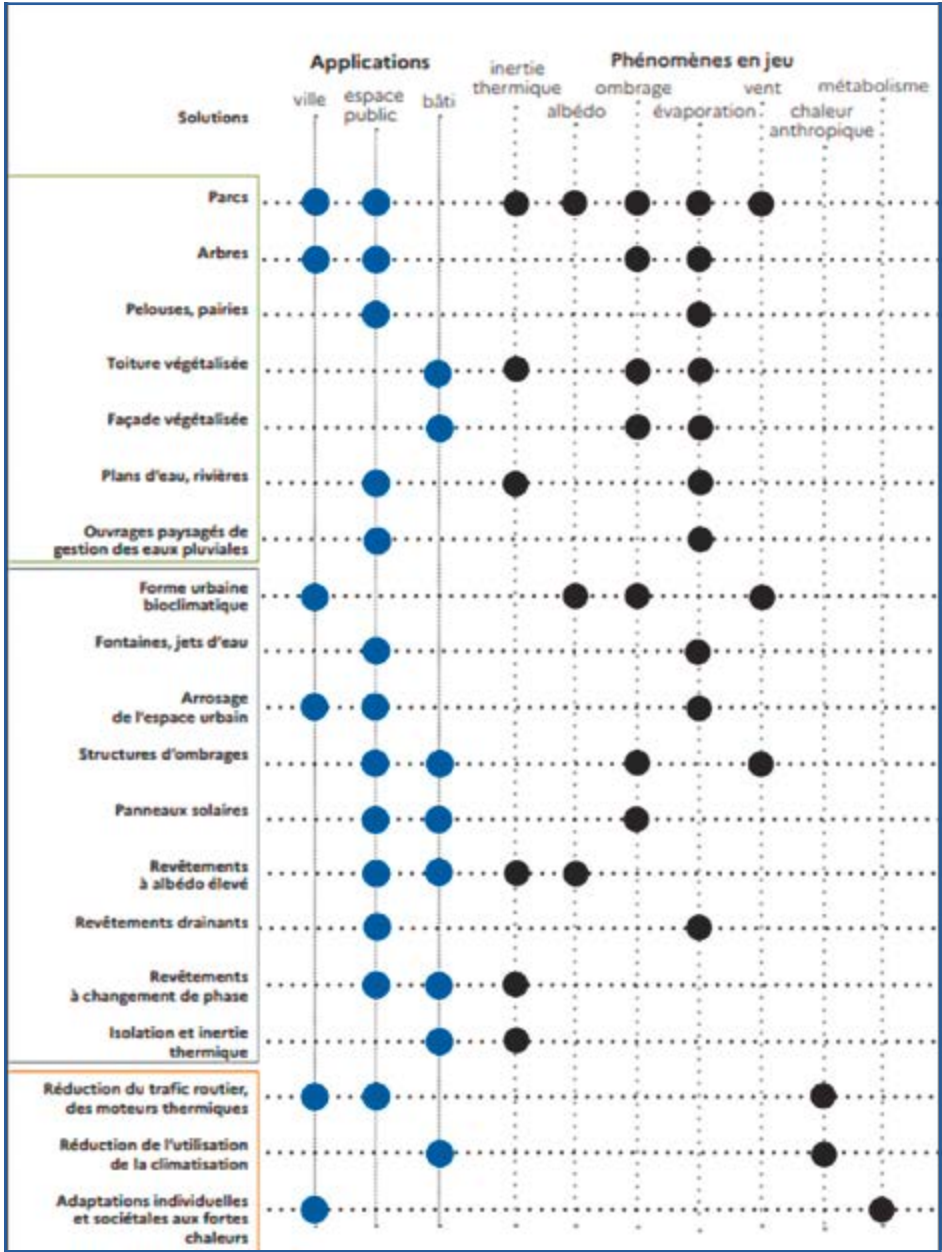


Figure E 9 : Applications et phénomènes en jeu suivant les solutions possibles.

Source : © Tribu/ADEME.

Efficacité des solutions de rafraîchissement urbain

La grille de lecture (figure E 10) décrit l'effet de rafraîchissement de chaque solution. Elle résulte d'une analyse croisée de l'ensemble des résultats des études et des publications.

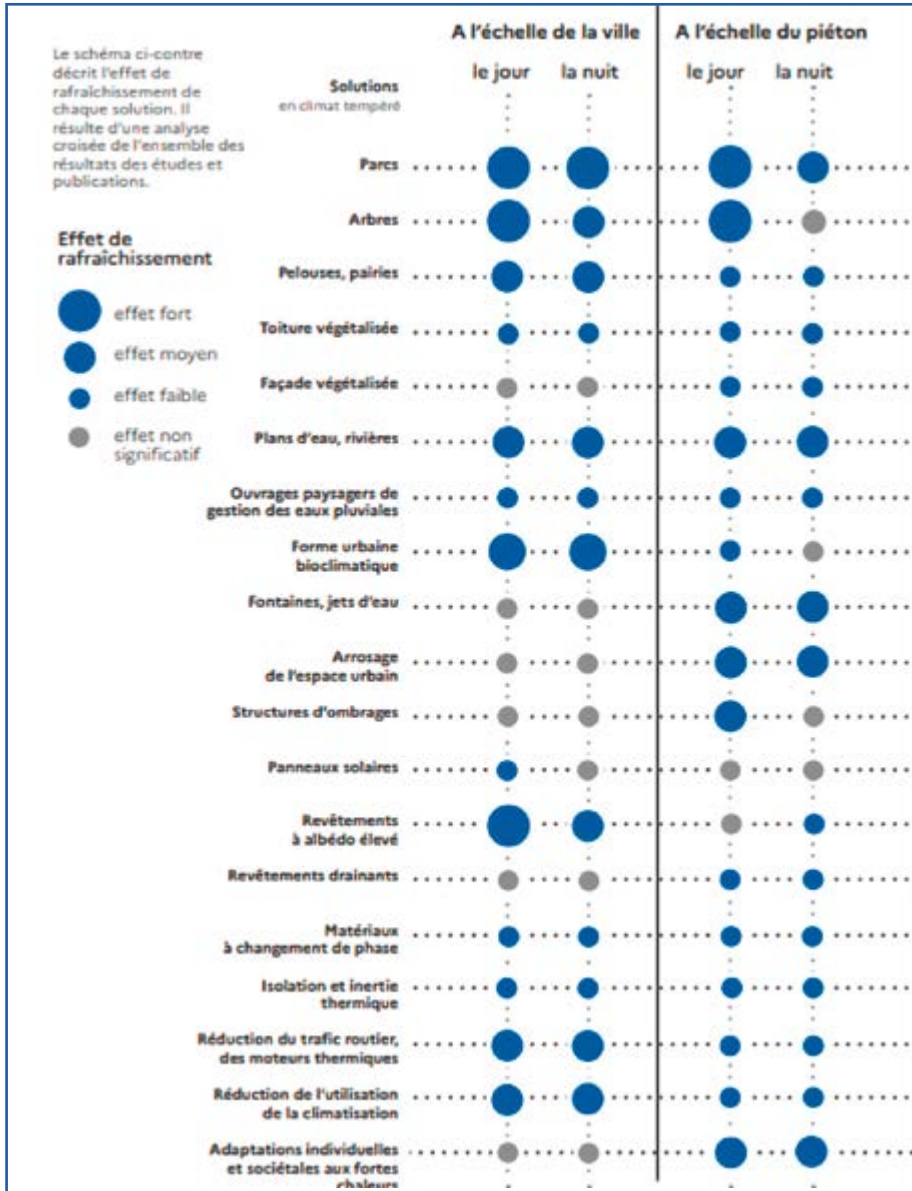


Figure E 10 : Efficacité, à l'échelle de la ville et à l'échelle du piéton, des solutions proposées.

Source : © Tribu/ADEME.

Conclusion

Du fait des vagues de chaleur de plus en plus nombreuses, les collectivités et les acteurs opérationnels (maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre...) s'engagent de plus en plus vers des actions de rafraîchissement urbain.

Par ailleurs, il n'existe pas de solution ou de combinaisons de solutions de rafraîchissement systématiquement applicables à l'ensemble des situations. Les résultats espérés de chaque solution sur le climat urbain diffèrent selon le contexte urbain dans lequel ils s'insèrent. Aussi, une analyse fine du contexte, des enjeux et des impacts attendus de chaque projet reste indispensable pour choisir les solutions de rafraîchissement les mieux adaptées.

Enfin, la prise en compte des cobénéfices et des effets indirects de chaque solution, en plus de son impact climatique, permet d'assurer un meilleur bilan global en faveur de la transition écologique.

Si de nombreux travaux de recherche ont été menés ces dernières années, il reste encore difficile de quantifier l'efficacité de ces solutions. Il convient donc encore de multiplier les expérimentations et les démarches d'évaluation, et de capitaliser des données chiffrées qui permettront de consolider les connaissances pour les villes et les climats français.

Adapter la France au changement climatique : de combien parle-t-on ?

Guillaume Dolques et Vivian Dépoues,
Institut de l'économie pour le climat (I4CE)

Introduction

Des politiques d'adaptation au changement climatique et de prévention et de gestion des risques existent déjà en France et de premières mesures ont déjà été prises pour répondre aux impacts du changement climatique dans plusieurs secteurs. Parmi les plus récentes, il est possible de citer non exhaustivement les Assises de l'eau, les Assises de la forêt, l'annonce d'un fond de renaturation des villes, la réforme de l'assurance agricole... Ces dynamiques s'inscrivent notamment dans le cadre des plans nationaux d'adaptation au changement climatique (PNACC 1 et 2) et peuvent s'appuyer sur un solide socle de connaissances et de méthodologies développé depuis plus de vingt ans notamment sous l'impulsion du fonds de recherche GICC (Gestion et impacts du changement climatique) démarré en 1999 et rendu depuis accessible grâce au Centre national de ressources pour l'adaptation au changement climatique (CRACC).

Cependant, mettre pleinement en œuvre ces politiques et aller au-delà d'actions réactives et incrémentales nécessite de mobiliser des moyens, financiers et humains, à la hauteur des enjeux. L'Institut de l'économie pour le climat (I4CE), association experte de l'économie et de la finance dont la mission est de faire avancer l'action contre les changements climatiques, a dressé en 2022 un premier état des lieux consolidés de ces besoins (I4CE, 2022). Parmi les onze grands « chantiers de l'adaptation » sur lesquels revient ce rapport, plusieurs visent directement à mieux anticiper les futures vagues de chaleur. Il s'agit notamment de l'adaptation des bâtiments à des vagues de chaleur plus longues, du renforcement de la robustesse des infrastructures de transport ou d'énergie pour en assurer la résilience dans un contexte de plus grande variabilité climatique, ou encore de la transformation des espaces urbains pour diminuer l'effet d'îlot de chaleur.

Ce chapitre revient sur les montants associés aux principales mesures en lien avec les vagues de chaleur à mettre en place dès maintenant pour mieux se préparer et sur les éléments de chiffrages disponibles permettant de mieux organiser les discussions sur les choix collectifs qui restent à faire sur les trajectoires d'adaptation à suivre.

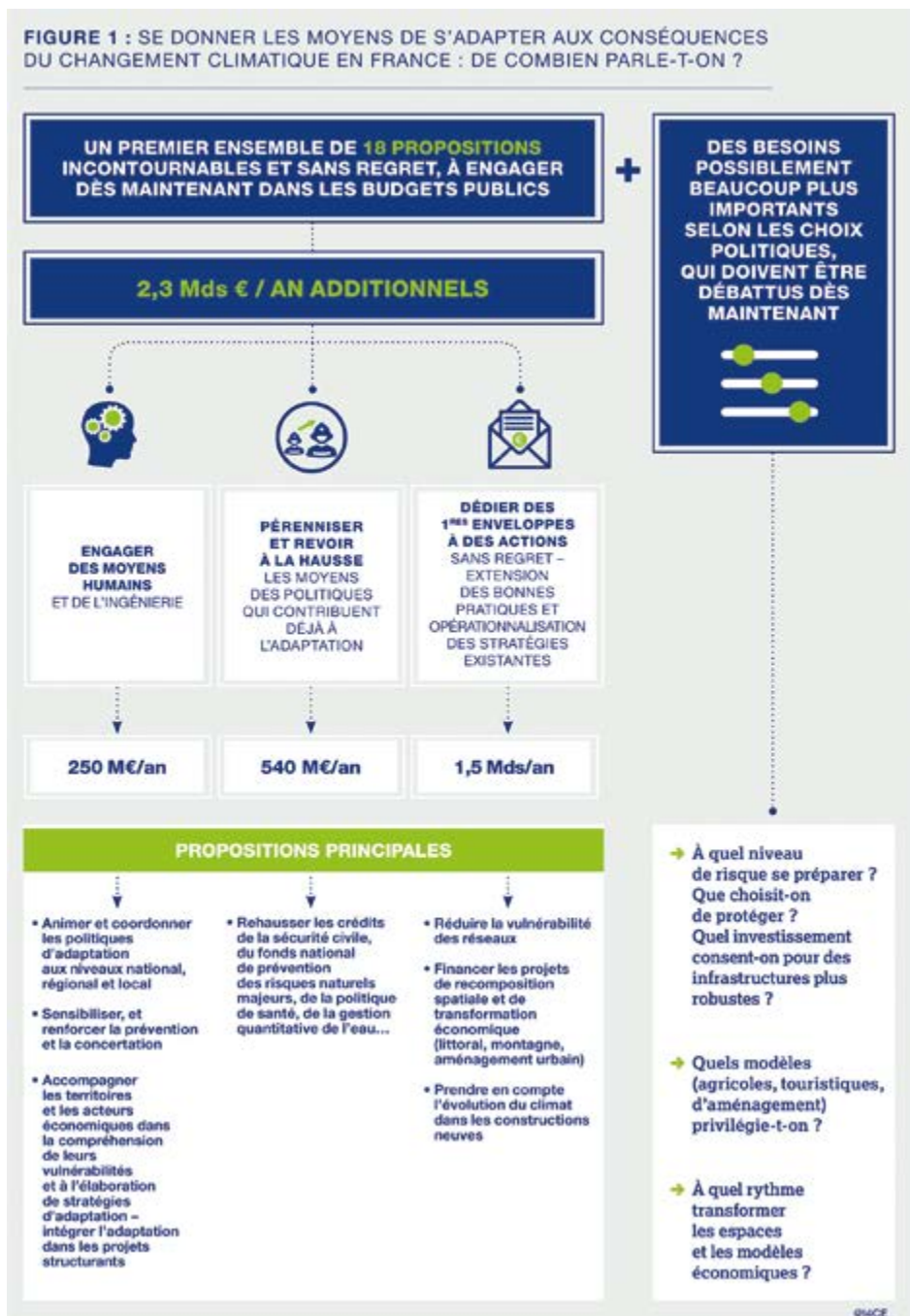


Figure E 11 : Se donner les moyens de s'adapter aux conséquences du changement climatique en France : de combien parle-t-on ?

Source : I4CE.

Des premières mesures à mettre en œuvre dès aujourd'hui

Tous chantiers d'adaptation confondus (relatifs aux principaux domaines d'actions affectés par différents impacts du changement climatique dont, mais pas seulement, les vagues de chaleur), I4CE propose un ensemble de dix-huit mesures budgétaires nationales qui pourraient être prises dès à présent pour un montant cumulé additionnel de 2,3 Md€/an.

Ces mesures ont vocation à répondre à trois objectifs :

Répondre aux urgences déjà constatées, en proposant des actions ciblées, par exemple pour traiter les points critiques de vulnérabilité sur les transports de réseaux lors des périodes de fortes chaleurs, ou renforcer la prise en compte des vagues de chaleur dans la construction neuve et la rénovation des bâtiments.

S'assurer que les décisions d'investissements publics prises à partir de maintenant tiennent bien compte du contexte d'évolution du climat. Notamment parce que ces investissements concernent souvent des actifs à longue durée de vie et que ne pas prendre en compte le changement climatique c'est prendre le risque de pérenniser ou de renforcer des vulnérabilités, voire devoir réinvestir plus tôt que prévu.

Préparer des transformations plus structurelles, car dans certaines situations, les effets du changement climatique obligeront à aller au-delà de simples ajustements ou adaptations incrémentales. Des transformations plus profondes devront alors être envisagées.

En ce qui concerne la préparation aux vagues de chaleur, ces mesures immédiates et sans regret correspondent à deux principaux types de dépenses essentielles :

• *Financer l'animation, l'ingénierie et le pilotage des politiques d'adaptation*

Les précédents travaux d'I4CE (I4CE, 2021 ; I4CE et Ramboll, 2022) ont démontré que c'est souvent la difficulté à dédier les moyens humains nécessaires qui est bloquante pour prendre en compte l'adaptation de manière systématique. Ces besoins représentent des montants relativement faibles, pourtant ils sont paradoxalement très insuffisamment engagés aujourd'hui. Il s'agit alors de rapidement améliorer l'animation et le pilotage de la politique d'adaptation en France, avec des besoins à la fois de gouvernance transverse mais aussi des besoins spécifiques à chaque chantier et politique publique pour que la question de l'adaptation ne soit plus oubliée.

En matière de gouvernance transverse, des moyens sont nécessaires à tous les niveaux de l'action publique car ils ont tous un rôle à jouer. Au niveau national, avec le renforcement des équipes dédiées à la politique de l'État et de ses relais dans les administrations déconcentrées mais aussi *via* l'appui des opérateurs techniques, tels que l'ADEME, Météo-France, Santé publique France, l'OFB, le CEREMA, etc. Au sein des collectivités, car l'élaboration d'une stratégie, puis sa mise en œuvre requièrent des moyens humains importants, notamment parce que c'est un sujet très transversal qui concerne de multiples services (ex. ; eau, urbanisme, espaces verts, affaires sociales...), ce qui demande de la coordination et la mobilisation des différentes directions métiers.

Des besoins plus spécifiques sont également nécessaires pour accompagner certaines évolutions de pratique vers une meilleure intégration de l'adaptation dans des domaines d'activité variés. Il s'agit par exemple de donner aux gestionnaires d'infrastructure des moyens de connaître leurs vulnérabilités et de piloter l'adaptation, de renforcer les réseaux d'animation préexistants sur la thématique de l'adaptation des bâtiments aux vagues de chaleur, ou encore d'équiper les programmes de renouvellement urbain existant de moyens d'ingénierie leur permettant d'intégrer l'adaptation à la conception des opérations qu'ils soutiennent.

Tableau E 1 : exemples de mesures concernant les besoins d'ingénierie, de capacité d'animation et des moyens humains.

Piloter et animer les politiques d'adaptation aux niveaux national, régional et local		
Proposition	Budget associé (en M€/an)	Acteurs concernés identifiés à ce stade
Se doter de réelles capacités d'animation et de pilotage de la politique d'adaptation aux niveaux national, régional et local.	113	État et ses opérateurs (ONERC, ADEME, DREAL...), régions et acteurs régionaux, EPCI
Créer un dispositif de mutualisation des moyens pour le développement et l'animation des services climatiques	10	État, Météo-France et acteurs de la recherche
Anticiper et prévenir les effets du changement climatique sur la santé		
Financer un programme national de santé publique pour anticiper et prévenir les risques climatiques (recherche, campagnes de prévention, renforcement de la veille sanitaire)	2,5	État, Santé publique France, professionnels de santé, ARS
Repenser les villes pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain		
Équiper les programmes de renouvellement urbain existant de moyens d'ingénierie leur permettant d'intégrer l'adaptation à la conception des opérations qu'ils soutiennent	18	ANCT, ANRU, Banque des territoires
Tenir compte du climat futur lors de la construction et la rénovation des bâtiments		
Renforcer les moyens d'animation, de sensibilisation et de recherche appliquée en matière d'adaptation des bâtiments notamment aux vagues de chaleurs	31	État, ADEME, Plan et Réseau bâtiment durable
Garantir la résilience des réseaux et infrastructures d'importance vitale : transport, eau, énergie		
Doter les gestionnaires d'infrastructures et leurs autorités régulatrices des moyens de connaître leurs vulnérabilités et de piloter l'adaptation, notamment au sein de la gestion patrimoniale des réseaux	15	État, régions et gestionnaires d'infrastructures
Mettre en place et animer une instance de coordination des gestionnaires d'infrastructures	1,7	État, régions et gestionnaires d'infrastructures

Source : I4CE (2022).

● **Mettre à disposition des premières enveloppes dédiées à généraliser les meilleures pratiques d'adaptation**

Sur certains territoires et sur certains enjeux, il existe des stratégies d'adaptation déjà avancées et des bonnes pratiques en place. La diffusion de ces initiatives doit pouvoir être accompagnée et financée par la mise en œuvre d'enveloppes ou de fonds dédiés.

Il s'agit par exemple d'accompagner les collectivités à la mise en œuvre d'actions visant à réduire l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU) et à garantir des villes plus vivables pendant les périodes de forte chaleur *via* leur politique de végétalisation ou d'aménagement d'espaces de fraîcheur ; d'interventions pour renforcer la présence de l'eau en ville (fontaines, noues, brumisateurs...) ou de désimper-méabilisation des surfaces.

Il s'agit également, de renforcer la prise en compte de l'évolution du climat – et notamment des températures – dans la construction et la rénovation des bâtiments pour les rendre mieux exploitables et vivables lors des périodes de forte chaleur, en soutenant l'intégration de ces exigences dans les cahiers des charges de la commande publique – au titre de l'exemplarité de cette dépense – avant d'être, à terme, généralisées dans la réglementation.

Il s'agit enfin de financer certaines opérations ciblées, telles que les opérations permettant de rattraper les retards d'investissement et de résorber les principaux « points chauds » de vulnérabilité des infrastructures de transport déjà bien connus des gestionnaires.

Tableau E 2 : Exemples de mesures concernant les premières enveloppes dédiées à diffuser les pratiques d'adaptation de la France aux vagues de chaleur.

Repenser les villes pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain		
Proposition	Budget associé (en M€/an)	Acteurs concernés identifiés à ce stade
Pérenniser une enveloppe annuelle de soutien à l'extension des bonnes pratiques d'adaptation en ville	500	État, Banque des territoires, EPCI
Tenir compte du climat futur lors de la construction et la rénovation des bâtiments		
Prendre en charge le surcoût pour renforcer les exigences en matière de constructions durables et adaptées aux chaleurs futures dans la construction des bâtiments d'enseignement et de recherche.	500	État, collectivités
Garantir la résilience des réseaux et infrastructures d'importance vitale : transport, eau, énergie		
Prévoir une première enveloppe pour financer des actions ciblées pour traiter les points critiques de vulnérabilité sur les réseaux de transport	325	État, régions et gestionnaires d'infrastructures

Source : I4CE (2022).

Des besoins totaux qui dépendent de choix encore à faire

L'adaptation ne pourra pas se limiter aux mesures listées dans la section précédente, et des mesures complémentaires, éventuellement plus ambitieuses, voire des transformations plus radicales devront aussi être considérées. Parce qu'elles ont possiblement un impact budgétaire plus fort, mais aussi parce qu'elles peuvent être le reflet de différentes attitudes possibles à adopter face à l'évolution du risque climatique, ces actions-là doivent d'abord faire l'objet de priorisation et d'arbitrages politiques. Il s'agit donc d'ouvrir la discussion démocratique sur des sujets aussi fondamentaux que le niveau de risque que l'on est collectivement prêt à accepter lorsqu'un nouvel aménagement est décidé ; sur les activités ou les territoires que l'on souhaite protéger et ceux que l'on accepte de voir se transformer ou encore sur le niveau de solidarité entre territoires plus ou moins exposés.

● *Quel niveau de robustesse rechercher ?*

Le cas des infrastructures

Objectiver et intégrer explicitement la préoccupation d'adaptation au sein de la conception d'actifs à longue durée de vie (infrastructures, bâtiments, équipements, etc.) doit *a minima* permettre de garantir que les investissements publics déjà décidés n'augmentent pas la vulnérabilité et de gérer le risque.

Différentes options peuvent néanmoins se proposer pour faire encore mieux en faisant de ces investissements des opportunités pour renforcer proactivement la robustesse des infrastructures (de transport par exemple). Cela passe alors par des choix de conception (ex. : emplacement, tracé) ou des choix techniques (ex. : matériaux, technologie) efficaces dans une plus large gamme de conditions climatiques et par exemple capables de résister à des températures plus élevées. Ces choix peuvent présenter des surcoûts à mettre en perspective au cas par cas des enjeux (par exemple, des pertes d'exploitation qu'ils permettraient d'éviter, ou, dans le cas d'investissements publics, de dommages socio-économiques qu'ils permettraient de minimiser) et du niveau de risque jugé acceptable – qui peut être très différent d'un contexte à l'autre et faire l'objet de débats. S'il est par exemple raisonnable de faire en sorte qu'un nouvel EPR soit résilient (c'est-à-dire qu'il puisse résister et redémarrer) à toutes les éventualités, même les moins probables et peu importe le surcoût associé, il peut être envisageable d'accepter qu'un axe de transport puisse être occasionnellement coupé si une alternative existe.

Tableau E 3 : Questions à se poser et arbitrages à faire selon le type de chantier (extrait).

Chantier	Questions à se poser – arbitrages à faire
Infrastructures, réseaux de transport et réseaux électriques	Quel niveau d'investissement pour quel niveau de robustesse ? Quel niveau de service minimum garanti, y compris dans des situations extrêmes ? Quelle (s) situation (s) de service dégradé peuvent être acceptables dans certains contextes ? À quelles conditions ?

● Quelle(s) trajectoire(s) envisager ?

Dans certains cas, il ne sera à terme pas possible de se contenter d'ajustements à la marge et des transformations plus profondes devront être considérées. Dans de nombreux domaines, l'adaptation doit encore être mise en discussion pour que l'on s'accorde sur la forme des trajectoires d'adaptation à privilégier et le rythme de mise en œuvre des changements. Ces choix dépendront autant du niveau de changement climatique anticipé que de l'attitude que l'on choisira collectivement de privilégier face au risque : que choisit-on de conserver, quelles filières, quels territoires préfère-t-on transformer ? Chacune de ces questions est très politique et souvent, plusieurs alternatives sont possibles.

Le cas de la transformation urbaine

Il n'existe pas de définition univoque de ce que serait une ville adaptée au changement climatique. Pour lutter contre la chaleur, il existe une multitude de trajectoires envisageables. Il est par exemple possible d'investir massivement dans des solutions fondées sur la nature (végétalisation, cours d'eau) ou à l'inverse soutenir le déploiement des technologies de climatisation, chacune de ces trajectoires ayant des implications très différentes. Dans tous les cas, les espaces urbains devront connaître des transformations profondes pour rester vivables avec l'évolution prévue des températures, impliquant possiblement des reconfigurations complètes d'espaces urbains. Certains équipements essentiels (par exemple de transport urbain) pourraient avoir à être modifiés en profondeur pour rester utilisables dans un contexte de changement climatique. Ces transformations pourraient représenter des investissements très élevés – notamment lorsque la question de la prise en charge du coût du foncier se posera.

Tableau E 4 : Questions à se poser et arbitrages à faire selon les transformations à accompagner (extrait).

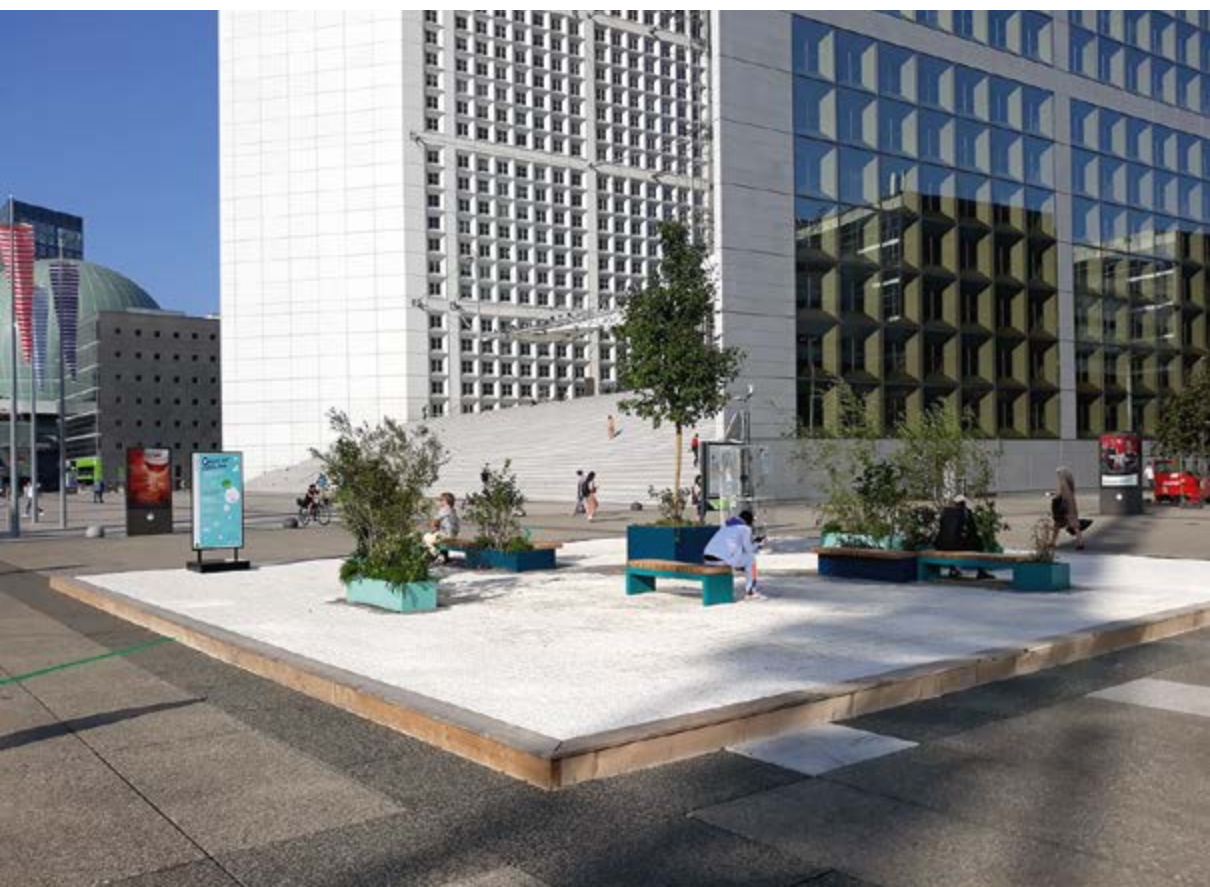
Transformations à accompagner	Questions à se poser – arbitrages à faire
Transformations des espaces urbains pour garantir l'habitabilité et l'attractivité des villes	Quelles sont les vulnérabilités précises de chaque territoire ? Quel niveau de risque accepter ? Des zones à repenser entièrement ? Des activités à relocaliser ?

Conclusion

La définition de l'ambition mais aussi de la forme de telles transformations ne pourra qu'être le résultat de discussions et d'arbitrages politiques en fonction de multiples objectifs (ex. : accès au logement, transition énergétique, attractivité économique), parmi lesquels l'adaptation au changement climatique ne doit pas être oubliée.

Chapitre F

Exemples de solutions d'adaptation aux vagues de chaleur



Des exemples de solutions sont présentés dans ce chapitre. Sans être exhaustifs, ils couvrent des domaines divers allant des revêtements clairs de bâtiments jusqu'à des réflexions au niveau des villes : sur un quartier en banlieue de Grenoble (Échirolles, 38) et d'un arrondissement de Paris (le 13^e). Les stratégies d'adaptation du secteur des transports sont également décrites dans le dernier article.

D'autres exemples de solutions d'adaptation aux vagues de chaleur sont accessibles en consultant le Centre de Ressources pour l'Adaptation au Changement Climatique présenté dans le chapitre précédent.

Les revêtements clairs

Élodie Briche,

Agence de la transition écologique (ADEME)

Les revêtements à albédo élevé tels que les toits blancs se caractérisent par le fait qu'ils réfléchissent fortement la lumière du soleil.

Ces revêtements sont souvent de couleur claire, pas systématiquement blancs. Ce sont des revêtements innovants dits « cool » avec un albédo¹ supérieur à 0,7, tels que des peintures réfléchissantes et thermochromiques (ADEME, 2021).

Dans un souci d'empreinte écologique, la composition de ces peintures doit être évaluée en amont d'un déploiement sur les toitures.

Cette solution de rafraîchissement urbain, relativement facile à mettre en œuvre, peut être combinée à d'autres solutions telles que les solutions vertes, bleues et douces, et même à d'autres solutions grises davantage centrées sur les formes urbaines. Elle peut s'avérer intéressante sur des zones industrielles lorsque les toitures sont en zinc ou à l'échelle des bâtiments d'entreprises avec des toitures foncées car elle permet une baisse de la température de surface de la toiture mais également un rafraîchissement de la température à l'intérieur des bâtiments, permettant de limiter les dépenses énergétiques en climatisation. La mise en place de cette solution grise de rafraîchissement doit être pensée également en fonction du contexte climatique : par exemple, dans des types de climats plus frais, différent du climat méditerranéen, un toit blanc peut entraîner une perte de chaleur compensée par des dépenses énergétiques en chauffage à l'automne. Cette solution peut être intéressante pour des bâtiments dont le besoin en climatisation est supérieur au besoin en chauffage, étant donné que les gains énergétiques sont relatifs à la saison d'été seulement.

L'entretien d'un toit blanc, d'un pavé blanc doit être également régulier et bien pensé dans le coût global de cette solution : en effet, l'effet réfléchissant peut rapidement diminuer si la peinture est sale, poussiéreuse, etc. Pour le sol, il est davantage préconisé des mosaïques de pavés drainants de différentes couleurs claires pour faciliter l'entretien des rues, etc.

1. Fraction de la lumière que réfléchit ou diffuse un corps non lumineux. Un corps noir possède un albédo nul. L'albédo de la Terre est de 0,3.

Plus fraîche ma ville

Élodie Briche,

Agence de la transition écologique (ADEME)

Le rapport du deuxième groupe du GIEC (2022) concernant l'adaptation au changement climatique confirme des craintes déjà établies : les canicules estivales seront plus fréquentes, longues et intenses et vont être le risque majeur en ville pour les décennies futures. Ces canicules présentent des enjeux à court terme en ville : sociosanitaires, notamment en termes de confort d'été/supportabilité, économiques, environnementaux ; mais aussi à long terme, avec des défis immenses à l'horizon 2050 en termes d'atténuation et/ou adaptation au changement climatique, sachant qu'il faudra composer avec une ville de demain déjà construite en grande partie. Ces canicules intensifient le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU, chapitre B) (considéré comme la différence de température entre le centre-ville et la campagne environnante) mais aussi la surchauffe urbaine (incluant les températures de surfaces très élevées de certains matériaux mais aussi l'inconfort thermique pour les individus).

Or, l'investigation menée durant l'été 2022 par l'ADEME et l'incubateur de services publics numériques beta.gouv.fr¹ confirme que les décisions politiques prises dans les collectivités en termes de lutte contre le phénomène d'îlot de chaleur urbain sont aujourd'hui peu éclairées notamment en ce qui concerne les mesures de rafraîchissement urbain, avec des actifs échoués : végétalisation desséchée, coûts d'entretiens élevés, solutions inadaptées au climat local, mal-adaptation, un manque de solutions (baignade dans les fontaines publiques car absence d'îlot de fraîcheur), une surconsommation de climatisation incompatible avec la transition écologique.

- La start-up d'État « Plus fraîche ma ville » portée par l'ADEME au sein de son incubateur « L'Accélérateur de la transition écologique » et soutenue par l'Association des maires de France a donc pour objectif d'accompagner les collectivités dans leurs choix de solutions pérennes et durables de rafraîchissement urbain.

1. <https://beta.gouv.fr/startups/rafraichir.les.villes.html>
<https://plusfraichemaville.fr/>
<https://presse.ademe.fr/2023/01/canicules-ilot-de-chaleur-urbain-lancement-de-la-start-up-detat-plus-fraiche-ma-ville-pour-eclairer-les-decideurs.html>



Figure F 1 : Copie d'écran du site plusfraichemaville.fr.

Source : <https://plusfraichemaville.fr/>

Un produit numérique est en cours de coconstruction avec les collectivités et sera disponible dès le printemps 2023 afin d'aider à la décision concernant les solutions de rafraîchissement urbain.

L'architecture bioclimatique et les constructions traditionnelles

Des leviers pour s'adapter au changement climatique

Marie Andrieux,

Observatoire de l'immobilier durable

Parmi les diverses approches préconisées pour faire face aux enjeux du changement climatique, l'architecture bioclimatique est présentée comme une solution avantageuse. Cette conception architecturale accorde une importance centrale à l'environnement immédiat du bâtiment, grand oublié des périodes modernes de construction. Par ailleurs, la réappropriation des savoirs traditionnels limite la standardisation des constructions et constitue un bon levier d'action. Des liens existent donc entre conception bioclimatique et architecture traditionnelle, toutes deux sources d'inspiration pour faire face au changement climatique.

L'architecture bioclimatique : de quoi parle-t-on ?

Un bâtiment à architecture bioclimatique est un bâtiment dont l'implantation et la conception prennent en compte le climat et l'environnement immédiat, afin de réduire les besoins en énergie et d'être mieux adapté aux risques climatiques. L'architecture bioclimatique vise également à utiliser le moins possible des moyens techniques mécanisés et de l'énergie extérieure au site.

Une architecture est considérée comme bioclimatique si elle remplit plusieurs de ces critères :

- L'orientation du site a été pensée afin de préserver le confort thermique d'hiver comme d'été, pour le climat d'aujourd'hui et des années à venir.
- Les matériaux utilisés pour la construction ou réhabilitation/rénovation sont de source naturelle (bois, paille, terre crue ou cuite, chanvre...).
- Des sources d'énergies renouvelables sont incorporées au bâtiment.
- Les risques climatiques sont pris en compte et le bâtiment y est adapté, avec une projection selon les scénarios du GIEC.
- Les moyens de chauffage et de rafraîchissement sont le plus sobres possible.

Face aux enjeux de l'adaptation au changement climatique, il est essentiel de renouveler nos méthodes de construction et de réhabilitation/rénovation, et l'architecture bioclimatique fait partie des solutions pertinentes.

Pourquoi l'architecture bioclimatique ?

L'architecture et le mode de vie modernes dépendent de nombreux systèmes tels que la climatisation, et de matériaux comme le béton, l'asphalte ou le verre. Mais, ces matériaux ne sont pas adaptés aux fortes chaleurs, et de tels systèmes de rafraîchissement sont eux-mêmes source d'émissions de gaz à effet de serre, entraînant des boucles de rétroaction aggravant l'impact du changement climatique sur le bâtiment.

L'architecture bioclimatique, un concept pas si nouveau

Les maisons bretonnes avec leurs murs de pierres et leurs toits adaptés aux pluies et aux vents, les maisons savoyardes et leurs isolations contre les durs hivers, ou encore les maisons méditerranéennes pensées pour résister aux chaleurs sont autant d'exemples d'architectures adaptées aux microclimats régionaux. Les maisons traditionnelles ne manquent pas de techniques et de ressources qui sont des sources d'inspiration utiles au développement de l'architecture bioclimatique.

Assurer le confort des habitants

L'un des objectifs principaux de l'architecture bioclimatique est d'assurer un confort thermique aux occupants du bâtiment, avec des techniques les plus sobres possibles. Ces objectifs sont atteints au travers de choix architecturaux spécifiques, et en utilisant des énergies renouvelables et des matériaux disponibles à proximité du site d'implantation du bâtiment. Pour maximiser le confort à l'intérieur du bâtiment, tout en préservant au mieux son environnement immédiat, plusieurs paramètres doivent être pris en compte au moment de la conception :

- L'orientation du bâtiment, qui doit particulièrement être considérée, afin d'exploiter au mieux l'énergie solaire.
- Le choix de l'emplacement du bâtiment, en fonction de la topographie, de la pollution sonore, de la proximité de ressources naturelles, ou du microclimat local.
- Les paramètres techniques tels que la surface vitrée, la mise en place de protections solaires, le type de matériaux utilisé ou encore la compacité du bâti.

L'optimisation de l'orientation climatique et les protections solaires extérieures

Le soleil d'hiver, dans l'hémisphère nord, se lève au sud-est et se couche au sud-ouest et reste bas dans le ciel, avec un angle de 22° au solstice d'hiver. En été, l'angle change. Le soleil se lève alors au nord-est et se couche au sud-ouest, en montant très haut durant la journée (un angle de 78° au solstice d'été).

- Les façades qui reçoivent le plus de rayons solaires l'été sont les façades et la toiture à l'est le matin, et les façades et la toiture à l'ouest le soir.
 - l'installation de protections solaires verticales protège du rayonnement solaire, car l'angle d'incidence des rayons solaires y est bas ;
 - l'augmentation de l'opacité des surfaces vitrées (avec des volets ou des filtres opaques sur le vitrage), ou l'ombrage d'une végétation caduque constituent également des protections contre la chaleur estivale.
- Les façades au sud du bâtiment restent fortement ensoleillées au cours de la journée, avec un angle d'incidence élevé des rayons solaires.
 - la protection des façades exposées au sud permet de lutter efficacement contre le réchauffement induit. Cette protection est assurée par des installations horizontales en débord, aux dimensions cohérentes pour bloquer le rayonnement solaire.

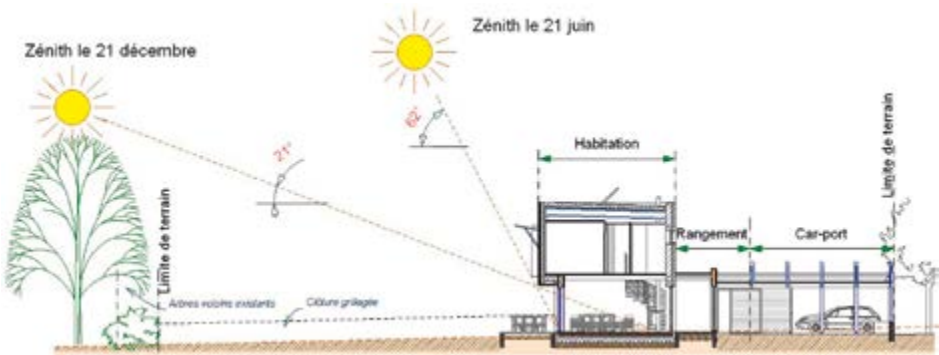


Figure F 2 : Angles d'incidence du soleil en été et en hiver.

Source : Flickr/Michèle Turbin.

L'installation de protections solaires assure donc le confort thermique dans le bâtiment tout en diminuant le besoin de rafraîchissement comme de chauffage.

● La végétalisation

Le végétal a une place centrale dans la conception bioclimatique des bâtiments. La végétalisation environnante au bâtiment produit un effet de fraîcheur grâce aux phénomènes d'évapotranspiration des plantes et de transpiration du substrat. Dans un contexte urbain dense, ces mécanismes favoriseront l'apparition d'îlots de fraîcheur.



Figure F 3 : Écran végétal déporté du bâtiment.

Source : © Arnaud Bouissou/Terra.

Par ailleurs, le végétal peut être utilisé dans le cadre de protections solaires extérieures, telles que les écrans ou murs végétaux déportés par rapport au bâtiment, qui permettent de filtrer les rayons solaires. La protection des façades grâce à de la végétation caduque installée près du bâtiment permet de laisser passer le soleil en hiver et ainsi de réchauffer le bâtiment à un moment de l'année où son rayonnement n'est plus délétère.

Des styles architecturaux adaptés aux risques climatiques

L'architecture bioclimatique permet de concevoir des bâtiments les plus adaptés possible à leur environnement microlocal. Les diversités de bâtiments retrouvées dans différentes régions ou pays en Europe rendent compte de traditions architecturales multiples ainsi que d'innovations techniques permettant de s'adapter aux conditions locales changeantes.

● *Les maisons méditerranéennes face aux chaleurs*

Dans certaines régions soumises à de fortes chaleurs, notamment dans le bassin méditerranéen, les bâtiments sont conçus pour lutter contre les longues chaleurs estivales. Les maisons peuvent par exemple être recouvertes de chaux blanche afin de conserver au mieux la fraîcheur (cf. figure F 4). En effet, la couleur blanche réfléchit la lumière, évite d'emmagasiner de l'énergie, rendant les maisons plus fraîches plus longtemps.



Figure F 4 : Maison blanche en Méditerranée.

Source : © Anaïs Duvernoy.

En Provence, les maisons sont équipées de volets extérieurs, que les habitants ouvrent et ferment selon l'ensoleillement pour limiter le réchauffement. Par ailleurs, les mas provençaux (cf. figure F 5) ont une taille de fenêtre réduite, réduisant ainsi le ratio de surface vitrée, ce qui permet de limiter le réchauffement induit par l'impact des rayons solaires.



Figure F 5 : Mas provençal aux fenêtres étroites.

Source : © Florence Duvernoy.

Une autre méthode utilisée de longue date pour réguler la température intérieure des bâtiments est la construction de murs épais à partir de matériaux ayant une forte inertie thermique. L'architecte autrichien Dietmar Eberle a repris ce principe pour concevoir des bureaux dans lesquels la température oscille entre 22 et 26 °C, quelle que soit la température extérieure (cf. figure F 6). Les murs extérieurs sont maçonnés de blocs de terre cuite et sont épais de 80 cm. Cette caractéristique confère au bâti une forte inertie thermique, capable de stocker la chaleur ou la fraîcheur pour les restituer ensuite. Les apports de chaleur sont fournis par les occupants, les équipements de bureautique et les apports solaires. Ce bâtiment n'a pas de système de chauffage ou de rafraîchissement mécanisé. La consommation d'énergie est donc diminuée, en régulant de manière efficace la température à l'intérieur du bâtiment, assurant ainsi le confort des habitants.



Figure F 6 : bâtiment 2226 conçu par D. Eberle.

Source : © WikimediaCommons.

● *Des systèmes de ventilation sobres et performants*

L'utilisation de techniques dédiées au rafraîchissement passif des bâtiments permet d'assurer le confort thermique en cas de forte chaleur en même temps que de garantir une consommation d'énergie minimale.

Dans des pays très chauds comme l'Iran ou l'Égypte, des constructions traditionnelles présentent des *bâdgirs* (cf. figure F 7) ou attrape-vents depuis plusieurs millénaires. Ces tourelles à vent sont une forme de climatisation écologique adaptée au climat aride et très efficace, et dont le dimensionnement dépend de la taille du bâtiment. Le vent s'engouffre par les ouvertures de la tour et descend le long du conduit jusqu'à la partie la plus basse (et la plus fraîche) du bâtiment. Ce conduit peut être équipé de jarres poreuses remplies d'eau, au travers desquelles passe le flux d'air, se rafraîchissant ainsi progressivement. L'air chaud, qui est plus léger, remonte en sens inverse au travers d'un deuxième conduit de la cheminée. Ce système est parfois complété d'un bassin d'eau situé à la base, ce qui baisse davantage la température de l'air.



Figure F 7 : Un bâdgir : système de refroidissement naturel typique du désert iranien.

Source : © Flickr/dynamosquito.

Cette méthode traditionnelle de rafraîchissement de bâtiment est réutilisée dans l'architecture moderne, et de nombreux bâtiments construits en Europe reprennent ce principe de tours à vent tels que l'université de Lanchester en Angleterre ou l'école Jaer en Norvège. Un exemple récent de construction s'appuyant sur le principe du tirage thermique

Conclusion

Le développement de l'approche bioclimatique en architecture permet de renouveler le regard sur les constructions traditionnelles. L'architecture bioclimatique intègre dans ses choix techniques des informations concernant les apports énergétiques issus du climat local, l'évaluation des risques climatiques et de leur évolution, ainsi que les conditions de l'environnement extralocal au bâti. La réappropriation des savoirs traditionnels permet de limiter la standardisation des constructions qui n'intègre pas les variations locales relatives aux lieux d'implantation des bâtiments. L'un des écueils à éviter dans la reproduction des choix architecturaux traditionnels est de négliger la variation climatique future. Il est important d'intégrer les prévisions climatiques, car les risques de mal-adaptation, notion mise en avant dans le dernier rapport du GIEC, se font sentir lorsque sont appliquées des techniques architecturales ancestrales dans des lieux où le climat est en forte évolution. Les changements à venir doivent conditionner l'utilisation de techniques originaires de régions dont le climat correspond au climat à venir, plutôt que de techniques provenant de régions dont le climat ne ressemble qu'à la réalité immédiate. Il est ainsi intéressant de construire dès aujourd'hui avec les techniques traditionnelles méditerranéennes dans des latitudes plus hautes, pour se protéger de la chaleur.

L'îlot de fraîcheur urbain, un exemple à Échirolles (38)

Des solutions d'adaptation fondées sur la nature :
l'exemple de la transformation de la cour et les abords
de l'école Marcel-David en îlot de fraîcheur urbain,
Échirolles (38).

Christophe Romero,

Directeur adjoint Ville durable, ville d'Échirolles

Éléments de contexte

Située en fond de vallée, au cœur de la métropole grenobloise, Échirolles (37 000 habitants) est particulièrement exposée au réchauffement climatique, deux fois plus rapide dans les Alpes qu'ailleurs en Europe, avec pour conséquences :

- la multiplication et l'intensification des épisodes de surchauffe estivale ;
- l'aggravation des phénomènes d'îlot de chaleur urbain (ICU) ;
- l'érosion progressive de la biodiversité (faune et flore) et des ressources en eau ;
- la détérioration des conditions de vie et de santé des habitants, particulièrement des publics les plus vulnérables (personnes âgées, malades, etc.).

Engagée de longue date dans une politique ambitieuse de transition écologique, la ville a entrepris, dès 2019, d'identifier et de caractériser avec l'aide d'un géographe climatologue les phénomènes d'îlot de chaleur urbain (ICU) et de surchauffe estivale à l'œuvre sur son territoire, pour s'adapter aux évolutions climatiques.

Un réseau de mesure, constitué d'une trentaine de capteurs couplés à deux stations météorologiques semi-professionnelles, a ainsi été déployé sur l'ensemble de la commune. L'analyse des données recueillies a permis d'établir une cartographie précise de l'ICU, et de déterminer les secteurs les plus exposés, en vue d'engager des actions prioritaires d'adaptation.

Parmi ces secteurs figure le quartier de la Ponatière, caractérisé par une forte minéralisation des sols, une faible fraction de végétation, ainsi qu'une grande fermeture du tissu urbain générant un important effet de « canyon », qui empêche la circulation des vents et contribue, avec les matériaux de sols, à piéger le rayonnement infrarouge.

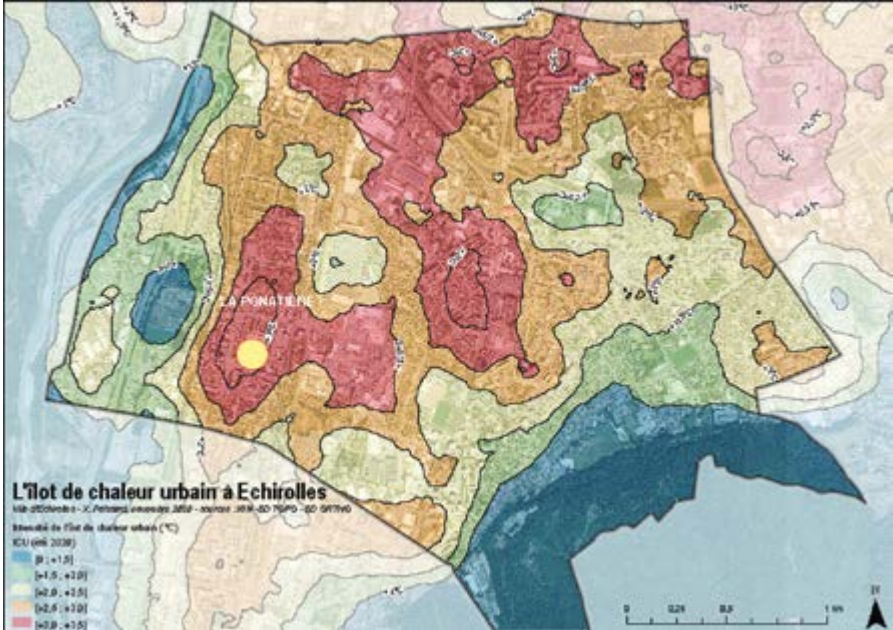


Figure F 8 : Carte de l'îlot de chaleur urbain à Échirolles (été 2020).

Source : © Xavier Foissard/ville d'Échirolles.



Figure F 9 : L'îlot Marcel-David avant les travaux en 2020.

Source : © Ville d'Échirolles.

Au cœur de la Ponatière, l'îlot formé par la cour de l'école élémentaire Marcel-David et ses abords (terrain de sport, pourtour d'un gymnase) a été identifié comme un site offrant, de par ses caractéristiques (superficie de 8300 m² environ, propriété de la ville), un terrain propice à l'expérimentation de solutions d'adaptation fondées sur la nature, susceptibles d'influer sur les phénomènes de surchauffe estivale et d'ICU observés à l'échelle du quartier.

Le projet de transformation de la cour et de ses abords en îlot de fraîcheur urbain

Lauréat en 2022 des premiers trophées de l'adaptation au changement climatique Life ARTISAN, le projet a pour objectif la transformation de la cour de l'école Marcel-David et de ses abords en un îlot de fraîcheur urbain de proximité.



Figure F 10 : Projet d'aménagement de la cour et des abords de l'école Marcel-David – plan de masse.

Source : © Romain Allimant paysagiste/ville d'Échirolles.

Répondant à des enjeux à la fois environnementaux, urbains, pédagogiques, mais aussi professionnels, l'opération a consisté à :

- désimperméabiliser les sols, en ramenant la part de surfaces minérales de 95% à 27%, l'enrobé originel étant remplacé par différents revêtements (sablé naturel, gazon, pavés enherbés, copeaux de bois) qui facilitent la captation et l'infiltration naturelle de l'intégralité des eaux de pluie (toitures et sol) pour limiter l'accumulation de chaleur mais aussi les apports et la consommation d'eau pour les végétaux. Les eaux de pluie récupérées en toiture de deux préaux permettent également d'alimenter une mare pédagogique ainsi qu'une cuve de stockage destinée à l'arrosage de jardins potagers ;
- renaturer très fortement les espaces avec une vingtaine d'essences diversifiées et adaptées à l'évolution du climat (érables, chênes, cyprès, aulnes, orangers des Osages, arbres de Judée, mûriers blancs, etc.), et préserver la trentaine d'arbres existants, afin d'offrir un lieu refuge pour la faune et la flore, avec :
 - la plantation de 90 arbres (hautes tiges et cépées), devant offrir à maturité un couvert végétal d'environ 4 600 m² (soit 55% de la superficie totale de l'îlot) ;
 - la plantation de 875 arbustes, pour constituer des haies notamment le long des clôtures ;
 - l'aménagement de 1 650 m² de pelouses et 875 m² de surface en copeaux de bois ;
 - la création de nouveaux habitats pour la faune : une mare de 60 m², une dizaine de nichoirs à oiseaux, un nichoir à chauves-souris, ainsi que deux hôtels à insectes ;



Figure F 11 : Chantier de plantation avec les enfants de l'école – novembre 2021.

Source : © Ville d'Échirolles.

- sensibiliser les différents publics et usagers de l'école et plus largement du quartier (élèves, parents, habitants) aux enjeux du réchauffement climatique, de la préservation des ressources en eau et de la biodiversité, avec :
 - l'installation, sur la clôture extérieure ceinturant l'îlot scolaire et pendant toute la durée des travaux, d'une exposition présentant le projet, accompagnée d'un parcours et d'un livret d'énigmes pour les enfants ;
 - des activités éducatives, accompagnées pendant deux années scolaires par France Nature environnement Isère, qui ont touché 200 enfants chaque année ;
 - un chantier de plantation d'arbres, arbustes et vivaces par les enfants, encadré par les entreprises et le service des espaces verts de la ville ;
 - l'aménagement d'un espace pour apprendre à jardiner ;
 - la création d'une mare pour observer la faune et la flore aquatiques ;
 - la constitution, enfin, d'un arboretum, pour valoriser le patrimoine arboré.
- **proposer des aménagements bénéficiant à un large public, en ouvrant davantage l'îlot sur son quartier**, tout en créant, après un travail sur les usages, une distinction entre des espaces contrôlés (cour d'école), des espaces semi-ouverts (terrain de sport, accessible aux élèves mais aussi aux habitants en dehors des temps scolaires), et des espaces totalement ouverts (allée et placette plantées) ;
- **faire évoluer les pratiques professionnelles** de conception et de gestion des espaces publics.



Figure F 12 : Mare pédagogique.

Source : © Ville d'Échirolles.

Conduite du projet et facteurs de réussite

Cette action concrète et intégrée, au service d'une stratégie globale d'adaptation au réchauffement climatique, a fait dès le départ l'objet d'un large consensus, d'un portage politique fort et d'une mobilisation constante des services communaux.

Sa réussite tient à la fois à :

- son inscription dans la « feuille de route » que constitue le plan climat air énergie territorial 2020-2026 de la commune (volet « adaptation »);
- l'implication des équipes pédagogiques dans la conception du projet;
- un pilotage technique en mode projet, avec la constitution d'une équipe dédiée réunissant différents services communaux concernés : directions de la ville durable (pilote du projet), des services techniques, de l'éducation, de la prévention et de la sécurité;
- la mobilisation de prestataires apportant des compétences complémentaires : paysagiste-concepteur (Romain Allimant), agence spécialisée dans les démarches de concertation et de communication (WZA), association de protection de la nature et de l'environnement pour l'accompagnement pédagogique (France Nature environnement Isère);
- la mobilisation de plusieurs sources de financement : Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse à travers l'appel à projets « Aménagez un coin de verdure pour la pluie » (projet lauréat en 2020), et l'État à travers le Plan de relance.

Suivi et évaluation du projet

Une évaluation de l'opération sur la durée va être conduite par l'équipe projet, portant sur :

- la pérennité et la facilité d'entretien des différents revêtements de sols, des mobiliers urbains mis en place, des espèces végétales implantées, etc. ;
- l'impact des aménagements sur l'intensité des phénomènes de surchauffe estivale et d'îlot de chaleur, avec la poursuite des mesures de température et l'analyse à intervalles réguliers des données recueillies ;
- les actions pédagogiques et d'animation en lien avec la biodiversité et le changement climatique ;
- les besoins d'ajustement en cas d'aggravation du phénomène d'îlot de chaleur : augmentation de la surface végétalisée du fait de la réversibilité de certains aménagements (plateau sportif).

Les résultats escomptés : à terme, les travaux réalisés doivent permettre d'abaisser l'intensité de l'îlot de chaleur urbain, aujourd'hui à un niveau élevé (pics à + 3,4 °C par rapport au point de référence), à un niveau modéré (entre + 1,8 et + 2,2 °C), beaucoup plus tolérable pour les habitants. Les aménagements doivent également favoriser le développement de la biodiversité, par la création d'un îlot fortement végétalisé : le site doit progressivement offrir un lieu de vie à différentes espèces (oiseaux, insectes, grenouilles et crapauds, chauves-souris) et un espace de transition vers l'un des plus grands parcs de la ville, distant de quelques centaines de mètres. Le couvert végétal doit fournir à terme de l'ombre et de la fraîcheur aux habitants.



Figure F 13 : La cour de l'école transformée en îlot de fraîcheur.

Source : © Ville d'Échirolles.



Figure F 14 : Vue aérienne de l'îlot Marcel-David après les travaux (juin 2022).

Source : © C. Weller/ville d'Échirolles.

D'ores et déjà, les aménagements ont permis d'ouvrir davantage l'îlot « scolaire » sur le quartier, autorisant une plus grande variété d'usages par différents publics et contribuant à faire de ce lieu un refuge de proximité pendant les épisodes de forte chaleur. Très bien accueillis par les enfants, leurs parents et les riverains, ils contribuent à l'amélioration du cadre de vie mais également à la revalorisation de l'image du quartier.

Le « démonstrateur » que constitue cette opération doit servir à la définition d'une stratégie de réplication progressive à d'autres cours d'écoles particulièrement exposées aux phénomènes de surchauffe estivale et d'îlot de chaleur urbain.

- *Chiffres clés :*

Calendrier de réalisation :

- études de cadrage/préopérationnelles : 2019-2020 ;
- études de maîtrise d'œuvre : 2020-2021 ;
- travaux d'aménagement : début juillet 2021-mars 2022.

Surface traitée : 8340 m² environ.

Budget : 1 100 000 € (TTC).

Subventions : agence de l'eau (413 191 €) et État (218 750 €).

Paris face aux vagues de chaleur

Les vulnérabilités et robustesses du 13^e arrondissement face aux vagues de chaleur

**Pauline Calvier, Justine Guérin,
Esther Loiseleur,**
Ville de Paris

Alexandre Florentin,
Conseiller municipal de Paris

Étudier la résilience du 13^e arrondissement de Paris aux vagues de chaleur

La ville de Paris vit déjà les conséquences du changement climatique, avec une vulnérabilité particulière aux vagues de chaleur. D'après le diagnostic climat publié en 2021 par la ville, le climat de Paris pourrait devenir l'équivalent de celui de Séville en 2050¹. Dans les décennies à venir, les vagues de chaleur vont se multiplier et atteindre des intensités inédites². Ces vagues de chaleur d'une ampleur inconnue jusqu'alors représentent un risque sanitaire, économique et social majeur, aux implications systémiques : mortalité accrue des personnes vulnérables, risques en cascade sur les activités économiques et les infrastructures critiques (télécoms, électricité, eau...). De plus, ces épisodes sont aggravés dans les zones d'îlot de chaleur urbain (ICU), caractérisé par un moindre niveau de refroidissement nocturne en période de très forte chaleur, principalement dans les zones urbaines fortement minéralisées. Il existe un consensus parmi les experts sur le fait que les vagues de chaleur représentent l'aléa climatique le moins bien anticipé au niveau de la ville de Paris : à terme, c'est l'habitabilité même de certaines parties de la ville qui pourrait être remise en cause par ces épisodes extrêmes. Cette situation d'impréparation fait écho à celle de nombreux autres territoires, et souligne l'urgence de penser des plans d'adaptation aux risques liés aux extrêmes de chaleur.

1. *Paris face aux changements climatiques*, 2021 <https://www.paris.fr/pages/paris-s-adapte-au-changement-climatique-18541>

2. Dans un scénario de réchauffement intermédiaire, en 2085, les Parisien.ne.s devraient connaître, par année, environ 34 jours avec une température supérieure à 30 °C, soit une augmentation de près de 20 jours par an par rapport aux années 2010.

● *Méthodologie*

L'étude résumée ici³ se concentre sur le 13^e arrondissement de Paris, un arrondissement choisi pour sa taille⁴ ainsi que sa diversité socioculturelle et architecturale, qui offrent une image assez représentative des enjeux pour la ville de Paris. Cette enquête a permis de tirer plusieurs leçons sur l'urgence à s'emparer, à l'échelle des villes et des quartiers, de la question de la préparation aux extrêmes de chaleur.

Ce travail s'inscrit dans la continuité du diagnostic de vulnérabilités et de robustesses de Paris face aux changements climatiques, publié par la ville de Paris en septembre 2021. Il vise à établir un diagnostic spécifique sur les vagues de chaleur, à la fois localisé et centré sur les retours d'expérience de terrain. Une méthodologie basée sur des entretiens semi-directifs a été retenue afin d'identifier le niveau de résilience du 13^e arrondissement face aux vagues de chaleur. Cette méthode permet à la fois de collecter des retours d'expérience et d'appréhender le niveau de compréhension des enjeux d'acteurs locaux publics (RATP, écoles...) et privés (EHPAD, commerçants...). Les entretiens ont été réalisés à l'automne 2021 par les trois auteurs principaux de l'étude. Cette étape de diagnostic est fondamentale pour mener, dans un second temps, une réflexion pertinente sur l'adaptation du 13^e arrondissement de Paris – et, plus largement, des grandes villes face aux vagues de chaleur et épisodes caniculaires.

● *Les grandes leçons du rapport : vulnérabilités et robustesses du 13^e arrondissement face aux vagues de chaleur*

Le rapport a permis de dégager cinq grands enseignements quant à la préparation du 13^e arrondissement aux vagues de chaleur. Nous proposons ici de les aborder de manière synthétique, tout en illustrant nos propos à travers des exemples issus de l'enquête (menée, rappelons-le, avant l'été 2022).

● *Les canicules précédentes, notamment celle de 2003, ont déjà changé les pratiques de plusieurs acteurs, mais le référentiel d'action reste fondé sur des épisodes passés et non sur les projections des canicules futures*

Il est certain que, depuis 2003, la capacité à gérer les canicules, à l'échelle de la capitale, s'est améliorée. Depuis cet épisode, un plan canicule national a été créé avec la mise en place à Paris du fichier « REFLEX »⁵, qui permet de recenser et de venir en aide aux personnes vulnérables sur le territoire parisien. Néanmoins,

3. «Vulnérabilités et robustesses du 13^e arrondissement face aux vagues de chaleur». Parution prévue en 2023.

4. Le treizième arrondissement est l'un des plus grands arrondissements de Paris avec ses 715 hectares (8,2% du territoire parisien). Il abrite 180 635 habitants, soit 8,3% de la population parisienne en 2018.

5. <https://www.paris.fr/pages/en-ligne-avec-les-personnes-fragiles-pendant-la-canicule-8156>

dans la pratique, ce type de dispositif semble encore difficilement atteindre les publics vulnérables⁶.

Plusieurs acteurs restent persuadés que nous ne revivrons plus, à Paris, une canicule aux conséquences de même ampleur que celle de l'été 2003, alors que ce type de canicule jugée extrême risque de devenir une nouvelle norme pour les étés parisiens⁷. On peut alors s'interroger sur la durabilité de tels dispositifs de crise, si les canicules comme celle de 2003 en viennent à devenir un phénomène quasi annuel pour la capitale d'après les projections du dernier diagnostic climat de la ville de Paris. Plus généralement, la tendance actuelle à fonder les politiques d'adaptation sur l'expérience des épisodes passés de vagues de chaleur et de canicules nous semble une démarche questionnable, au vu des tendances actuelles.

- *Une conscience diffuse des risques liés aux vagues de chaleur futures, mais sans réelle capacité de projection*

Tous les acteurs interrogés semblent conscients du fait que le climat va évoluer en raison du changement climatique ; toutefois, peu d'entre eux parviennent à se projeter dans ce nouveau régime climatique. Certains remarquent déjà que le climat change, et que dès lors, de nombreux acteurs font face à des situations inédites. De plus, tous les acteurs semblent avertis de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur. Ainsi, un enquêté de la gare d'Austerlitz indiquait que certaines mesures seraient probablement revues si les épisodes caniculaires venaient à se multiplier.

Lorsqu'un exercice de projection avec un scénario de dôme de chaleur similaire à celui qu'a subi l'Ouest canadien l'été dernier, avec des températures atteignant les 50 °C et une durée exceptionnelle a été conduit, aucun n'a remis en cause l'éventualité que la ville de Paris connaisse ce type de températures dans les prochaines années. Néanmoins, un certain nombre d'acteurs interrogés ont montré une difficulté, parfois émotionnelle, à se projeter dans des scénarios de ce type.

- *Un manque d'anticipation généralisé des effets de seuil et des risques en cascade*

L'enquête a révélé que les effets de seuil liés aux températures restaient encore méconnus et trop peu pris en compte. Parfois, les températures seuils sont connues des professionnels, mais, en raison d'un manque d'information, de temps, de moyens ou de capacité de projection dans le climat futur, aucun protocole de réponse n'est prévu en cas de franchissement de ces températures. Par exemple,

6. D'après les chiffres transmis par les services de la mairie du 13^e arrondissement, même avant la pandémie, le nombre maximum de personnes accueillies simultanément montait à quatre (essentiellement des seniors), alors que la mairie avait à cette époque une capacité d'accueil d'une quarantaine de personnes dans ces salles rafraîchies.

7. Voir *Paris face aux changements climatiques*, 2021 (op. cit.).

la plupart des acteurs n'ont pas le réflexe de mesurer la température dans leurs locaux lors d'épisodes caniculaires⁸. Plusieurs opérateurs de réseaux semblent ne pas avoir intégré cette pratique : ainsi, il n'existe pas de relevés de la température ni dans les rames ni dans la gare d'Austerlitz. S'agissant d'un hôpital privé, aucun plan de continuité d'activité n'a été prévu en cas de dépassement de la température maximale supportée par les groupes froids, situés en extérieur.

De plus, les effets systémiques ainsi que les effets en cascade (ou « effets dominos ») engendrés par la canicule sont insuffisamment pris en compte : la fermeture d'écoles et de crèches, dysfonctionnements du réseau de transports en commun... La question du travail en extérieur (BTP, entretien, propreté, espaces verts, encombrants...) reste également peu prise en considération. Des travaux en extérieur pourraient être limités (par exemple, report au lendemain matin du déblaiement du marché) voire reportés, ce qui pourrait s'avérer problématique en cas de canicule longue. Les services enquêtés ne semblaient pas prendre en compte dans leurs plannings de travaux les conséquences des fortes chaleurs sur des périodes prolongées.

- *Des acteurs souvent démunis face à des canicules à la fois plus longues et plus précoces*

Selon beaucoup d'acteurs interrogés, la durée de la canicule et le moment où elle se produit sont des facteurs déterminants pour apprécier le niveau de risque de l'événement. En effet, pour le corps humain, les bâtiments ou les réseaux électriques, plus la chaleur dure, plus la vulnérabilité augmente. Si l'on prend l'exemple des bâtiments, les solutions de rafraîchissement passives ne sont efficaces que sur des épisodes caniculaires d'une durée inférieure à quinze jours : au-delà, la climatisation deviendra une nécessité pour atteindre des températures de confort. À partir d'une moyenne de 3 jours à plus de 30 °C en journée et 20 °C la nuit, le réseau électrique est sous tension du fait de l'accumulation de la chaleur dans le sol.

De plus, certains acteurs ont insisté sur la prise en considération de la période à laquelle la canicule était susceptible de survenir. En effet, si la vague de chaleur arrive au mois de juin, de septembre ou en plein mois d'août, les impacts ne seront pas les mêmes. Ainsi dans les EHPAD, les vagues de chaleur précoces, dès le mois de juin, posent des problématiques de ressources humaines. De même, une canicule précoce dès le mois de juin, avant les vacances d'été, pourrait s'avérer éminemment problématique pour les établissements scolaires : on se rappelle les conditions de passage du baccalauréat 2022, avec des salles à 35 °C. D'après notre enquête, aucun protocole n'existe actuellement à l'échelle de l'Éducation nationale ou de la ville de Paris pour faire face aux vagues de chaleur, pourtant amenées à se multiplier.

8. Parmi les acteurs interrogés, seuls les EHPAD, les crèches et les commerces d'alimentation pratiquent des relevés de température de manière systématique.

- **La dépendance à l'électricité, un enjeu vital en partie maîtrisé**

Lors des entretiens, l'une des craintes récurrentes était celle d'une défaillance du réseau électrique. Toutefois, celle-ci semble en partie maîtrisée par les acteurs de l'énergie (RTE et Enedis) à l'échelle locale. Aujourd'hui, à Paris, le fonctionnement du réseau froid, du réseau d'eau, des réseaux de transport ou de télécommunication repose sur l'énergie électrique. D'autres acteurs, comme la RATP, tendent à devenir de plus en plus dépendants de l'électricité avec le plan d'électrification des bus à l'horizon 2030. De plus, de nombreux équipements publics, parapublics et privés viendraient à être impactés par des défaillances du réseau électrique, comme les missions funéraires, les piscines ou les hôpitaux et EHPAD⁹. Enfin, les commerçants seraient contraints de fermer boutique en cas de ruptures d'approvisionnement en électricité, en raison de leurs besoins en climatisation comme des besoins spécifiques à l'activité. Pour les restaurants, par exemple, la fermeture serait inévitable en cas de défaillances.

Toutefois, des entretiens avec des acteurs locaux de RTE et Enedis révèlent leur confiance dans les capacités de résilience du réseau face aux vagues de chaleur actuelles. Enedis, par exemple, est doté d'un plan d'adaptation lui permettant d'assurer une continuité d'activité en cas de canicules comme celles que nous connaissons jusqu'à présent, y compris en modélisant une hausse de la demande en énergie liée à la climatisation. Toutefois, la question de la résilience du réseau face à des canicules longues (3 à 4 semaines) avec des chaleurs extrêmes (40-50 °C) ne semblait pas avoir fait l'objet d'un travail spécifique. La question des étiages semble aussi sous-estimée, ce qui est un problème au niveau national confirmé par les événements de l'été 2022.

Encadré 4

Recommandations : travailler collectivement à différentes échelles pour renforcer les mesures d'adaptation aux canicules :

1. Acculturer les citoyens et les responsables politiques à la gestion de crise

Une des principales explications du manque d'anticipation et de préparation face à ce nouveau régime climatique pourrait venir du fait que la culture de la gestion de crise, notamment relative aux événements climatiques, n'est pas suffisamment intégrée à Paris et, plus généralement, en France. De même, le personnel politique et les services de la ville se sont avérés peu acculturés aux conséquences du changement climatique, et notamment sur leur dimension exponentielle et **non linéaire**. La conscience des efforts à mener en matière d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, de mieux en mieux intégrée, ne peut pas remplacer une culture de l'adaptation et de la gestion de crise. Il existe un réel besoin de formation et d'information si l'on veut faire face aux extrêmes de chaleur à venir.

9. Il faut toutefois rappeler que les EHPAD et les hôpitaux disposent de groupes électrogènes et sont considérés comme des clients sensibles par Enedis.

Jusqu'à présent, aucun exercice de gestion de crise sur les vagues de chaleur n'avait été mis en œuvre par la ville, contrairement à d'autres sujets comme les crues et inondations, qui avaient fait l'objet par exemple de l'exercice de gestion de crise « Sequana 15/18 »¹⁰. Un premier exercice « Paris à 50 degrés » est prévu pour deux quartiers de Paris¹¹ le 13 octobre 2023. Cet exercice fera suite à la **mission d'information et d'évaluation (MIE) « Paris à 50 degrés »**, en cours, qui donnera suite à des recommandations votées au consensus par les élus de la ville.

2. Un nécessaire travail d'anticipation impliquant les acteurs de manière systémique, du local au national :

Alors que l'enquête révèle une volonté de la majorité des acteurs d'agir pour s'adapter aux canicules, il s'agit désormais d'impulser un travail collectif, afin d'organiser une réponse plus efficace face à ces extrêmes plus intenses et fréquents. De nombreux acteurs, comme les EHPAD, le secteur du bâtiment ou la RATP, soulignaient également leur volonté de s'impliquer dans un travail de réflexion collective systémique, en lien avec la mairie du 13^e arrondissement, ainsi que leur envie de participer à de futurs exercices de gestion de crise dédiés au risque canicule. Ainsi, tout un travail d'anticipation et de sensibilisation des citoyens et des différents corps professionnels reste à mettre en œuvre. Un employé d'une école primaire soulignait par exemple le manque d'un plan de prévention canicule à l'échelle de l'Éducation nationale pour les personnels scolaires¹².

3. Capitaliser sur les solutions existantes et mettre en place des processus de sensibilisation et des espaces de délibération citoyenne :

De nombreuses solutions¹³ existent déjà pour rendre le territoire plus résilient face aux canicules : végétalisation et solutions fondées sur la nature, revêtements antichaleur, ombrières et mobilier urbain innovant, isolation des bâtiments mettant l'accent sur le confort d'été à l'échelle du logement ainsi qu'à la préservation de brises thermiques à l'échelle d'un bloc de logements ou d'un quartier... Ainsi, des mesures fortes seront implémentées dans le futur PLU bioclimatique de Paris, avec une ambition renforcée sur la gestion du risque canicule grâce à la mission d'information et d'évaluation « Paris à 50 degrés ». Elles devront ensuite être traduites

10. <https://www.prefectures-regions.gouv.fr/ile-de-france/Documents-publications/Pref-Actualites/2018/19-decembre/Exercice-Sequana-15-18-anticiper-la-gestion-d-une-crue-majeure>

11. <https://www.sortiraparis.com/actualites/a-paris/articles/282393-rechauffement-climatique-bientot-un-exercice-de-crise-paris-50-degres>

12. Une journée d'auditions « L'école à 50 degrés » a été organisée par l'Assemblée nationale le 14 décembre 2022.

13. Voir par exemple les cahiers de l'APUR sur l'îlot de chaleur urbain à Paris ainsi que la publication de l'ADEME « Rafraîchir les villes : des solutions variées » (2021).

en actions concrètes à l'échelle des arrondissements. L'adaptation des modes de vie et l'acculturation des citoyens aux bons gestes à adopter en périodes de fortes chaleurs sont également un enjeu clé. Tout comme la concertation démocratique, qu'il faudrait mettre en place pour débattre des mesures à privilégier à l'échelle d'un bâtiment, d'une rue ou d'un quartier, à l'image de la consultation « Paris agit pour le climat » ou des consultations organisées par la ville de Paris autour du futur PLU bioclimatique.

Comme le révèle cette étude de cas, la puissance publique a un rôle crucial à jouer, de l'échelle locale d'un arrondissement à l'échelle étatique, en passant par celle de la ville, de la région ou de la métropole. Pour augmenter la résilience de nos territoires face aux vagues de chaleur à venir, il n'existe qu'une seule solution viable : anticiper, et planifier la résilience de la ville de demain en fonction des évolutions du climat futur – et non d'un climat passé stable, qui appartient à un temps déjà révolu.

Stratégies d'adaptation des transports aux impacts des vagues de chaleur

Teodora Popescu,

Direction générale des infrastructures,
des transports et des mobilités (DGITM)

Grâce aux contributions de :

David Courteille, Régis Coene,

Régie autonome des transports parisiens (RATP)

Valérie Darmaillacq, Clément Philippe, Christelle Mary,

SNCF Voyageurs

Et de :

SNCF Réseau

Société du Grand Paris

Voies navigables de France

DGITM

CEREMA

Études de vulnérabilité pour cartographier les risques

La première étape avant l'établissement d'une stratégie d'adaptation est la réalisation d'une étude de vulnérabilité de l'infrastructure de transport considérée. Le CEREMA a élaboré en 2015 et mis à jour en 2019 une méthodologie d'analyse des vulnérabilités au changement climatique des infrastructures de transport. Plusieurs acteurs du transport (SNCF Réseau, la Société du Grand Paris, des acteurs routiers tels que la direction interdépartementale des routes sur la zone méditerranéenne, des grands ports maritimes) ont appliqué cette méthodologie pour cartographier les risques présents sur leur infrastructure. Dans le cas de SNCF Réseau et des gestionnaires routiers, les études sont effectuées à l'échelle de zones géographiques. La RATP a également effectué plusieurs études de vulnérabilité à l'échelle du bassin francilien. Toutes ces études prennent en compte l'impact de plusieurs aléas sur l'infrastructure, dont les risques liés à la hausse de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur.

Actions d'adaptation pour les transports ferroviaires et guidés

- *Adaptation du réseau*

Adaptation au phénomène de dilatation des rails

Pour limiter le phénomène de dilatation des rails, plusieurs solutions sont possibles. Il est par exemple possible de modifier la mise en œuvre du rail afin d'augmenter la température maximale supportée par celui-ci avant que sa dilatation ne

représente un risque. C'est ce qu'a fait SNCF Réseau sur les rails de type longs rails soudés depuis la canicule de 2003. Une autre solution est de remplacer les traverses en bois par des traverses en béton de classe supérieure sur les zones aériennes. C'est la solution privilégiée par la RATP aujourd'hui. La même approche a été adoptée par la Société du Grand Paris (SGP) dans la construction du Grand Paris Express. SNCF Réseau a également remplacé les traverses en bois par des traverses en béton sur de nombreuses portions du réseau.

Depuis 2019, la RATP a également mis en place des modèles prédictifs de la température du rail, qui permettent d'estimer précisément sur quelle portion du réseau des limitations de vitesse doivent être mises en œuvre. Ces modèles se basent sur des relevés de température effectués par des capteurs connectés installés sur le rail en différents points du réseau. SNCF Réseau a également équipé certaines portions de voies de capteurs connectés pour prévoir les limitations de vitesse.

Puisqu'un risque de dilatation des rails subsiste même avec les limitations de vitesse préventives, une surveillance accrue des voies, *via* des tournées de contrôle, est également nécessaire pendant les périodes de fortes chaleurs. Ainsi, la RATP a mis en place des tournées de maintenance spécifiques pour détecter à pied d'œuvre d'éventuelles déformations des voies aériennes ou prévenir leur apparition. Les « tournées chaleur » mises en œuvre par SNCF Réseau poursuivent le même objectif.



Figure F 15 : Voie ferrée avec traverses en béton.

Source : © Arnaud Bouissou/Terra.

Prévention du phénomène de dilatation des caténaires

Comme pour la dilatation des rails, la prévention du phénomène de dilatation des caténaires se fait grâce à une surveillance accrue du réseau en périodes de fortes chaleurs. Ainsi, les « tournées chaleurs » effectuées à pied par des agents SNCF Réseau permettent aussi de vérifier l'état des caténaires. Des solutions plus modernes, à base de détection informatisée des risques d'incidents, existent également. Par exemple, un projet d'expérimentation de la détection basse des contrepoids de caténaire, permettant de détecter à distance la distension des fils de contact en cas de forte chaleur, a été mené par la RATP. Une vingtaine de capteurs ont été installés et permettent désormais de suivre les zones les plus sensibles.

● *Prévention des risques sur les ouvrages*

La surveillance est un moyen privilégié de prévenir les risques encourus par les ouvrages en terre du fait des fortes chaleurs. Par exemple, la RATP a affiné son système de surveillance de ses ouvrages en terre, aboutissant aujourd'hui à une automatisation de l'analyse des données de surveillance par interférométrie radar satellitaire grâce à de l'intelligence artificielle. En outre, la RATP a instrumenté avec des capteurs connectés des ouvrages en terre identifiés comme sensibles, avec un système de suivi de mesures avec transmission d'alertes. Par ailleurs, il peut également être mentionné que la RATP a lancé des études avec l'Institut national de la recherche agronomique (INRAE) pour identifier les dispositifs de végétalisation les moins sensibles à la sécheresse, afin de limiter les risques d'instabilités superficielles de talus.

Sur les ouvrages d'art, la prévention des risques dus aux fortes chaleurs passe par un dimensionnement adapté. Par exemple, en réponse au risque de dégradation des performances des appareils d'appui sur les ouvrages d'art, la RATP prend désormais en compte des températures maximales plus élevées dans le dimensionnement des appareils d'appui.

● *Adaptation des gares*

L'adaptation au changement climatique des gares peut s'effectuer par une prise en compte du changement climatique au moment de la conception des bâtiments ou du renouvellement des équipements. Plusieurs exemples d'adaptation peuvent être cités dans les gares françaises. Par exemple, la RATP intègre, dans ses marchés de renouvellement d'équipement, des prescriptions d'adaptation au changement climatique qui prennent en compte les évolutions de températures projetées à l'échelle du bassin francilien. La Société du Grand Paris agit sur les bâtiments des gares dès leur conception, via l'installation d'un filtre solaire sur les façades, l'isolation et la végétalisation des toitures ainsi que le choix d'un revêtement de sol à faible effet pour maintenir le confort thermique des usagers. Les locaux techniques du Grand Paris Express sont également climatisés pour garantir le bon fonctionnement des équipements informatiques.

● *Prévention du risque incendie*

En conception, la prévention du risque incendie liée aux fortes chaleurs et sécheresses passe par des actions telles que le recul des parcelles herbées par rapport aux voies. En exploitation et maintenance, l'action principale de prévention est le débroussaillage des abords des voies, qui est par exemple pratiqué par SNCF Réseau. La Société du Grand Paris (SGP) prévoit également le débroussaillage des abords des voies et la définition d'une hauteur limite des essences plantées à proximité, à partir d'un cahier des charges élaboré par la SGP pour le futur mainteneur RATP-GI.

Cependant, bien que des solutions existent, le groupe SNCF note le défi que représente le traitement de l'aléa incendie puisque cela nécessite de conjuguer un débroussaillage des abords des voies pour y éviter la propagation des incendies avec les contraintes réglementaires liées à la préservation de la biodiversité.

● *Adaptation du matériel roulant ferroviaire*

Installation de climatisation et aérations

En période de fortes chaleurs, le matériel roulant doit être adapté pour assurer le confort thermique des voyageurs.

Aujourd'hui, 61,5% des rames de matériel roulant ferroviaire RATP sont pourvues de ventilation réfrigérée (i. e. de climatisation). Cela correspond à 36% des métros, 100% des tramways, 100% des matériels RER A et 80% des matériels RER B. Ces chiffres devraient être amenés à 100% des RER climatisés en 2025 et 70% des métros en 2030. Afin d'améliorer le confort des voyageurs dans les bus en période de fortes chaleurs, la RATP indique que le parc de bus sera climatisé à hauteur de 60% d'ici 2025.

Le Grand Paris Express sera également équipé de climatisation et de circuits naturels de refroidissement de l'air, qui auront également pour effets bénéfiques une ventilation propice à la limitation des risques sanitaires.

Sur le parc SNCF Voyageurs, 96% des TER sont équipés de climatisation, ainsi que 100% des TGV, des OUIGO et des Intercités. L'enjeu, pour SNCF Voyageurs, est à la fois d'installer la climatisation dans les matériels qui n'en sont pas encore pourvus et d'améliorer la performance de la climatisation et l'évolution du cahier des charges.

Évolution des cahiers des charges

Pour le transport ferroviaire longue distance, les cahiers des charges pour le confort thermique ont évolué à la suite de la révision de la norme européenne de confort thermique sur les trains grandes lignes en 2016. SNCF Voyageurs est allé plus loin que les exigences européennes pour un pays comme la France, en prenant en compte le climat du sud de la France, plus chaud que le climat moyen

français, ainsi que les évolutions attendues du climat. Ainsi, la température extérieure à partir de laquelle la climatisation doit être en mesure de fonctionner à pleine capacité, tout en tolérant un niveau d'encrassement de certains organes (filtres et échangeurs), est égale à celle exigée pour l'Espagne dans la norme européenne, soit 45 °C. De même la température extérieure en condition de limite d'exploitation, à partir de laquelle l'installation de climatisation peut fonctionner en mode réduit, est portée à 50 °C (égale à celle exigée pour l'Espagne dans la norme européenne). Ce nouveau cahier des charges a vocation à être appliqué sur tout type de matériel roulant du parc SNCF Voyageurs, au fur et à mesure des renouvellements.

Opérations de maintenance et de fiabilisation spécifiques

Pour prévenir les problèmes de climatisation dans les trains, SNCF Voyageurs a mis en place des opérations de maintenance spécifiques à la climatisation en période estivale, ainsi qu'une *hotline* spéciale pour le dépannage à distance de problèmes de climatisation. Le résultat sur l'été 2022 a été une amélioration du comportement de la climatisation par rapport aux années précédentes. La RATP a également mis en place une maintenance anticipée de la climatisation sur certains matériels métro (lignes 2, 5 et 9) sur la période de mars à mai. La maintenance de la climatisation sur les métros n'est donc plus lissée sur l'année. Des cycles de maintenance préventifs sont aussi effectués sur le matériel roulant du tramway.

Un travail de fiabilisation du matériel roulant en période caniculaire est également engagé par la RATP et inscrit dans le plan canicule 2023 du groupe SNCF. Sur les modèles de métro ferré, les analyses récurrentes de fiabilité effectuées par la RATP, ainsi que la réalisation au plus tôt de plans d'action ont déjà porté leurs fruits, ayant notamment permis de passer la dernière période estivale sans dégradation de la fiabilité.

Enfin, pour le matériel roulant du tramway, la RATP prévoit également un approvisionnement en composants plus robustes à la chaleur dans les ateliers de maintenance.

● **Amélioration du confort des voyageurs durant les fortes chaleurs**

À bord des trains et en gare, des actions de distribution d'eau sont organisées en période de fortes chaleurs pour éviter la déshydratation des voyageurs. Les équipes SNCF Voyageurs distribuent de l'eau gratuitement en période de canicule dès 1 heure de retard si la climatisation ne fonctionne pas et dès 2 heures de retard si celle-ci fonctionne. Ainsi, durant l'été 2022, 70 000 bouteilles d'eau ont été distribuées dans les TER et 270 000 dans les TGV et Intercités. Pour améliorer le confort des voyageurs par temps de canicule, SNCF Gares et Connexions a également mis en place le dispositif Renfort Eau, dans 24 gares, permettant aux voyageurs de retirer gratuitement une bouteille d'eau dans les *Relay*. La RATP, quant à elle, a distribué 100 000 bouteilles d'eau entre le 12 et le 18 juillet 2022, dans une trentaine de gares et stations. Une distribution d'éventails a également eu lieu sur la ligne 5 à la même période.



Figure F 16 : Sticker indiquant qu'un RER est équipé de climatisation.

Source : © Arnaud Bouissou/Terra.

Pour éviter aux voyageurs les désagréments liés à la canicule, le plan canicule 2023 du groupe SNCF prévoit également de continuer à inviter au report du voyage en cas de canicule, éventuellement en ciblant certaines catégories de voyageurs, tels que ceux dont le voyage doit avoir lieu sur une ligne non climatisée ou les personnes vulnérables.



Figure F 17 : Agents RATP distribuant des bouteilles d'eau et des éventails en gare de Vincennes pendant l'épisode caniculaire de juillet 2022.

Source : © Arnaud Bouissou/Terra.

Actions d'adaptation des routes

Plusieurs solutions existent pour faire face aux impacts des fortes chaleurs sur l'infrastructure routière. Il existe par exemple des gammes de bitumes adaptés aux différents climats. Il est donc possible de modifier progressivement les formulations lors du renouvellement des couches de roulement, qui a lieu environ tous les 15 ans. Une autre solution est d'utiliser des chaussées de couleur claire, qui absorbent moins le rayonnement solaire et ainsi chauffent moins. Cela nécessite un liant clair (bitume dépigmenté, liant biosourcé ou liant hydraulique) et des granulats clairs. La difficulté est que ces derniers ne sont pas forcément disponibles partout. D'autres difficultés pratiques se posent lors de l'utilisation de chaussées de couleurs claires : risque de noircissement de la chaussée en cas de trafic automobile significatif, risque d'inconfort pour les usagers voire d'atteinte à la sécurité routière (risque d'éblouissement, manque de contraste par rapport au marquage au sol). Ainsi, les chaussées claires sont aujourd'hui privilégiées en milieu urbain pour réduire les îlots de chaleur, notamment pour les trottoirs, espaces publics, voies piétonnes ou peu circulées et pistes cyclables. Actuellement, il n'y a pas de perspective de les développer à grande échelle sur les routes. Une solution temporaire, pratiquée par certaines collectivités pour éviter le ressuage, demeure le blanchissement de la route au lait de chaux. Il s'agit d'un traitement temporaire qui n'est efficace que pendant quelques jours. Cela a par exemple été pratiqué en Ille-et-Vilaine durant l'été 2022.

Dans son rapport de 2020 sur le retour d'expérience sur la canicule de 2019, le CEREMA a également identifié l'exploitation des relevés lidar permettant de déterminer la qualité des routes (effectués dans le cadre de la démarche « indice qualité des routes nationales » ou IQRN) comme un moyen d'identifier et de suivre certaines déformations de la chaussée causées par les fortes chaleurs.

Sur les ouvrages d'art, le CEREMA préconise une surveillance accrue des appareils d'appui lors des conditions de températures extrêmes, conduisant, si nécessaire, au remplacement préventif de ceux-ci, selon les exigences européennes (Eurocodes), qui imposent un dimensionnement plus contraignant que les règlements français.

Enfin, il convient de noter que durant les fortes chaleurs, les règlements intérieurs des directions interdépartementales des routes prévoient des organisations adaptées des travaux (décalage le matin, notamment) ainsi que des pauses et la distribution d'eau. Des casquettes sont aussi prévues pour les agents.

Conclusions et perspectives

Les conditions météorologiques rencontrées l'été 2022 et leurs impacts sur tous les aspects de notre société et de la nature doivent nous rappeler l'urgence d'agir sur les deux volets de la lutte contre le changement climatique. Premièrement, il est aujourd'hui très clair que l'adaptation au changement climatique est indispensable et que nous devons préparer comment vivre le mieux possible dans le climat futur. Deuxièmement, on n'insistera jamais assez sur la nécessité de limiter l'impact des activités humaines sur le climat, en réduisant drastiquement les émissions mondiales de GES de façon à limiter l'ampleur du réchauffement climatique futur.

Puisque le risque climatique est le produit de trois facteurs, les politiques d'adaptation doivent jouer sur les trois tableaux. Bien sûr, il est parfois difficile de classer telle ou telle mesure dans une seule des composantes du risque : aléa, vulnérabilité ou exposition (figure A 3), puis il existe un certain recouvrement. La réduction de la vulnérabilité, de l'exposition et/ou de l'aléa peut être obtenue par différents choix de politiques et d'actions au fil du temps.

Les actions de réduction de l'aléa

Les dernières observations et les projections climatiques montrent clairement que les épisodes caniculaires vont se multiplier d'ici 2050. Ils ne seront pour la très grande majorité d'entre eux pas plus forts en intensité, en durée ou en sévérité qu'en 2003, mais il est possible qu'ils s'en rapprochent ou même les dépassent dans certaines régions, comme en Bretagne cette année où des records de température ont été battus. Les canicules précoces comme celle de juin 2019 ou juin 2022 seront quatre fois plus probables à l'horizon 2040, celle de juillet six fois plus (chapitre B).

Dans le cas de la trajectoire socio-économique parmi celles utilisées par le GIEC dans ses derniers rapports, la plus sévère (SSP5-8.5), les épisodes de fortes chaleurs se multiplieront, auront une intensité bien supérieure, seront plus longs et dureront tout l'été (90 jours).

Réussir à atteindre les objectifs de l'accord de Paris sur le climat par des mesures d'atténuation et donc limiter la hausse mondiale des températures bien en dessous de 2 °C d'ici la fin du siècle, tout en poursuivant les efforts pour ne pas dépasser 1,5 °C, c'est aussi réduire l'occurrence de vagues de chaleur plus sévères.

Au-delà des mesures d'atténuation qui, en réduisant les causes du changement climatique, en limitent les conséquences à long terme, la réduction de l'aléa peut

provenir d'actions d'adaptation, nécessaires sur le court et moyen terme. Ainsi, la lutte contre les îlots de chaleur urbains tels que décrits dans le chapitre B permet de limiter les températures extrêmes, réelles et ressenties, notamment en privilégiant des solutions d'adaptation fondées sur la nature. Il convient néanmoins de rappeler que ces dernières ne fonctionnent qu'avec une nature préservée ou restaurée et à condition que le réchauffement ne soit pas trop fort.

La réduction de la vulnérabilité

Une des façons d'agir pour réduire la vulnérabilité de la population aux vagues de chaleur est d'étendre les mesures de prévention déjà existantes, au moyen d'informations répétées sur les bons réflexes à avoir, mais aussi d'alerter le plus tôt possible de manière que la population prenne les mesures nécessaires à la réduction de leur vulnérabilité. Ces mesures peuvent être prises également par les autorités compétentes qui pourront, selon le cas, décider d'interdire une manifestation sportive ou bien de faciliter le recours au télétravail. Les mesures préventives peuvent également être des mesures nécessitant un certain investissement dans l'adaptation des structures telles que la mise en place d'au moins une pièce rafraîchie dans chaque maison de retraite et logement foyer pour personnes âgées, tels que prévus dans le plan national canicule de mai 2004. Des mesures similaires sont à étendre par exemple pour les conducteurs de bus ou de train, lors du renouvellement du matériel roulant.

La réduction de l'exposition

Enfin, les actions d'adaptation peuvent chercher à réduire l'exposition. Par exemple, il est possible de la diminuer en mettant à jour les différents référentiels techniques comme il a été fait pour la réglementation régissant les constructions nouvelles. Ainsi, la RE2020 impose aux futures constructions un niveau de confort thermique minimum en cas de vagues de chaleur du niveau de celle de 2003 (chapitre D).

L'élaboration d'un plan vague de chaleur interministériel permettra de compléter le plan national canicule jusqu'alors consacré aux impacts sanitaires de manière à lutter contre l'impact des vagues de chaleur sur la vie quotidienne des Français, la continuité des services publics essentiels et de la vie économique, ainsi que la protection des milieux et ressources naturels, tout en gardant les acquis du plan canicule actuel.

Bibliographie

ACI (2018) : *Airports' resilience and adaptation to a changing climate*.

Arafeh-Dalmau M., Montaña-Moctezuma G., Martínez José A., Beas-Luna R., Schoeman D. S. et Torres-Moye G. (2019) « *Extreme marine heatwaves alter kelp forest community near its equatorward distribution limit* », *Front. Mar. Sci.* 6, 499. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2019.00499>

Adélaïde L., Chanel O., Pascal M. (2022) : « *Des impacts sanitaires du changement climatique déjà bien visibles : l'exemple des canicules* », *Annales des Mines – Responsabilité et environnement*, 2022 ; 106(2) : 42-7.

Adélaïde L., Chanel O., Pascal M. (2012) : « *Évaluation monétaire des effets sanitaires des canicules en France métropolitaine entre 2015 et 2020* », *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, 2021 ; 12 : 215-23.

ADEME (2017) : *Actions d'adaptation au changement climatique*. 33 fiches, collection « Ils l'ont fait ». Réf. 010260, 132 p.

ADEME (2022) : « *Comment garder son logement frais en été ?* » <https://librairie.ademe.fr/cadic/7111/guide-garder-logement-frais-ete.pdf>

ADEME (2021b) : *Des solutions pour rafraîchir les villes : S'inspirer d'expériences dans le monde selon la variabilité des climats d'aujourd'hui et de demain*, collection « Ils l'ont fait ». Réf. 011597, 113 p.

ADEME (2020) : Fiche outils et ressources *Végétaliser : Agir pour le rafraîchissement urbain. Les approches variées de 20 projets d'aménagement*, collection « Ils l'ont fait ». Réf. 011157, 44 p.

ADEME (2020) : Projets de recherche APR Modeval-Urba : RECRE, Mesh-2C, etc. Réf. 011187, 3 p.

ADEME (2018) : *L'Arbre en milieu urbain, acteur du climat en région Hauts-de-France*. Réf. 8747, 36 p.

ADEME (2018) : *Aménager avec la nature en ville*, collection « Expertises ». Réf. 010658, 100 p.

ADEME (2021) : *Rafraîchir les villes : des solutions variées*, collection « Ils l'ont fait ». Réf. 011441, 80 p.

ADEME (juin 2020) : *Lettre ADEME « Recherche sur le rafraîchissement urbain »*. Réf. 011053, 6 p.

ADEME (2017) : *Rafraîchissement des villes : de quelles connaissances avons-nous besoin ? État des lieux des connaissances sur le rafraîchissement urbain*, collection « Expertises », 42 p.

ADEME (2017) : *Surchauffe urbaine : recueil de méthodes de diagnostic et d'expériences territoriales*, collection « Ils l'ont fait ». Réf. 010307, 50 p.

ADEUS, Agence de développement de l'urbanisme de l'agglomération strasbourgeoise (2014, septembre) : *Plan local d'urbanisme : Analyses typomorphologiques pour un encadrement adapté du territoire* (n° 133).

Akbari H., Menon S. et Rosenfeld A. (2009) : « Global cooling : increasing worldwide urban albedos to offset CO₂ », *Climatic Change*, 94

Akbari H., Rose L. S., et Taha H. (1999) : *Characterizing the Fabric of the Urban Environment : A Case Study of Sacramento, California*.
<https://doi.org/10.2172/764362>

Arias-Ortiz A., Serrano O., Masqué P., Lavery P. S., Mueller U., Kendrick G. A., Rozaimi M., Esteban A., Fourqurean J. W., Marbà N., Mateo M. A., Murray K., Rule M. J. et Duarte C. M. (2018) : « A marine heatwave drives massive losses from the world's largest seagrass carbon stocks », *Nature Clim. Change* 8, 338-344
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0096-y>

Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement, ASTEE (2020) : *La Réhabilitation des petites rivières urbaines : Retours d'expérience sur des projets multi-bénéfices*.

Bador M., Terray L., Boé J., Somot S., Alias A., Gibelin A.-L. et Dubuisson B. (2017) : « Future summer mega-heatwave and record-breaking temperatures in a warmer France climate », *Environmental Research Letters* 12.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa751c>

Beaudoin M. et Levasseur M.-E. (2017) : *Verdir les villes pour la santé de la population*, Institut national de sante publique du Québec.

Bessemoulin P., Bourdette N., Courtier P. et Manach J. (2004) : « La canicule d'août 2003 en France et en Europe ». *La Météorologie*, 46, 25-33.

Brisson, N., Gate P., Gouache D., Charmet G., Oury F. X. et Huarda F. (2010) : « Why are wheat yield stagnating in Europe? », *Field Crops Research*, 2010.

British Columbia Coroners Service (2022) : *Extreme Heat and Human Mortality : A Review of Heat-Related Deaths in B. C. in Summer 2021*.
https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/birth-adoption-death-marriage-and-divorce/deaths/coroners-service/death-review-panel/extreme_heat_death_review_panel_report.pdf

British Columbia River Forecast Centre (2021) : *Flood Warning – Upper Fraser River (UPGRADED)*.
http://bcrcfc.env.gov.bc.ca/warnings/advisories/FWN_2021_06_29_1300UpperFraser_iss.pdf

British Columbia Wildfire Service (2021) : *Wildfire season summary*.
<https://www2.gov.bc.ca/gov/content/safety/wildfire-status/about-bcws/wildfire-history/wildfire-season-summary>

Burtin A. et Parey S. (2022), « Résilience des systèmes électriques face au changement climatique », *Responsabilité et environnement – Annales des Mines*.

Calmet C. (2018) : « La vigilance météorologique, une innovation pour le grand public », *La Météorologie*, 100, 56-65.

Canadian Interagency Forest Fire Centre (CIFFC) : SitRep.
<https://ciffc.net/en/ciffc/sitrep/2021-06-20>

Canadian Interagency Forest Fire Centre (CIFFC) : CIFFC SitRep.
<https://ciffc.net/en/ciffc/sitrep/2021-07-03>

CEREMA (2020) : *Retour d'expérience sur l'épisode de canicules et de sécheresse 2019*

Cerrano C., Bavestrello G., Bianchi C. N., Cattaneo-Vietti R., Bava S., Morganti C., Morri C., Picco P., Sara G., Schiaparelli S., Siccardi A. et Sponga F., (2002) : « Catastrophic mass-mortality episode of gorgonians and other organisms in the Ligurian Sea (North-Western Mediterranean), summer 1999 », *Ecology Letters*, 3, 284-293.

<https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2000.00152.x>

Chester M., Fraser A., Matute J., Flower C. et Pendyala R. (2015) : « Parking Infrastructure : A Constraint on or Opportunity for Urban Redevelopment ? A Study of Los Angeles County Parking Supply and Growth », *Journal of the American Planning Association*, 81(4), 268-286.

<https://doi.org/10.1080/01944363.2015.1092879>

Clarke G. K. C., Jarosch A. H., Anslow F. S., Radić V. et Menounos B. (2015) : « Projected deglaciation of western Canada in the twenty-first century », *Nat. Geosci.* 8, 372-377.

Clergeau P. (2018) : « La ville biodiversitaire ! », *Openfield* n° 11.

Dahech S., Charfi S. et Madelin M. (2020) : « Représentativité des températures mesurées dans la station météorologique Paris-Montsouris », *Climatologie*, 17, 5.

Darmaraki S., Somot S., Sevault F., Nabat P., Cabos Narvaez W. D., Cavicchia L., Djurdjevic V., Li L., Sannino G. et Sein D. V. (2019) : « Future evolution of marine heatwaves in the Mediterranean Sea », *Climate Dynamics*, 53, 1371-1392.

<https://doi.org/10.1007/s00382-019-04661-z>

Davy S. K., Allemand D. et Weis VM (2012) : « Cell biology of cnidarian-dinoflagellate symbiosis », *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 76 : 229-261.

<https://doi.org/10.1128/MMBR.05014-11>

de Maupassant G. (1885) : *Bel-Ami*, Paris : Ollendorf.

DGAC/STAC (2013) : « Vulnérabilité des aéroports face au changement climatique » – Note d'information technique.

Dupuy J. P. (2002) : *Pour un catastrophisme éclairé*, Paris, Seuil, collection « Points ».

Environment and Climate Change Canada (2019) : Historical Climate Data.

https://climate.weather.gc.ca/doc/Historical_Data_How_to_Use.pdf

Environment and Climate Change Canada (2022) : Technical documentation : Daily Climate Records (LTCE).

<https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/canadian-centre-climate-services/display-download/technical-documentation-daily-climate-records.html>

Eurocontrol (2021) : Climate Change Risks for European Aviation – Summary report.

Fischer E. M., Sippel S. et Knutti R. (2021) : « Increasing probability of record-shattering climate extremes », *Nat. Clim. Chang.* 11, 689-695.

European Environment Agency (2022) : « Climate change as a threat to health and well-being in Europe : focus on heat and infectious diseases », Report No. 07/2022

Euzen A., Laville B. et Thiébaud S. (2017) : L'Adaptation au changement climatique. Une question de société, Paris, CNRS édition.

Fouillet A., Rey G., Wagner V., Laaidi K., Empereur-Bissonnet P., Le Tertre A., Frayssinet P., Bessemoulin P., Laurent F., De Crouy-Chanel P., Jouglu E. et Hémon D. (2008) : « Has the impact of heat waves on mortality changed in France since the European heat wave of summer 2003? A study of the 2006 heat wave », *International Journal of Epidemiology*, 2008 ; 37(2) : 309-17.

Garrabou J., Coma R., Bensoussan N., Bally M., Chevaldonné P., Cigliano M., Diaz D., Harmelin J. G., Gambi M. C., Kersting D. K., Ledoux J. B., Lejeusne C., Linares C., Marschal C., Pérez T., Ribes M., Romano J. C., Serrano E., Teixido N., Torrents O., Zabala M., Zuberer F. et Cerrano C. (2009) : « Mass mortality in northwestern Mediterranean rocky benthic communities : Effects of the 2003 heat wave », *Global Change Biology*, 15, 1090– 1103.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01823.x>

Garrabou J., Gómez-Gras D., Medrano A. *et al.* (2022) : « Marine heatwaves drive recurrent mass mortalities in the Mediterranean Sea », *Glob. Chang. Biol.* 1-18.

<https://doi.org/10.1111/gcb.16301>

Gasparrini A., Guo Y., Hashizume M., Lavigne E., Zanobetti A., Schwartz J., Tobias A., Tong S., Rocklöv J., Forsberg B., Leone M., De Sario M., Bell M. L., Guo Y-L. L., Wu C-F., Kan H., Yi S-M., de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho M., Hilario Nascimento Saldiva P., Honda Y., Kim H., Armstrong B. (2015) : « Mortality risk attributable to high and low ambient temperature : A multicountry observational study. » *Lancet* 2015 ; 386 : 369-75.

Giguère M. (2009) : *Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains*, Institut national de santé publique du Québec, direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels, 95 p.

- Gilbert H. E., Rosado P. J., Ban-Weiss G., Harvey J. T., Li H., Mandel B. H., Millstein D., Mohegh, A., Saboori A., et Levinson R. M. (2017) : « Energy and environmental consequences of a cool pavement campaign », *Energy and Buildings*, 157, 53-77. <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/e-b-cool-pavement-campaign.pdf>
- Gilligan M. (2022) : « Alberta's historic heat wave last summer responsible for 66 deaths : report », CTV News. <https://calgary.ctvnews.ca/alberta-s-historic-heat-wave-last-summer-responsible-for-66-deaths-report-1.5792897>
- Gomez, M. (2021) : « B. C. Heat wave “cooks” fruit crops on the branch in sweltering Okanagan and Fraser Valleys », CBC News.
- GRAIE, Groupe de recherche, animation technique et information sur l'eau (2013, janvier) : Eau et Santé, 4^e conférence. « L'eau dans la ville : bien-être, risques et opportunités ».
- Guinaldo T., Saux Picart S. et Roquet H. (2022) : « Response of the sea surface temperature to heatwaves during the France 2022 meteorological summer », *EGUsphere*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-1119>
- Guo Y., Li T., Cheng Y., Ge T., Chen C. et Liu F. (2012) : « Prediction of heat-related mortality impacts under climate change scenarios in Shanghai », *Zhonghua Yu Fang Yi Xue Za Zhi* 2012; 46(11) : 1025-9.
- Harley, C. D. G. (2008) : « Tidal dynamics, topographic orientation, and temperature-mediated mass mortalities on rocky shores », *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 371, 37-46 (2008).
- He C., Kim H., Hashizume M., Lee W., Honda Y., Kim S., Schneider A., Zhang Y., Zhu Y., Chen R. et Kan H. (2022) : « The effects of night-time warming on mortality burden under future climate change scenarios : A modelling study », *Lancet Planet Health* 6(8) : e648-57.
- Helmuth B., Mieszkowska N., Moore P. et Hawkins S. J. (2006) : « Living on the Edge of Two Changing Worlds : Forecasting the Responses of Rocky Intertidal Ecosystems to Climate Change », *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 37, 373-404).
- Hémon D., Jouglu E., Clavel J., Laurent F., Bellec S. et Pavillon G. (2003a) : « Surmortalité liée à la canicule d'août 2003 en France », *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*.
- Hémon D. et Jouglu E. (2003) : « Surmortalité liée à la canicule d'août 2003 », *Rapport d'étape INSERM*.
- Henderson S. B., McLean K. E., Lee M. J. et Kosatsky T. (2021) : « Extreme heat events are public health emergencies » *BC Medical Journal* 63, 366-367.
- Henderson S. B., McLean K. E., Lee M. J. et Kosatsky T. (2022) : « Analysis of community deaths during the catastrophic 2021 heat dome : Early evidence to

inform the public health response during subsequent events in Greater Vancouver, Canada », *Environ. Epidemiol.* 6, e189.

Heron S. F., Johnston L., Liu G., Geiger E. F., Maynard J. A., de La Cour J. L., Johnson S., Okano R., Benavente D., Burgess T. F. R., Iguel J., Perez D. I., Skirving W. J., Strong A. E., Tirak K. et Eakin C. M. (2016) : « Validation of reef-scale thermal stress satellite products for coral bleaching monitoring », *Remote Sens.* 8 : 59.
<https://doi.org/10.3390/rs8010059>

Herring S. C., Christidis N., Hoell A., Hoerling M. P. et Stott P. A. (2021) : « Explaining extreme events of 2019 from a climate perspective », *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102 (1), S1-S115.

Hersbach H. et al. (2019) : « ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1979 to present », Copernicus Climate Change Service (C3S), Climate Data Store (CDS).

(Accessed on 2021-11-15 [geopotential height] and 2022-03-08 [potential temperature]) <https://doi.org/10.24381/cds.6860a573>

Hobday A., Alexander L., Perkins-Kirkpatrick S. E., Smale D., Straub S., Oliver E., Benthuysen J., Burrows M., Donat M., Feng M., Holbrook N., Moore P., Scannell H., Gupta A. et Wernberg T. (2016) : « A hierarchical approach to defining marine heatwaves », *Prog. Oceanogr.* 141 : 227-238.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>

Hughes T. P., Anderson K., Connolly S. R., Heron S. F., Kerry J. T., Lough J. M., Baird A. H., Baum J. K., Berumen M. L., Bridge T. C., Claar D. C., Eakin C. M., Gilmour J. P., Graham N. A. J., Harrison H. B., Hobbs J. P. A., Hoey A. S., Hoogenboom M., Lowe R. J., McCulloch M. T., Pandolfi J. M., Pratchett M., Schoepf V., Torda G. et Wilson S. K. (2018) : « Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene », *Science* 359 : 80-83.
<https://doi.org/10.1126/science.aan8048>.

Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth Ch., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussaillant I., Brun F. et Kääb A. (2021) : « Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century », *Nature* 592, 726– 731 (2021).

I4CE (2022) : *Se donner les moyens de s'adapter aux conséquences du changement climatique en France : De combien parle-t-on ?*
https://www.i4ce.org/wp-content/uploads/2022/07/Juin-2022_I4CE_besoins_adaptation.pdf

I4CE et Ramboll (2021) : *Défis économiques pour généraliser l'adaptation au changement climatique dans les territoires français.*
<https://www.i4ce.org/publication/les-defis-economiques-pour-generaliser-la-prise-en-compte-de-ladaptation-au-changement-climatique-dans-les-territoires-francais/>

I4CE et Ramboll (2020) : *Territoires : Les chantiers de l'adaptation.*
<https://www.i4ce.org/publication/adaptation-changement-climatique-territoires-france/>

I4CE et Ramboll (2022) : *Défis rencontrés par 5 démarches territoriales qui cherchent à être à la hauteur des enjeux d'adaptation*.

<https://www.i4ce.org/publication/defis-rencontres-par-5-demarches-territoriales-qui-cherchent-a-etre-a-la-hauteur-des-enjeux-de-ladaptation/>

IPCC (2019) : *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 755 p.

<https://doi.org/10.1017/9781009157964>

IPCC (2021) : *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, et B. Zhou (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, sous presse.

doi : 10.1017/9781009157896

IPCC (2022) : *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)], Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 3056 p.

IPCC (2022) : « Annex II : Glossary » [Möller, V., R. van Diemen, J. B. R. Matthews, C. Méndez, S. Semenov, J. S. Fuglestedt, A. Reisinger (eds.)], in : *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK, et New York, NY, USA, p. 2897-2930
doi : 10.1017/9781009325844.029

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Annex-II.pdf

Iwatsubo Y., Lapostolle A., Lagarrigue R., Le Tertre A. (2020) : « *Bilan de surveillance de l'impact des vagues de chaleur sur la santé des travailleurs* » 2018-2019, Saint-Maurice : Santé publique France.

Johnston J. et Newton J. (2004) : *Building Green : A Guide to Using Plants on Roofs, Walls and Pavements*, Londres, Ecology Unit, 95 p.

Jordan P. et Ashley Covert S. (2009) : « Debris Flows and Floods Following the 2003 Wildfires in Southern British Columbia », *Environ. Eng. Geosci.* 15, 217-234.

Klinenberg E. (2002). « *Heat wave, a social autopsy of disaster in Chicago* », University of Chicago Press.

Laaidi K., Gane J., Saoudi A., Zeghnoun A., Le Tertre A. (2022) : *Enquête sur les pratiques des communes pour prévenir les impacts sanitaires de la canicule*, Saint-Maurice : Santé publique France, 69 p.

Laaidi K., Mazzoni M., Perrey C., Beaudeau P., Pascal M. (2019) : « Canicule et personnes vulnérables, 2019 : Enquête sur les registres municipaux », *La Santé en actions* 2019(448) : 2.

Laaidi K., Pascal M., Léon C. et Beaudeau P. (2018) : « Réduire les impacts de la chaleur dans un contexte de changement climatique », *Soins* 2018; 63(823) : 30-2.

Laaidi K., Perrey C., Léon C., Mazzoni M. et Beaudeau P. (2019) : « Connaissances et comportements des Français face à la canicule », *La Santé en action* (448) : 47-8, Santé Publique France.

Laaidi K., Ung A., Wagner V., Beaudeau P. et Pascal M. (2012a) : *Système d'alerte canicule et santé : principes, fondements et évaluation*, Saint-Maurice, France : Santé publique France.

Laaidi K., Zeghnoun A., Dousset B., Bretin P., Vandentorren S., Giraudet E. et Beaudeau P. (2012b) : « The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave », *Environ Health Perspect.* 2012; 120(2) : 254-9.

Lainé M., Vanbockstaël C., Haeghebaert S., Allard V., Bargibant G., Heyman C., Moreau S., Prouvost H., Sarter H., Spaccaferri G., Chaud P. (2011) : *Bulletin de veille sanitaire – Bilan Sacs 2011, surveillance en Nord – Pas-de-Calais*, Santé publique France, 2011.

https://www.santepubliquefrance.fr/content/download/50891/document_file/bvs-bilan-sacs-npdc.pdf

Lau C.-A. et al. (2022) : « Hydro-geomorphic effects of the November 2021 atmospheric rivers on infrastructure in Southwestern British Columbia », in *Geohazards 8 : Proceedings of the 8th Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards*, Québec, Canada.

Lelong C. et Dubus L. (2022) : « Études prospectives en lien avec l'adaptation au changement climatique de RTE », in *La Prospective au service de l'adaptation au changement climatique*, Rapport au Premier ministre et au Parlement, ONERC, p. 212-216.

Lepape A. (2004) : « L'alerte météorologique en France – Évaluation des messages d'alerte de 1994 à 2000 », *La Météorologie*, 47, 34-42.

Le Tertre A., Empereur-Bissonnet P., Josseran L., Jouglu E., Laaidi K., Ledrans M. et Salines G. (2007) : « Première estimation de l'impact de la vague de chaleur sur la mortalité durant l'été 2006, France », *Bulletin épidémiologique hebdomadaire* 2007(22-23) : 190-2.

Létard V., Flandre H. et Lepeltier S. (2004) : « La France et les Français face à la canicule : les leçons d'une crise », *Rapport d'information* n° 195, Sénat, Paris.

Lionello P., et L. Scarascia (2018) : « The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming », *Reg. Environ. Chang.* 18 : 1481-1493.
<https://doi.org/10.1007/s10113-018-1290-1>

Loi n° 2004-626 du 30 juin 2004 relative à la solidarité pour l'autonomie des personnes âgées et des personnes handicapées.
<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000622485/>

Loi n° 2021-1018 du 2 août 2021 pour renforcer la prévention en santé au travail.
<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGIARTI000043886733/2022-03-31/>

Marbà N. et Duarte C. M. (2010) : « Mediterranean warming triggers seagrass (*Posidonia oceanica*) shoot mortality », *Global Change Biology*, 16, 2366– 2375.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02130.x>

Marquès E., V. Masson, P. Naveau, O. Mestre, V. Dubreuil et Y. Richard (2022) : « Urban heat island estimation from crowd sensing thermometers embedded in personal cars », *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(4), E1098-E1113, doi : 10.1175/BAMS-D-21-0174.1

Masson, V., Lemonsu A., Martinet P., Denjean C., Boissard C., Cantrell C., Michoud V., Gros V., Haeffelin M., Kotthaus S., Leymarie J., Madelin M. et Price J. (2022) : « Une campagne de mesures sur le climat urbain et la qualité de l'air de la région parisienne », *La Météorologie*, 118, 4-6, 2022.
doi : 10.37053/lameteorologie-2022-0049

Menounos B., Anslow F., Bevington A., Onwukwe C., Townend J., Heathfield D., Shea J., Darychuk S., Shugar D., Flowers G. et Jackson P. (2021) : « Cryospheric response to the June, 2021 Heat Dome », in *AGU Fall Meeting 2021*, (AGU, 2021).

Middel A., Turner V. K., Schneider F. A., Zhang Y. et Stiller M. (2020) : « Solar reflective pavements – A policy panacea to heat mitigation? », *Environmental Research Letters*, 15(6), 064016.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab87d4>

Michau Y., Lemonsu A., Lucas-Pircher P. et Caillaud C. (2022) : « Evaluation of the Urban Heat Island of 12 Cities of France in a High-Resolution Regional Climate Model Simulation », SSRN.
<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4213505>

Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation/CGAER (2020) : Mission d'appui à la direction générale de l'alimentation (DGAL) portant sur l'élaboration d'un plan national de prévention et de gestion des conséquences de futurs épisodes de vagues de chaleur.

Ministère de l'Intérieur (2021) : Guide *Faire face aux vagues de chaleur avec votre plan communal de sauvegarde – Recommandations aux maires et bonnes pratiques*.
https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/guide_pcs_vagues_de_chaleur_-_juin_2021.pdf

Ministère de la Santé et des Solidarités (2021) : *Guide ORSEC départemental S6 : Dispositions spécifiques gestion sanitaire des vagues de chaleur*.

Ministère de la Santé et des Solidarités (2004) : *Plan national canicule, Actions nationales et locales à mettre en œuvre par les pouvoirs publics afin de prévenir et réduire les conséquences sanitaires d'une canicule.*

https://urgences-serveur.fr/IMG/pdf/plan_canicule.pdf

Ministère de la Santé et des Solidarités (2021) : instruction interministérielle n° DGS/VSS2/DGOS/DGCS/DGT/DGSCGC/DGEC/DJEPVA/DS/DGESCO/DIHAL/2021/99 du 7 mai 2021 relative à la gestion sanitaire des vagues de chaleur en France métropolitaine.

Ministère de la Transition écologique et solidaire, ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (2020) : *Retour d'expérience sur l'épisode caniculaire et la sécheresse 2019*, rapport CGEDD n° 013098-01, CGAAER n° 19098

Neal E., Huang C. S. Y. et Nakamura N. (2022) : « The 2021 Pacific Northwest heat wave and associated blocking : Meteorology and the role of an upstream cyclone as a diabatic source of wave activity », *Geophys. Res. Lett.* 49.

Oke T. R., Mills G., Christen A., Voogt J. (2017) : *Urban Climate*, Cambridge, UK : Cambridge Univ. Press.

Oliver E. C. J., Benthuisen J. A., Darmaraki S., Donat M. G., Hobday A. J., Holbrook N. J., Schlegel R. W. et Gupta A. S. (2021) : « Marine Heatwaves », *Ann. Rev. Mar. Sci.* 13 : 313-342.

<https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032720-095144>

Masson V., Lemonsu A., Hidalgo J. et Voogt J. (2020) : « Urban Climates and Climate Change », *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 411-444.
doi : 10.1146/annurev-environ-012320-083623

Oregon Office of Emergency Management (2021) : *Initial After-Action Review of the June 2021 Excessive Heat Event*. https://www.oregon.gov/oem/Documents/2021_June_Excessive_Heat_Event_AAR.pdf

Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) (2018) : *Climate Adaptation Synthesis*.

Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) (2022a) : *Climate Change : Climate Risk Assessment, Adaptation and Resilience – Key steps in Aviation Organisation Climate Change Risk Assessment and Adaptation Planning*.

Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) (2022b) : *Climate Change : Climate Risk Assessment, Adaptation and Resilience – Key Climate Change Vulnerabilities of Aviation Organisations*.

Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) (2022c) : *Climate Change : Climate Risk Assessment, Adaptation and Resilience – Menu of Adaptation options*.

Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) (2022d) : *Climate Resilient Airports – Eco Airport Toolkit*.

- Organisation mondiale de la météorologie et Organisation mondiale de la santé (2015) : Vagues de chaleur et santé : guide pour l'élaboration de systèmes d'alerte, OMM n° 1142. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3370
- Ostrom E. (2014) : « A polycentric approach for coping with climate change », *Annals of Economics and Finance*, 15(1), 97-134.
- Ouzeau G., Déqué M., Jouini M., Planton S., Vautard R. et Vrac M. (2014) : « Scénarios régionalisés », in : *Le Climat de la France au XXI^e siècle*, volume 4, Rapport de la mission Jean Jouzel, ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 63 p.
- Ouzeau G., Soubeyrou J.-M., Schneider M., Vautard R. et Planton S. (2016) : « Heat waves analysis over France in present and future climate : application of a new method on the Euro-CORDEX ensemble », *Climate Services*, 4, 1-12. doi:10.1016/j.cliser.2016.09.002
- Parey S. and Marty A. (2021), « Resilience of the French Distribution Network to Climate Change : Projected Changes for Main Meteorological Hazards around 2050 ». CIRED conference, paper 0468.
- Pascal M., Lagarrigue R., Tabai A., Bonmarin I., Camail S., Laaidi K., Le Tertre A. et Denys S. (2021a) : « Evolving heat waves characteristics challenge heat warning systems and prevention plans », *International Journal of Biometeorology* 65, 1683-1694.
- Pascal M., Wagner V. et Corso M. (2022) : *Évolution de la relation température-mortalité en France depuis 1970*, Saint-Maurice, France : Santé publique France.
- Pascal M., Wagner V., Corso M., Lagarrigue R., Solet J.-L., Daudens E., Aubert L. et Rousseau C. (2021b) : Influence de la température sur la mortalité dans les départements et régions d'outre-mer. Saint-Maurice (France); 2021.
- Pascal M., Wagner V., Corso M., Lagarrigue R., Solet J.-L., Daudens E., Aubert L. et Rousseau C. (2022) : « Influence of temperature on mortality in the French overseas regions : a pledge for adaptation to heat in tropical marine climates », *International Journal of Biometeorology*. 2022; 66 : 1057-65.
- Perez T., Garrabou J., Sartoretto S., Harmelin J.-G., Francour P. et Vacelet J. (2000) : « Mass mortality of marine invertebrates : An unprecedented event in the north occidental Mediterranean » *Comptes rendus de l'Académie des sciences – Series III, Sciences de la vie*, 323, 853 –865. [https://doi.org/10.1016/S0764-4469\(00\)01237-3](https://doi.org/10.1016/S0764-4469(00)01237-3)
- Philip S. Y., Kew S. F., van Oldenborgh G. J., Anslow F. S., Seneviratne S. I., Vautard R., et Otto, F. E. (2021) : « Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada in June 2021 », *Earth System Dynamics*, 13, 1689-1713.

Poumadère M., Mays C., Le Mer S. et Blong R. (2005) : «The 2003 heat wave in France : dangerous climate change here and now», *Risk Analysis*, 25, 1483-1494

Reeves-Latour J. (2017) : *La Représentation du bien-être en contexte de verdissement urbain : le cas des ruelles vertes de l'île de Montréal.*

Ribes A., Boé J., Qasmi S., Dubuisson B., Douville H. et Terray L. (2022) : «An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint», *Earth System Dynamics*, 13, p. 1397-1415.

Robin Y. et Ribes A. (2020) : «Nonstationary extreme value analysis for event attribution combining climate models and observations», *ASCMO*, 6 (2), 205– 221, doi : 10.5194/ascmo-6-205-2020.

Robin Y., Drouin A., Soubeyrou J.-M., Ribes A. et Vautard R. (2021) : « Comment attribuer une canicule au changement climatique ? », *La Météorologie*, 115, 28-36, doi : 10.37053/lameteorologie-2021-0090.

Roffel B. et Famed B. C. (2021) : «Hiking trail to remain closed for rest of 2021 because of flooding damage », *CBC News*.

Ruax Q. (2022) : «Pendant la canicule, pourquoi certaines routes deviennent blanches », *Le Télégramme*.

Santé publique France (2022) : «Canicule et santé. Été 2022 », *Bulletin de santé publique* 2022 ; 1-10.

Santé publique France (2019) : *S'adapter à la chaleur dans un contexte de changement climatique*, Saint-Maurice, France.

Santé publique France (2021) : Fortes chaleurs, canicule : données.
https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-desante/_climat/fortes-chaleurs-canicule/donnees/#tabs

Schneider M. et Corre L. (2022) : «Evolution passée et future des vagues de chaleur en France», 35^e Colloque annuel de l'Association internationale de climatologie – AIC 2022

Schramm P. J., Vaidyanathan A., Radhakrishnan L., Gates A., Hartnett K. et Breyse P. (2021) : «Heat-Related Emergency Department Visits During the Northwestern Heat Wave – United States, June 2021 », *MMWR Morb. Mortal. Wkly. Rep.* 70, 1020-1021 (2021).

Seneviratne S. I., Luu L. N., Arrighi J., Singh R., van Aalst M., Hauser M., Schumacher D. L., Pereira Marghidan C., Ebi K. L., Bonnet R., Vautard R., Tradowsky J., Coumou D., Lehner F., Wehner M., Rodell C., Stull R., Howard R., Gillett N. et Otto F. E. (2021) : «Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada in June 2021», *Earth System Dynamics Discussions*, 1-34.

Slavicek, M. (2022) : « Comment la canicule malmène les infrastructures ferroviaires et oblige les trains à rouler au ralenti », *Le Monde*.

- Smale D. A., Wernberg T., Oliver E. C. J., Thomsen M., Harvey B. P., Straub S. C., Burrows M. T., Alexander L. V., Benthuyzen J. A., Donat M. G., Feng M., Hobday A. J., Holbrook N. J., Perkins-Kirkpatrick S. E., Scannell H. A., Gupta A. S., Payne B. L. et Moore P. J. (2019) : « Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services » *Nat. Clim. Chang.* 9 : 306– 312.
<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0412-1>
- Smith K. E., Burrows M. T., Hobday A. J., Gupta A. S., Moore P. J., Thomsen M., Wernberg T. et Smale D. A. (2021) : « Socioeconomic impacts of marine heatwaves : Global issues and opportunities », *Science* (80). 374.
<https://doi.org/10.1126/science.abj3593>
- Solcerova A., van Emmerik T., Hilgersom K., van de Ven F. et van de Giesen N. (2018) : « Uchimizu : A Cool(ing) Tradition to Locally Decrease Air Temperature » *Water*, 10(6), 741.
doi:10.3390/w10060741
- Soubeyrou J.-M., Bernus S., Corre L., Drouin A., Dubuisson B., Etchevers P., Gouget V., Josse P., Kerdoncuff M., Samacoits R. et Tocquer F. (2021) : *Les Nouvelles Projections climatiques de référence Drias 2020 pour la Métropole*.
<http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>
- Soubeyrou J.-M., Ouzeau G., Schneider M., Cabanes O. et Kounkou R. (2016) : « Les vagues de chaleur en France : analyse de l'été 2015 et évolutions attendues en climat futur », *La Météorologie*, 94, 45-51.
- Thompson V., Kennedy-Asser A. T., Vosper E., Eunice Lo Y. T., Huntingford C., Andrews O., Collins M., Hegerl G. C. et Mitchell D. (2022) : « The 2021 western North America heat wave among the most extreme events ever recorded globally », *Sci Adv* 8, eabm6860 (2022).
- Vagasky, C. (2022) : *Pyrocumulonimbus event in British Columbia, Canada*.
<https://www.vaisala.com/en/blog/2023-03/pyrocumulonimbus-event-british-columbia-canada>
- Van Oldenborgh G. J., Wehner M. F., Vautard R., Otto F. E. L., Seneviratne S. I., Stott P. A., Hergerl G. C., Philip S. Y. et Kew S. F. (2022) : « Attributing and Projecting Heatwaves Is Hard : We Can Do Better », *Earth's Future*, 10(6), p. e2021EF002271.
doi:10.1029/2021EF002271
- Vandentorren S., Bretin P., Zeghnoun A., Mandereau-Bruno L., Croisier A., Cochet C., Ribéron J., Siberan I., Declercq B. et Ledrans M. (2006) : « August 2003 heat wave in France : risk factors for death of elderly people living at home », *European Journal of Public Health* 2006 ; 16(6) : 583-91.
- Vautard R., van Aalst M., Boucher O., Drouin A., Haustein K., Kreienkamp F., van Oldenborgh G., Otto F., Ribes A., Robin Y., Schneider M., Soubeyrou J.-M., Stott P., Seneviratne S., Vogel M. et Wehner M. (2020) : « Human contribution to the record-breaking June and July 2019 heat waves in Western Europe », *ERL*, 15 (9), 094077.
doi:10.1088/1748-9326/aba3d4

Verrier A., Rey J., Salvaing L., Gorza M. et Bonmarin I. (2022) : « Freins à l'adoption des gestes de prévention en période de canicule », *Bull Epidemiol Hebd.* 2022;(6) : 116-21. Santé publique France, 2021.

Vicedo-Cabrera A., Scovronick N., Sera F., Royé D., Schneider R., Tobias A. et al. (2021) : « The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change », *Nature Climate Change* 2021 ; 11(6) : 492-501.

Volker S., Baumeister H., Clasen T., Hornberg C. et Kistemann T. (2013) : « Evidence for the temperature mitigating capacity of urban blue space – A health geographic perspective », *Erdkunde*, 67(4), 355-371

Washington State Department of Health (2021) : Heat Wave 2021.
<https://doh.wa.gov/emergencies/be-prepared-be-safe/severe-weather-and-natural-disasters/hot-weather-safety/heat-wave-2021>

Weis V. M. (2008) : Cellular mechanisms of Cnidarian bleaching : stress causes the collapse of symbiosis », *J. Exp. Biol.* 211 : 3059-3066.
<https://doi.org/10.1242/jeb.009597>

White R., Anderson S., Booth J., Braich G., Draeger C., Fei C., Harley C., Henderson S., Jakob M., Lau C.-A., Admasu L. M., Narinesingh V., Rodell C., Roocroft E., Weinberger K. et West G. (2022) : « The Unprecedented Pacific Northwest Heatwave of June 2021 », *Nature Communications*.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1520351/v1>

World Health Organization, Regional Office for Europe (2009) : « Improving public health responses to extreme weather/heat-waves – EuroHEAT », Copenhagen, Denmark.

World Meteorological Organization (2017) : *Energy Exemplar to the user interface platform of the Global Framework for Climate Services*.

World Meteorological Organization (2019) : *The Global Climate in 2015-2019*.
https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9936

Rapport d'activité de l'Observatoire

Créé par la loi du 19 février 2001, l'ONERC matérialise la volonté du Parlement et du Gouvernement d'intégrer les effets du changement climatique dans les politiques publiques environnementales en France métropolitaine et d'outre-mer. L'ONERC est rattaché au ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (MTECT) et au ministère de la Transition énergétique (MTE) via le service climat et efficacité énergétique de la direction générale de l'énergie et du climat (DGEC).

L'orientation de l'action de l'ONERC est assurée depuis 2017 (décret n° 2017-211 du 20 février 2017) par une commission spécialisée dédiée du Conseil national de la transition écologique présidée par M. Ronan Dantec, sénateur de la Loire-Atlantique (arrêté du 14 avril 2017). L'ONERC est dirigé par M. Laurent Michel, directeur général de l'énergie et du climat. Le secrétariat général est assuré par M. Éric Brun, assisté de cinq chargés de mission, dont une adjointe au secrétaire général. L'équipe de l'ONERC a été appuyée sur la période couverte par ce rapport par une chargée de mission vacataire et a accueilli plusieurs stagiaires.

L'ONERC a pour missions principales de collecter et diffuser les informations sur les risques liés au réchauffement climatique et de formuler des recommandations sur les mesures d'adaptation à envisager pour limiter les impacts du changement climatique. Il assure également, depuis sa création, la fonction de point focal de la France au sein du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

Au sein du service climat et efficacité énergétique, l'ONERC constitue le «pôle Adaptation au changement climatique» de la DGEC, en charge de la coordination de la politique nationale d'adaptation.

Cette annexe, sans être exhaustive, présente les principales actions de l'ONERC entre octobre 2021 et décembre 2022.

Table des matières

Action internationale	231
Politique d'adaptation au changement climatique	240
Information, formation et communication	243

Action internationale

La fonction de point focal du GIEC pour la France a occupé une large part des activités internationales de l'observatoire sur la période couverte par le présent rapport d'activité. En outre, l'ONERC a intensifié sa participation régulière aux autres travaux internationaux, notamment au niveau de l'Union européenne (contribution aux missions de la présidence française du Conseil de l'Union européenne du 1^{er} janvier 2022 au 30 juin 2022) et de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC). L'ONERC a de surcroît développé des relations multilatérales et bilatérales avec les services en charge des politiques publiques d'adaptation dans plusieurs pays.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)

Depuis plus de 30 ans, le GIEC évalue l'état des connaissances sur l'évolution du climat, ses causes, ses impacts. Il identifie également les possibilités de limiter l'ampleur du réchauffement et la gravité de ses impacts et de s'adapter aux changements attendus. Les rapports du GIEC fournissent un état des lieux régulier des connaissances les plus avancées. Cette production scientifique est au cœur des négociations internationales sur le climat. Elle est aussi fondamentale en tant que source scientifique sur laquelle s'appuie le gouvernement français pour définir sa politique climatique ainsi que pour informer et alerter les décideurs et la société civile.

6^e cycle d'évaluation du GIEC

Le 6^e cycle GIEC a débuté en octobre 2015 et se terminera d'ici fin juillet 2023 avec l'élection d'un nouveau bureau.

Trois rapports spéciaux ont déjà été produits au cours de ce 6^e cycle :

- un premier rapport spécial sur l'impact d'un réchauffement global de 1,5 °C au-dessus des niveaux préindustriels et sur les trajectoires d'émission de gaz à effet de serre correspondantes a été publié le 8 octobre 2018 ;
- le 8 août 2019, un deuxième rapport spécial sur les liens entre le changement climatique, la désertification, la dégradation des terres, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres a été publié ;
- le 25 septembre 2019, un troisième rapport spécial sur les liens entre le changement climatique, les océans et la cryosphère a été publié.

En mai 2019, a également été produite une mise à jour du guide méthodologique sur les inventaires nationaux d'émissions de gaz à effet de serre datant de 2006.

Le GIEC a déjà publié les 3 volumes de son 6^e rapport d'évaluation (AR6) :

Volume 1 : les bases physiques du changement climatique, publié en août 2021 ;

Volume 2 : les impacts, les risques, l'adaptation et la vulnérabilité au changement climatique, publié en février 2022 (cf. encadré 4, ci-après) ;

Volume 3 : l'atténuation du changement climatique, publié en avril 2022 (cf. encadré 5, ci-après).

Le 6^e cycle du GIEC se conclura par la publication de son rapport de synthèse (SYR) qui sera publié en mars 2023. Le résumé pour décideurs du rapport de synthèse est le produit phare concluant un cycle.

L'AR6 du GIEC sera en outre l'intrant scientifique principal du premier bilan mondial de l'accord de Paris qui sera établi en 2023.

Encadré 4

Volume 2 du 6^e rapport d'évaluation du GIEC « changement climatique : impacts, adaptation et vulnérabilité »

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a publié en février 2022 le deuxième volume de son 6^e rapport d'évaluation. Ce rapport est le fruit d'une collaboration internationale de 300 auteurs scientifiques (dont 5 travaillent en France) issus de 67 pays, ainsi que d'un long processus transparent et inclusif d'expertise collective. Ainsi plus de 62 000 commentaires de gouvernements et d'experts ont été examinés par les auteurs et ont tous reçu une réponse.

Dans ce deuxième volume, le GIEC atteste d'une augmentation des risques (vagues de chaleur, précipitations extrêmes, sécheresses, fonte de la cryosphère, changement du comportement de nombreuses espèces...) pour un même niveau de réchauffement par rapport au 5^e rapport d'évaluation de 2014. Le changement climatique impacte de plus en plus les écosystèmes, la sécurité de l'accès à l'eau et à l'alimentation, les infrastructures, la santé et le bien-être, ainsi que l'économie et la culture. Avec l'augmentation du réchauffement, les risques vont s'aggraver dans toutes les régions du monde, en particulier dans les plus vulnérables.

Ce volume fait également le point sur les politiques d'adaptation déjà engagées et identifie celles qui doivent être mises en œuvre pour faire face à l'augmentation des risques. Le nombre de mesures d'adaptation a ainsi considérablement augmenté depuis le 5^e rapport, mais la plupart se focalisent sur les ressources en eau (cette insécurité concerne la moitié de la population mondiale) et leurs effets sont encore mal évalués. Plus inquiétant, le GIEC identifie des seuils de réchauffement provoquant des impacts irréversibles sur la perte de la biodiversité et pointe le fait que certaines limites d'adaptation ont déjà été atteintes. De manière générale, les experts soulignent que le fait de retarder les politiques d'adaptation compromet leur efficacité et en augmente le coût.

Encadré 5

Volume 3 du 6^e rapport d'évaluation du GIEC « atténuation du changement climatique »

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a publié en avril 2022 le troisième volume de son 6^e rapport d'évaluation. Ce rapport est le fruit d'une collaboration internationale de 278 auteurs scientifiques (dont 5 travaillent en France) issus de 65 pays, ainsi que d'un long processus transparent et inclusif d'expertise collective. Ainsi plus de 59 000 commentaires de gouvernements et d'experts ont été examinés par les auteurs et ont tous reçu une réponse.

Le troisième et dernier volume du 6^e rapport d'évaluation du GIEC fait le point sur l'atténuation, c'est-à-dire les mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Selon cette nouvelle évaluation, les émissions mondiales ont continué à augmenter fortement au cours de la dernière décennie, mais moins vite que lors de la décennie précédente. Autre constat, même si le coût des énergies renouvelables a considérablement baissé et si leur déploiement s'est accéléré, cela n'a pas permis de réduire les émissions venant des combustibles fossiles. Plus largement, les experts alertent : même si les contributions déterminées au niveau national (CDN) dans le cadre de l'Accord de Paris sont respectées d'ici 2030, l'objectif de réchauffement global de 1,5 °C qui fait partie de l'objectif de température de cet accord est probablement hors de portée et celui de rester bien en dessous de 2 °C, qui en fait également partie, nécessitera des réductions d'émissions très fortes après 2030. Les politiques actuelles des pays conduiraient à un réchauffement global de 3,2 °C d'ici la fin du siècle, par rapport au niveau préindustriel.

Limiter le réchauffement à 1,5 °C nécessite d'atteindre le « zéro émission nette » de CO₂ à l'échelle mondiale en 2050. Cela ne sera possible que si tous les secteurs font leur transition : bâtiments, transports, énergie, industrie, agriculture, etc. Le rapport du GIEC détaille les solutions pour parvenir à réduire drastiquement les émissions de GES.

Réunions plénières et du bureau du GIEC

En coordination avec les ministères en charge de la Recherche (MESR) et des Affaires étrangères (MEAE), l'ONERC, en tant que point focal du GIEC pour la France, assure la représentation permanente de la France au sein des organes de gouvernance du GIEC.

Sur la période couverte par ce rapport, l'ONERC a ainsi participé à 3 réunions du bureau du GIEC et à trois réunions plénières du GIEC.

Les 55^e et 56^e réunions plénières du GIEC (IPCC-55 du 14 au 24 février 2022 et IPCC-56 du 21 mars au 4 avril 2022) ont permis d'approuver le rapport du Groupe de travail 2 et le rapport du Groupe de travail 3 (cf. encadrés 4 et 5). En raison de la pandémie, le processus d'approbation de ces deux volumes a été tenu entièrement en virtuel.

La 57^e réunion plénière du GIEC (IPCC-57) s'est tenue en Suisse, à Genève, du 27 au 30 septembre 2022. Elle visait principalement à préparer les conditions d'installation (en particulier la composition et la tenue des élections) du futur bureau du GIEC en vue du prochain cycle de travail (7^e). Cette première réunion en présentiel depuis IPCC-52 (février 2020) a notamment permis de programmer le calendrier des élections pour l'installation du prochain bureau du GIEC, étape nécessaire pour lancer les travaux de recherche du prochain cycle. Ces élections se tiendront d'ici fin juillet 2023.

6^e cycle en France

Sur la période d'octobre 2021 à décembre 2022, l'ONERC a organisé, en coordination avec le MEAE et le MESR, les dernières revues gouvernementales du résumé à l'intention des décideurs des volumes 2 et 3 du 6^e Rapport d'évaluation du GIEC ainsi que la revue par le gouvernement français de la première version du Rapport de synthèse (SYR). Ces revues se sont appuyées principalement sur l'expertise des services des ministères représentés dans l'équipe interministérielle de négociations sur le climat, et sur l'expertise du MESR et d'organismes scientifiques et techniques.

Les ultimes revues des volumes 2 et 3 ne concernaient que le résumé pour décideurs et ont été menées par l'ONERC respectivement du 1^{er} octobre au 26 novembre 2021 et du 29 novembre 2021 au 30 janvier 2022. 456 commentaires pour le volume 2 et 496 pour le volume 3 ont été transmis au GIEC, à la suite d'une large mobilisation d'environ une trentaine de services étatiques et d'organismes scientifiques et techniques, comprenant au total une soixantaine de relecteurs. À la suite de ces dernières revues, les sessions de négociations ont abouti à la publication des volumes 2 et 3 en février et avril 2022.

Parallèlement, la première revue gouvernementale du rapport de synthèse s'est tenue du 10 janvier au 20 mars 2022, mobilisant 19 organismes et aboutissant à l'envoi de 397 commentaires. La deuxième revue se s'est tenue du 21 novembre 2022 au 15 janvier 2023 pour une publication le 20 mars 2023 qui achèvera la production scientifique du 6^e cycle du GIEC.

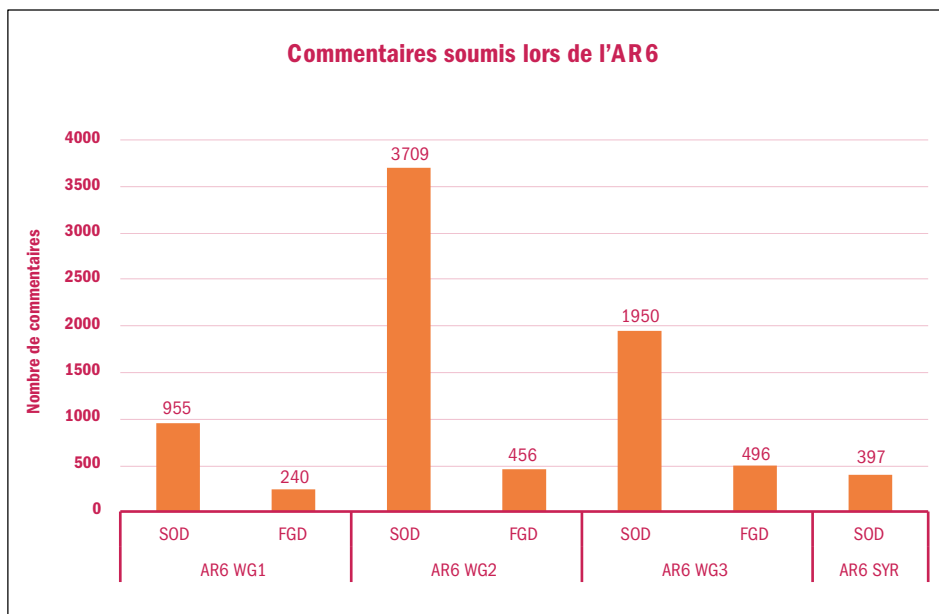


Figure 1 : Revues gouvernementales du 6^e rapport d'évaluation du GIEC entre octobre 2019 et mars 2022. Nombre de commentaires soumis par la France lors des revues de la deuxième version (SOD) et de la dernière version (FGD) des différents projets de rapports constituant les volumes 1, 2 et 3 ainsi que le rapport de synthèse.

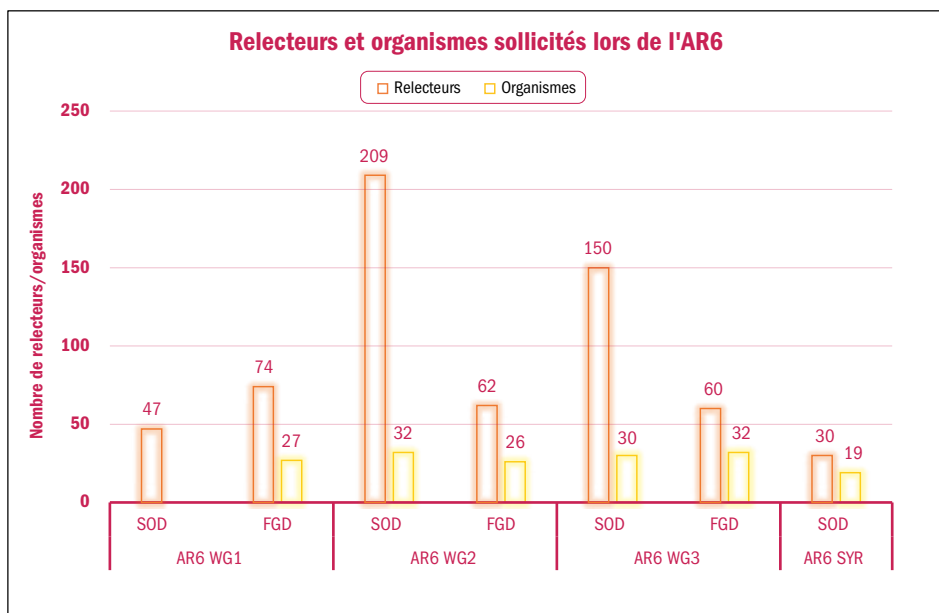


Figure 2 : Nombre de relecteurs et d'organismes contributeurs aux revues gouvernementales de la France entre octobre 2019 et mars 2022. Revue de la deuxième version (SOD) et de la dernière version (FGD) des différents projets de rapports.

Enfin, sur toute la période du 6^e cycle du GIEC, le financement de l'unité d'appui technique (en anglais Technical Support Unit – TSU) du Groupe de travail 1 du GIEC est assuré par la France. Le suivi du financement et des activités de cette TSU est assuré par l'ONERC, le MESR et le MEAE. L'ONERC a de plus coordonné le versement de la contribution française 2019, 2020, 2021 et 2022 au budget central de fonctionnement du GIEC.

Rencontres entre experts français de l'IPBES et du GIEC

Des rencontres entre experts français de l'IPBES et du GIEC sont organisées régulièrement par la Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB), qui assure le secrétariat scientifique du Comité français pour l'IPBES, et l'ONERC. Elles sont à destination des experts français qui participent ou seraient amenés à participer aux travaux des plateformes intergouvernementales scientifiques et politiques de l'IPBES (Plateforme intergouvernementale scientifique et politique pour la biodiversité et les services écosystémiques) et du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).

L'objectif principal de cet événement est l'échange d'expérience, au sein et entre les communautés de recherche sur la biodiversité et le climat. Les décideurs, par exemple les ministères ou institutions qui représentent la France à l'IPBES, au GIEC, mais aussi auprès des accords multilatéraux environnementaux, ou les décideurs à d'autres échelons (collectivités, entreprises, etc.), sont également invités en tant qu'acteurs clés à l'interface science-politique.

L'édition 2022, organisée le 1^{er} juin et accueillie par la Caisse des dépôts et consignations (CDC), a été introduite par Éric Lombard (directeur général de la CDC), Hélène Soubelet (directrice de la FRB) et Éric Brun (secrétaire général de l'ONERC). Puis, les participants (environ 50 personnes) ont été conviés à plusieurs sessions de tables rondes sur les sujets suivants :

1. l'implication des parties prenantes en tant qu'experts dans les travaux de l'IPBES et du GIEC ;
2. l'optimisation des processus de relecture des rapports de l'IPBES et du GIEC ;
3. l'expérience en tant qu'auteur d'une évaluation IPBES ou GIEC ;
4. le traitement des enjeux de gouvernance dans les évaluations IPBES et GIEC.

Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC)

Dans le cadre de l'appui aux négociations climatiques mondiales, l'ONERC participe également, avec le département de la lutte contre l'effet de serre du ministère de la Transition énergétique, au groupe informel d'experts européens consacré aux sujets scientifiques ayant pour objectif de construire une vision commune sur ces sujets au sein des États membres de l'Union européenne.

L'année 2022 a marqué la reprise des grands rendez-vous de négociations climatiques en présentiel où l'ONERC s'est fortement impliqué pour appuyer les efforts de l'Union européenne en faveur des résultats du GIEC, combinant son rôle durant la présidence française de l'Union européenne avec celui de point focal du GIEC. La sortie, en début d'année 2022, des rapports des groupes de travail du GIEC sur l'adaptation et l'atténuation a suscité un vif intérêt des Parties à la CCNUCC. Leurs auteurs ont présenté les travaux de manière détaillée lors d'événements spécifiques et informé de nombreux points à l'agenda des négociations (atténuation, adaptation, pertes et dommages, les soutiens à la mise en œuvre et le bilan mondial p. ex.). À la COP27, en novembre 2022, l'ONERC a continué à soutenir l'équipe de négociation française sur les sujets scientifiques.

Task force sur l'adaptation au changement climatique de l'OCDE

L'ONERC est le point focal de la *task force* établie depuis février 2020 et qui informe les travaux du comité de politiques environnementales de l'OCDE. Les réunions thématiques de la *task force* en 2022 ont couvert un champ de plus en plus large : les pertes et dommages dans le contexte du changement climatique, les systèmes de suivi et évaluation des actions d'adaptation, les villes résilientes et, liées, les solutions fondées sur la nature par exemple. Cela répond à un intérêt croissant, tant au niveau national des pays membres que dans les forums internationaux. Ces travaux permettent la mise en réseau et l'échange de connaissances techniques entre acteurs d'adaptation, informent les efforts de la France pour s'adapter au changement climatique et vice versa. L'ONERC continue en conséquence à faciliter la coopération entre la France et l'OCDE dans ce domaine.

Espace européen

● *Présidence française du Conseil de l'Union européenne*

Du 1^{er} janvier au 30 juin 2022, la France a assuré la présidence du Conseil de l'Union européenne (PFUE). Cette présidence, située à mi-parcours du mandat de la Commission qui a fait du Pacte vert européen la pierre angulaire de sa feuille de route, a été marquée par la sortie de crise liée à la pandémie de Covid-19.

Au nom de la DGEC, l'ONERC a assuré la présidence du groupe d'experts européens chargé de formuler la position de l'Union européenne concernant les sujets scientifiques débattus sous la Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique (CCNUCC). Il a également présidé ce groupe de l'UE pendant les négociations climatiques à Bonn en juin. L'ONERC a par ailleurs organisé la première réunion de coordination hybride de ce groupe depuis le début de la pandémie.

Encadré 6

Évènement PFUE sur l'adaptation au changement climatique

Dans le cadre de la Conférence ministérielle pour le climat, organisée par le ministère en charge de la Transition écologique, l'ONERC a organisé un atelier d'échanges entre experts européens sur l'adaptation au changement climatique le 8 mars 2022. Cet atelier a été introduit par une présentation des principales conclusions du rapport du groupe de travail II du GIEC sur les impacts, l'adaptation et la vulnérabilité au changement climatique par ses coprésidents ainsi que par un focus sur les impacts et l'adaptation dans les petites îles et les États insulaires. L'atelier s'est articulé autour de trois tables rondes. La première table ronde sur la gouvernance de la politique d'adaptation a réuni l'ambassadeur climat de la France et des représentants de la direction générale de l'Office espagnol du changement climatique, de la direction générale en charge du Climat de la Commission européenne et des associations Climate Alliance et Climate Chance avec pour objectif de questionner le rôle respectif de l'Europe, des États et des territoires. La deuxième table ronde a réuni des experts de Météo-France, du CEREMA, de la direction des services climatiques des Pays-Bas, du programme d'observation de la Terre de l'UE Copernicus, de l'observatoire pyrénéen du changement climatique et d'AcclimaTerra pour présenter les outils à disposition des territoires européens pour s'adapter au changement climatique. La troisième table ronde a réuni des experts de la direction générale de la Politique régionale et urbaine de la Commission européenne, du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, de la fondation italienne de recherche CIMA, de la direction de la transition énergétique et des territoires de la région Sud et de l'EPTB Seine Grands Lacs pour présenter les dispositifs et aides financières à la disposition des territoires pour s'adapter au changement climatique.

Représentant la DGEC, l'ONERC siège pour la France au sein du groupe de travail mis en place par la direction générale Climat de la Commission européenne pour le suivi de la stratégie européenne d'adaptation adoptée en 2013 et révisée en 2021. Dans le cadre de la gouvernance de l'union de l'énergie, l'ONERC met à jour tous les deux ans, depuis mars 2021, les informations concernant la politique et les actions d'adaptation en France sur l'outil dédié de rapportage. Ces informations sont ensuite diffusées sur la plate-forme d'échange *Climate Adapt*¹ par l'Agence européenne de l'environnement (AEE). L'ONERC soutient également les équipes en charge de la mise à jour du plan national énergie climat qui est en préparation pour 2023.

1. <http://climate-adapt.eea.europa.eu/>

Sous la coordination du CGDD/SDES du ministère, l'ONERC fait partie du groupe de travail fédéré dans le réseau Eionet rassemblant les correspondants de l'Agence européenne de l'Environnement (AEE) intéressés par les problématiques d'observation des effets du changement climatique et de l'adaptation. À ce titre, l'ONERC a participé à l'atelier annuel sur les impacts du changement climatique, la vulnérabilité et l'adaptation en septembre 2022 à l'AEE. Par ailleurs, l'ONERC contribue aux différentes publications de l'AEE sur les sujets d'adaptation tels que les coûts de l'inaction et de l'adaptation, les impacts des sécheresses sur les écosystèmes, le rafraîchissement durable des bâtiments, le statut des actions d'adaptation nationales en Europe ou bien le lien entre changement climatique et santé par exemple.

L'Observatoire pyrénéen sur le changement climatique (OPCC) a invité l'ONERC à faire partie de son comité de pilotage. Le colloque final du projet ADAPYR et des autres programmes associés (ACCLIMAFOR, FLORAPYR Avance et ADNPy) organisé à Bilbao les 19 et 20 mai 2022 a été l'occasion pour l'ONERC de présenter le Centre de ressources sur l'adaptation au changement climatique lors de la table ronde sur les plateformes de ressources climatiques accessibles sur le territoire pyrénéen.

L'ONERC participe, en tant que pilote de certaines actions et bénéficiaire associé, au projet ARTISAN coordonné par l'Agence française pour la biodiversité. Ce projet, retenu par la Commission européenne au titre des projets LIFE intégrés, vise à généraliser le recours aux solutions fondées sur la nature pour l'adaptation au changement climatique.

Initiatives multilatérales et bilatérales

Dans une logique de collaboration transfrontalière, l'ONERC a eu l'occasion de participer à plusieurs échanges bilatéraux formels et informels avec ses homologues de la plupart des pays voisins de la France métropolitaine (groupe Science, IG CCA, Convention alpine, etc.) ainsi que quelques pays plus éloignés afin de partager les idées et les pratiques en matière d'adaptation au changement climatique (Chine, Groupe Visegrad, Inde).

Dans le cadre de l'Atelier « Adaptation des communes au changement climatique en France et en Allemagne », organisé à Cologne les 23 et 24 mai 2022 par Dfi, l'Institut franco-allemand de Ludwigsburg, l'ONERC est intervenu pour présenter les outils existants en France pour sensibiliser les acteurs locaux à l'adaptation au changement climatique.

Dans le cadre de l'évaluation des performances environnementales de l'Allemagne conduite par l'OCDE (2022-2023), l'ONERC a participé à une mission de revue par les pairs des politiques environnementales allemandes en tant qu'expert des politiques d'adaptation au changement climatique et de solutions fondées sur la nature du 10 au 14 octobre 2022 à Berlin.

La commission de normalisation de l'AFNOR sur l'environnement et le changement climatique, dont l'ONERC est membre, a suivi les travaux de l'ISO, menant à la publication de la série de normes sur l'adaptation au changement climatique. À ce jour sept normes ont été publiées : les normes ISO 14090 (juin 2019), ISO 14091 (février 2021), ISO 14092 (mai 2020), ISO 14097 (septembre 2021), ISO 14093 (juin 2022) et ISO 14030-3 (septembre 2022) et ISO 14100 (octobre 2022).

L'ONERC est enfin régulièrement sollicité pour participer à des travaux en lien avec les problématiques du changement climatique et de ses enjeux. Les quelques exemples ci-après visent à illustrer la variété et la diversité de ces activités :

- de mai 2021 à février 2022, l'ONERC a participé à l'équipe projet du Varenne de l'eau agricole et de l'adaptation au changement climatique ;
- l'ONERC a également participé aux travaux d'élaboration du 4^e plan national santé-environnement ;
- depuis octobre 2021, l'ONERC participe au comité interministériel de suivi des Assises de la forêt et du bois et est en charge du suivi de l'action des Assises relative à l'appel à projet 2022 du RMT-Aforce sur l'adaptation au changement climatique pour le MTECT depuis mars 2022 ;
- participation aux travaux du CGDD pour l'élaboration d'un guide sur la prise en compte de la vulnérabilité au changement climatique dans les évaluations environnementales (fin 2022) ;
- participation au comité de pilotage de l'étude Quanti-Adapt de I4CE.

Politique d'adaptation au changement climatique

Rattaché à la direction générale de l'énergie et du climat (DGEC), au sein du ministère en charge de l'Environnement, l'ONERC coordonne la politique nationale d'adaptation au changement climatique.

La France a développé une stratégie nationale d'adaptation en 2006. Sur cette base, le premier plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-1) a été mis en œuvre à partir de 2011 et le deuxième plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-2) a été publié fin 2018.

Le PNACC-2 comporte 4 priorités : la territorialisation de la politique d'adaptation, l'implication des filières économiques, le recours aux solutions fondées sur la nature et les outre-mer. Il comprend 58 actions réparties en 6 domaines : gouvernance, prévention et résilience, nature et milieux, filières économiques, connaissance et information, et international.

Le programme de travail annuel et le bilan de l'avancement effectif des actions programmées ont été présentés à la commission spécialisée du Conseil national de la transition écologique chargé de suivre l'avancement du PNACC-2. La commission a préparé l'avis annuel du Conseil national de la transition écologique relatif à l'avancement du PNACC-2.

Parution de l'évaluation à mi-parcours du deuxième plan national d'adaptation au changement climatique

L'évaluation à mi-parcours du deuxième plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-2) a été présentée à la commission spécialisée du Conseil national de la transition écologique en charge de son suivi, le 16 décembre 2021. Cette évaluation a été mise en ligne le 11 mars 2022 avec son texte intégral et sa synthèse. Elle dresse un premier bilan de la mise en œuvre de ce plan depuis son adoption en 2018.

Ce bilan montre qu'à fin 2021, la quasi-totalité des actions du PNACC-2, soit 53 des 58 actions, ont été lancées. Ces actions se déclinent de manière opérationnelle en 389 sous-actions. Sur ces 389 sous-actions, 106 étaient déjà terminées, 225 étaient en cours de mise en œuvre et 58 n'avaient pas encore démarré.

Au fur et à mesure de la mise en œuvre du PNACC-2, de nouvelles sous-actions sont apparues nécessaires et le budget dédié a en conséquence augmenté. Par exemple, les pilotes et contributeurs du domaine d'action Nature et Milieux se sont fortement mobilisés pour répondre aux objectifs du PNACC-2 en mettant en œuvre plus de 170 sous-actions en 2021. De 2019 à 2021, le budget total du PNACC-2 est ainsi passé d'environ 300 M€ à 8,2 Md€.

Quelques actions phares ont été menées depuis 2018 : la modélisation des impacts du changement climatique dans le scénario qui soutient la SNBC-2 (chauffage/climatisation, agriculture, forêt), la publication de 4 normes ISO sur le changement climatique dont 3 spécifiquement sur l'adaptation, l'extension de la campagne de communication pour la prévention des feux de forêts à l'ensemble du territoire métropolitain et à tous les végétaux, le lancement du projet LIFE ARTISAN sur les solutions d'adaptation fondées sur la nature, etc.

Des indicateurs ont été développés par les pilotes à la demande des membres et personnalités qualifiées de la commission spécialisée afin d'évaluer les progrès effectués dans la mise en œuvre des actions du PNACC-2. Au deuxième semestre 2021, seulement 66 des 100 indicateurs de suivi ont pu être renseignés. En complément de ces indicateurs de suivi des actions du PNACC-2, l'ONERC a développé des indicateurs de contexte et d'impacts pour différents secteurs. Ces trois types d'indicateurs ont été rassemblés dans une publication accompagnant celle de l'évaluation à mi-parcours du PNACC-2.

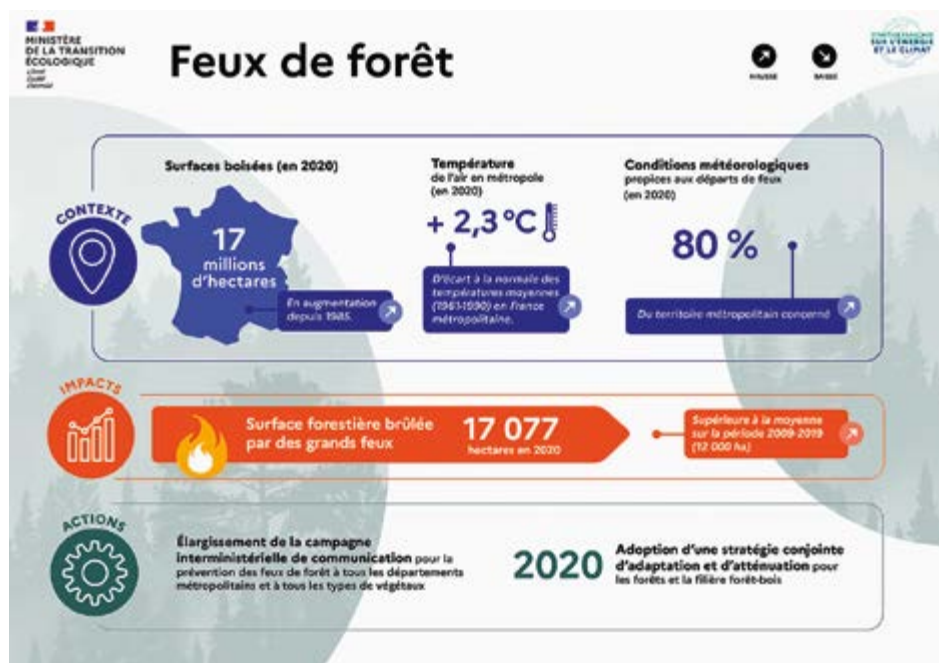


Figure 3 : Extrait de la « Synthèse des indicateurs du PNACC-2 »².

© ONERC.

En prévision des travaux d'élaboration du troisième plan national d'adaptation au changement climatique, le MTECT a missionné l'inspection générale de l'environnement et du développement durable pour réaliser une étude comparative des efforts d'adaptation entre plusieurs pays (Allemagne, Autriche, Japon, Pays-Bas, Royaume-Uni, Suisse p. ex.). L'ONERC a fourni de nombreuses ressources à la mission.

Lancement de la stratégie française énergie-climat

La stratégie française énergie-climat (SFEC) est la feuille de route de la France pour atteindre la neutralité carbone en 2050 et pour assurer l'adaptation effective de la France au climat futur. Elle sera constituée de la loi de programmation énergie climat (LPEC), de la stratégie nationale bas-carbone (SNBC-3), du plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-3) et de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE 2024-2033). C'est la loi relative à l'énergie et au climat (LEC) de novembre 2019 (I de l'article L. 100-1 A) qui stipule qu'une LPEC devra être promulguée avant le 1^{er} juillet 2023. La SNBC-3 et la PPE 2024-2033 devront être compatibles avec la LPEC et être adoptées par décrets dans l'année qui suit. Pour renforcer l'articulation entre les politiques d'atténuation et

2. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Synthese_indicateurs_PNACC-2.pdf

d'adaptation au changement climatique, le PNACC-3 a été intégré dans ce processus. Dans ce cadre, l'ONERC a animé deux groupes de travail qui se sont réunis une fois par mois depuis mars 2022 pour alimenter le volet adaptation au changement climatique de la SFEC. Un groupe de travail a été consacré au partage des dernières connaissances à jour sur les impacts du changement climatique en France, les coûts économiques de ces impacts et les coûts des mesures d'adaptation nécessaires pour y faire face. Cet état des connaissances a été mené afin de déterminer une trajectoire d'adaptation au changement climatique de référence pour la France et la décliner dans toutes les politiques publiques sectorielles, la réglementation, les règlements techniques, les documents d'aménagement... Un autre groupe de travail a été dédié à la proposition de mesures permettant de renforcer durablement l'action des collectivités en matière d'adaptation au changement climatique et d'améliorer la gouvernance de la politique d'adaptation aux différentes échelles de mise en œuvre. Les résultats de ces deux groupes de travail ont été présentés à la commission spécialisée du CNTE en charge du suivi du PNACC-2 en octobre 2022.

Lancement de l'étude ARTISAN sur l'intégration de l'adaptation et la biodiversité dans les politiques publiques

Dans le cadre du projet LIFE Intégré ARTISAN qui vise la mise en œuvre du PNACC-2 et du plan biodiversité à travers le déploiement à toutes les échelles de solutions d'adaptation au changement climatique fondées sur la nature (SafN), l'ONERC et l'OFB ont lancé en janvier 2022 une étude pour analyser la manière dont les enjeux d'adaptation et de protection de la biodiversité sont intégrés dans les politiques nationales et territoriales françaises. Cette étude contribue à alimenter les travaux de la SFEC par l'identification de dispositions législatives qui pourraient être introduites dans la LPEC pour améliorer la mise œuvre d'actions d'adaptation au changement climatique en France et renforcer le recours aux SafN.

Information, formation et communication

L'ONERC assure ses missions d'information et de communication en étroite collaboration avec la direction de la communication (DICOM) des ministères en charge de l'Écologie, de l'Énergie et des Territoires (MTECT/MTE). Ces actions visent tous les publics par l'intermédiaire de différents supports dont certains sont présentés ci-après. L'ONERC apporte son soutien en matière de réalisation de supports d'information sur l'adaptation au changement climatique pour différents organismes (services déconcentrés du MTECT, administrations centrales y compris hors MTECT, communication interne au MTECT/MTE, établissements publics, organisations non gouvernementales, presse, associations).

Dans la période couverte par le présent rapport, l'ONERC a poursuivi ses activités de communication en parallèle des travaux de mise en œuvre du deuxième plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-2), de la présidence française de l'Union européenne et de ses activités de point focal du GIEC pour la France.

Site web

La diffusion sur le site web du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires des informations présentées par l'ONERC permet à tous les publics d'appréhender les enjeux liés au changement climatique au travers des pages sur les impacts, la connaissance, la démarche d'adaptation, les publications et des bases de données.

Ainsi, aux informations concernant l'Observatoire s'ajoutent les pages dédiées aux indicateurs du changement climatique. De plus, la démarche d'adaptation au changement climatique, engagée au niveau national, européen et international est présentée selon ces trois axes. Enfin, l'information sur le GIEC permet de mieux comprendre son fonctionnement et de consulter et de suivre ses travaux.

Le contenu des pages est régulièrement mis à jour ainsi que leur présentation afin de s'adapter aux nouveaux standards de communication et de faciliter l'accès à l'information.



Figure 4 : Site web du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires.

Source : ONERC, <https://www.ecologie.gouv.fr/observatoire-national-sur-effets-du-rechauffement-climatique-onerc>

Rapports annuels

Le rapport *La Prospective au service de l'adaptation au changement climatique* a été publié au mois de mars 2022 et diffusé directement à plus de 150 destinataires. Il s'agit du 13^e rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement. Ce rapport est constitué des contributions de 68 auteurs répartis dans plus de 40 organismes (instituts de recherche, universités, collectivités territoriales, ministères et acteurs du secteur privé).

La prospective permet de répondre aux interrogations des acteurs publics et privés (ministère, territoire, commune, entreprise, citoyen...) face à la complexité des solutions à mettre en œuvre pour limiter les impacts du changement climatique. Elle permet aussi de développer des pistes d'actions adaptées à chaque cas. Un grand nombre d'exemples de cas pratiques traduisent cette matière en exemples concrets.

Les exemples du rapport vont de l'administration centrale, avec l'adaptation des activités de la sécurité civile au ministère de l'Intérieur, aux communes, en passant par des acteurs tels que les régions, la ville de Paris ou encore les agences de l'eau et le projet ADAMONT qui intègre, entre autres, les acteurs du secteur privé en moyenne montagne. Le rapport explore ensuite les filières économiques telles que celles du vin, du lait ou des grandes infrastructures, du bâtiment et du secteur financier et explore des pistes existantes et les défis à surmonter. Ce rapport a été présenté à plusieurs reprises notamment auprès des membres du groupe BPCE dans le cadre d'une matinale « climat » organisée par la direction des risques de la BPCE.



Figure 5 : Rapport La Prospective au service de l'adaptation au changement climatique, mars 2022, publié à La Documentation française.

© La Documentation française.

Lettre d'information aux élus

La lettre de l'ONERC aux élus *Le climat change, agissons!* est publiée depuis décembre 2009. Elle est diffusée à plus de 5 000 destinataires.

Elle a pour objectif de sensibiliser les élus locaux sur la réalité du changement climatique, de promouvoir des moyens d'action et de partager des initiatives locales en matière d'adaptation et d'atténuation.

Chaque numéro de la lettre aux élus est accompagné d'un encart sur un indicateur du changement climatique afin d'illustrer le thème traité par des données et des témoignages d'experts.

Une enquête de lectorat, réalisée en 2021, va permettre à l'ONERC, en étroite collaboration avec la direction de la communication du ministère, de faire évoluer cette publication afin de continuer à répondre au mieux aux attentes des lecteurs.

Sélection d'informations thématiques (lettre de veille technique)

La lettre de veille technique contient une sélection d'une vingtaine de liens web classés selon les catégories « actualités », « publications » et « manifestations », ainsi que quelques informations relatives à l'Observatoire. Ces informations ciblées sont diffusées, tous les deux mois, à plus de 900 abonnés volontaires (contre une cinquantaine seulement jusqu'en 2012).

Centre de ressources sur l'adaptation au changement climatique

Parmi les principales actions du PNACC-2 figure le développement d'un centre de ressources sur l'adaptation au changement climatique exploitant au mieux les nouvelles technologies pour faciliter le partage d'expériences et l'accès aux bonnes pratiques et présentant une cartographie d'acteurs, en particulier à l'échelle territoriale.

Ce Centre de ressources³ a été conçu pour mieux faire connaître la réalité du changement climatique, mais aussi pour outiller tous les acteurs et les mettre en capacité d'agir.

3. <https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr>





Figure 6 : Centre de ressources sur l'adaptation au changement climatique.

Source : ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires.

Cinq parcours utilisateurs (élu, technicien de collectivité, acteur économique, bureau d'études, particulier) permettent ainsi d'accéder à des informations personnalisées sur la réglementation en vigueur, les impacts du changement climatique sur tous les secteurs (santé, agriculture, tourisme, finances, etc.) et tous les milieux (forêt, mer et littoral, montagne, etc.) et à des solutions d'adaptation. Un sixième parcours pour les enseignants est en cours d'élaboration.

Ce portail présente aussi une cartographie des initiatives locales, un répertoire des acteurs, des appels à projets en cours, une base de données des projets de recherche et des formations. Une nouvelle rubrique dédiée aux « Solutions d'adaptation fondées sur la nature » lancée en septembre 2022 permet aux utilisateurs d'aborder la thématique selon les axes suivants : comprendre, agir, focus terrain, autres exemples d'actions, pour aller plus loin.

Le développement de ce centre de ressources sur l'adaptation au changement climatique a été confié au CEREMA, en partenariat avec l'ADEME et Météo-France.

Interventions, actions de formation et séminaires

Dans la période couverte par le présent rapport, l'ONERC est intervenu à de nombreuses reprises à l'occasion de conférences nationales ou internationales. Ci-après quelques exemples d'interventions.

L'ONERC intervient également lors des formations « Nature en ville » et « Eau et changement climatique », organisées par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, formations ouvertes aux collectivités territoriales.

Plusieurs actions de formation au sein d'établissements d'enseignement supérieur sont régulièrement assurées par l'ONERC (AgroParisTech, École nationale de la météorologie, École normale supérieure, Centre de formation sur l'environnement et la société, Sciences Po Paris, IUT de Cergy-Pontoise, AUE École des ponts, etc.). L'ONERC est également intervenu dans une formation à destination d'une vingtaine de professeurs du secondaire de différentes disciplines intitulée « Des risques extrêmes au changement climatique : enseigner un monde en transition » pour l'académie de Créteil en mars 2022.

L'ONERC a aussi réalisé une session de formation sur le changement climatique, ses problématiques et ses enjeux pour les journalistes météo du groupe France télévisions et animé des ateliers de la Fresque du climat dans le cadre du projet DGEC en transition. Ces fresques ont ainsi permis de sensibiliser des personnes en interne à la DGEC et dans d'autres directions du ministère.

Enfin, l'ONERC a préparé une formation des élus sur l'adaptation au changement climatique. Deux sessions tests de cette formation ont eu lieu dans l'Indre le 27 septembre 2022, permettant de former 250 élus. Sur un format de 3 heures, cette formation présente de manière très simplifiée les concepts de base autour du changement climatique (effet de serre, variabilité du climat...) et les variations passées et futur du climat (du global au local), et fait intervenir des acteurs locaux qui ont commencé à travailler sur ces sujets pour partager les bonnes pratiques.

En mai 2022, l'ONERC a participé à la conférence de présentation du dossier « En quête de demain » avec 51 titres de la presse quotidienne régionale.

L'ONERC a participé au premier forum de la mission sur l'adaptation au changement climatique, organisé par la Commission européenne le 7 juin 2022 à Bruxelles.

L'ONERC a participé au colloque « Anticiper le changement climatique dans les territoires en transition » organisé par le réseau de recherche Futurs-Act les 16 et 17 juin 2022 et y a présenté les travaux de la stratégie française énergie-climat (SFEC) sur l'adaptation au changement climatique et a participé à l'organisation des ateliers de travail consacrés à la contribution de Futurs-Act à la SFEC.

L'ONERC a présenté les principaux résultats des derniers rapports du GIEC aux rencontres de l'ingénierie maritime en juin 2022 et aux préfets de Bretagne en juillet 2022.

L'ONERC a également participé à la journée d'études du CITEPA du 30 septembre 2022 sur les systèmes de suivi et d'évaluation des politiques d'adaptation au changement climatique dans le monde et a présenté le système de suivi et d'évaluation du PNACC-2.

Entre octobre et novembre 2022, l'ONERC est intervenu 3 fois devant les directeurs de SDIS dans le cadre de leur formation de maintien et de perfectionnement des acquis.

L'ONERC est intervenu au Salon des maires le 22 novembre 2022 aux côtés de la présidente-directrice générale de Météo-France, Virginie Schwarz, et du sénateur Ronan Dantec pour le lancement d'un nouveau service climatique intitulé ClimaDiag Communes⁴. Développé par Météo-France, ce service permet aux maires d'accéder gratuitement aux projections climatiques détaillées sur leur commune.

Le même jour, l'ONERC est également intervenu au festival Médias en Seine.

Expositions pédagogiques itinérantes

Les deux expositions itinérantes⁵ – l'une (exposition scientifique) visant un public averti à des fins d'explication des phénomènes et l'autre visant un public le plus large possible à des fins de sensibilisation – ont été présentées au sein d'établissements scolaires, d'entreprises, d'associations et de collectivités territoriales. Sur la période octobre 2021-décembre 2022, les expositions ONERC ont été fortement sollicitées (72 demandes d'informations traitées), en très nette progression par rapport aux années précédentes (20 demandes par an en moyenne depuis 2015).



Figure 7 : Journal de l'exposition itinérante Le climat change.

© ONERC.

Afin de répondre positivement aux multiples demandes de prêt à des dates similaires (notamment pour les périodes juin-juillet et septembre-octobre 2022), un grand nombre de demandes a été redirigé vers les DREAL (disposant de jeux d'expositions) et les supports digitaux (fichiers PDF au format imprimeur). Au final, les lots d'expositions ONERC ont été beaucoup plus réservés sur la période octobre 2021-décembre 2022 (623 jours) qu'en moyenne depuis 2015 (434 jours en moyenne par an depuis 2015).

Cette forte progression des demandes de prêt des lots d'expositions ONERC, de la mise à disposition des fichiers PDF imprimés et de lots d'expositions en région (via les DREAL et DEAL) a contribué à faire largement progresser la diffusion des informations relatives au changement climatique en 2022.

4. <https://meteofrance.com/climadiag-commune>

5. https://www.ecologie.gouv.fr/observatoire-national-sur-effets-du-rechauffement-climatique-onerc#scroll-nav__7

Des journaux de présentation des deux expositions sont en outre régulièrement diffusés, plus particulièrement aux bibliothèques des établissements d'enseignement supérieur ainsi qu'à une sélection de contacts au sein de collectivités territoriales.

Les indicateurs du changement climatique

Vingt-neuf indicateurs décrivant l'état du climat et ses impacts sont présentés sur la page internet de l'ONERC. Grâce aux contributeurs et partenaires de l'ONERC, les mises à jour des indicateurs sont faites régulièrement. Cela a permis de disposer en novembre 2022 de 80% d'indicateurs intégrant des données de moins de cinq ans.

L'ONERC a entamé des discussions avec de nouveaux partenaires pour mettre à jour d'anciens indicateurs ou pour en proposer de nouveaux.

La démarche de l'ONERC de mise à disposition du public, sur le site web du ministère, des indicateurs du changement climatique et de ses impacts, reste innovante au niveau international, car peu de pays se sont investis dans ce type de publication avec une actualisation suivie.

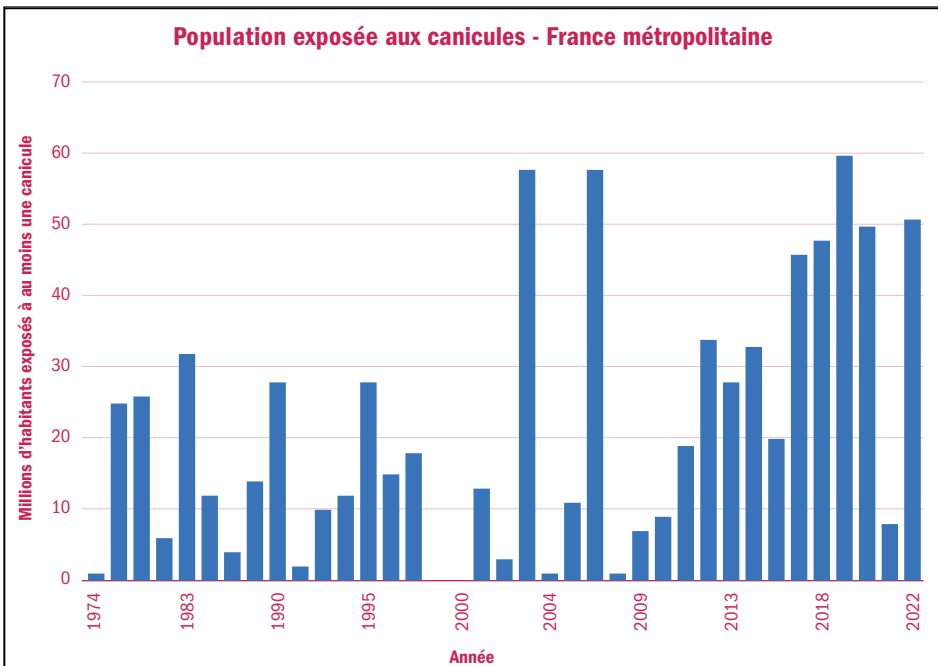


Figure 8 : Exposition des populations aux canicules.

Source : Santé Publique France.

https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-sante-et-societe#scroll-nav_5

Dans le cadre du suivi du deuxième plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-2, voir cette rubrique), un tableau de bord a été développé afin de rendre plus lisible l'ensemble des indicateurs. Ce tableau de bord utilise les indicateurs de l'ONERC comme indicateurs d'impacts ou de contexte.

Ce tableau de bord a été très bien accueilli par les membres de la commission spécialisée du CNTE mais également à l'étranger lors des diverses présentations sur la politique d'adaptation au changement climatique de la France, notamment dans le cadre du projet TRATOLOW⁶.

L'indicateur sur « l'exposition des populations aux canicules » développé grâce à Santé publique France en janvier 2021 montre l'impact grandissant des canicules sur la population française. La canicule de juillet 2022 a particulièrement touché les populations les plus à l'ouest de la Bretagne.

6. <https://www.tratolownetwork.eu/>

Annexes



Annexe I

CONTRIBUTEURS¹ ET REMERCIEMENTS

Cet ouvrage a été réalisé sous la direction de Laurent Michel, directeur de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique et d'Éric Brun, secrétaire général.

Auteurs

Lucie Adélaïde, Santé publique France

Sam Anderson, University of British Columbia

Marie Andrieux, Observatoire de l'immobilier durable

Constance Anelli, direction générale de l'aviation civile

James F. Booth, City College of New York, City University of New York – The Graduate Center

Guillaume Boulanger, Santé publique France

Vincent Bourcier, Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC)

Ginni Braich, University of British Columbia

Elodie Briche, Agence de la transition écologique (ADEME)

Pauline Calvier, Ville de Paris

Chloé Carbonne, Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire d'océanographie de Villefranche

Marie Carrega, Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC)

Régis Coene, RATP

David Courteille, RATP

Valérie Darmaillacq, SNCF Voyageurs

Sébastien Denys, Santé publique France

Vivian Dépoues, Institut de l'économie pour le climat (I4CE)

Quentin Deslot, chef du bureau de la qualité technique et de la réglementation technique de la construction, DGALN

1. Les contributions constitutives de cet ouvrage n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs ou de leurs organismes.

Guillaume Dolques, Institut de l'économie pour le climat (I4CE)
Christina Draeger, University of British Columbia
Laurent Dubus, Réseau de transport d'électricité (RTE)
Jérôme Duvernoy, Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC)
Cuiyi Fei, University of British Columbia
Alexandre Florentin, conseiller municipal de Paris
Justine Guérin, ville de Paris
Catherine Halbwachs, Électricité de France (EDF)
Christopher D. G. Harley, University of British Columbia
Sarah B. Henderson, University of British Columbia, British Columbia Centre for Disease Control
Matthias Jakob, University of British Columbia, BGC Engineering Inc.
Étienne Kapikian, Météo-France
Maryvonne Kerdoncuff, Météo-France
Karine Laaidi, Santé publique France
Robin Lagarrigue, Santé publique France
Carie-Ann Lau, University of British Columbia
Catherine Lelong, Réseau de transport d'électricité (RTE)
Frédéric Levraut, expert « Agriculture et changement climatique » chambres d'agriculture, CRA Nouvelle-Aquitaine
Esther Loiseleur, ville de Paris
Valéry Masson, Météo-France
Lualawi Mareshet Admasu, University of British Columbia
Christelle Mary, SNCF Voyageurs
Veeshan Narinesingh, NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory; Department of Natural Sciences and Mathematics, Sarah Lawrence College
Sylvie Parey, EDF
Mathilde Pascal, Santé publique France
Sakina Pen Point, Observatoire de l'immobilier durable
Clément Philippe, SNCF Voyageurs
Teodora Popescu, direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités (MTECT/DGITM)
Sylvain Pradelle, direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (MTECT/DGALN)
Aurélien Ribes, Météo-France/CNRS, université de Toulouse,

Pierre René, association Moraine

Christopher Rodell, University of British Columbia

Elliott Roocroft, University of British Columbia

Christophe Romero, directeur adjoint Ville durable – ville d'Échirolles

Jean-Michel Soubeyroux, Météo-France

Núria Teixidó, Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire d'océanographie de Villefranche, Stazione zoologica Anton Dohrn, Italie.

Amandine Vernier, direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (MTECT/DGALN)

Sarah Voirin, Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC)

Kate R. Weinberger, University of British Columbia

Greg West, University of British Columbia, BC Hydro

Rachel H. White, University of British Columbia

Personnes ayant contribué à la relecture

Lisa Bostvironnois, Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC)

Éric Brun, Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC)

Romain Cailleton, direction générale de l'énergie et du climat (MTECT/DGEC/SCEE)

Marie Carrega, Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC)

Olivier David, direction générale de l'énergie et du climat (MTECT/DGEC/SCEE)

Frédéric Schafferer, Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC)

Sarah Voirin, Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC)

Remerciements


L'ONERC remercie vivement les auteurs, les personnes ayant contribué au contenu des articles, ainsi que les relecteurs de cet ouvrage. L'ONERC tient également à remercier les personnes ayant fourni les photographies illustrant ce rapport.

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de la transition écologique
ADEUS	Agence de développement de l'urbanisme de l'agglomération strasbourgeoise
AFNOR	Association française de normalisation
AEE	Agence européenne de l'environnement
ARS	Agence régionale de santé
CAEP	Committee on Aviation Environmental Protection
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
C3S	Copernicus Climate Change Service
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CDC	Caisse des dépôts et consignations
CGAAER	Conseil général de l'agriculture, de l'alimentation et des espaces ruraux
CGDD	Commissariat général au développement durable
CGEDD	Conseil général de l'environnement et du développement durable
CNPE	Centre nucléaire de production électrique
CNRM	Centre national de recherches météorologiques
CNTE	Conseil national de la transition écologique
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
CRACC	Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique
DGAC	Direction générale de l'aviation civile
DGALN	Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature
DGEC	Direction générale de l'énergie et du climat
DGITM	Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités
DGT	Direction générale du travail
DH	Degré-heure
DHUP	Direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages
DICOM	Direction de la communication
DIR	Direction interdépartementale des routes
DPE	Diagnostic de performance énergétique
DPNT	Direction du parc nucléaire et thermique
DREAL	Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement
DSAC	Direction de la sécurité de l'aviation civile

ENEDIS	Énergie et distribution
EDF	Électricité de France
EHPAD	Établissement d'hébergement pour personnes âgées dépendantes
EPTB	Établissement public territorial de bassin
ETCCDI	Expert Team on Climate Change Detection and Indices
FRB	Fondation pour la recherche sur la biodiversité
GCM/RCM	Global climate models/regional climate Models
GES	Gaz à effet de serre
GICC	Gestion et impacts du changement climatique
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GRAIE	Groupe de recherche, animation technique et information sur l'eau
HTA	Haute tension A ou moyenne tension, entre 1 kV et 50 kV
I4CE	Institut de l'économie pour le climat
IBM	Indice biométéorologique
ICU	Îlot de chaleur urbain
IDELE	Institut de l'élevage
INRAE	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
INRS	Institut national de recherche et de sécurité
INVS	Institut national de veille sanitaire
IPBES	Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPSL	Institut Pierre-Simon-Laplace
ISO	International Organization for Standardization
LEC	Loi énergie et climat
LIFE	L'Instrument financier pour l'environnement
LPO	Ligue pour la protection des oiseaux
LTV	Limitation temporaire de vitesse
MAA	Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation
MEAE	Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères
MESR	Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche
MIE	Mission d'information et d'évaluation
MTECT	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires
MTE	Ministère de la Transition énergétique
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OFB	Office français de la biodiversité
OLD	Obligations légales de débroussaillage
OMM	Organisation mondiale de la météorologie
OMS	Organisation mondiale de la santé
ONDE	Observatoire national des données sur les étiages
ONERC	Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique

OPCC	Observatoire pyrénéen du changement climatique
PCAET	Plan climat air énergie territorial
PCS	Plan communal de sauvegarde
PFUE	Présidence française de l'Union européenne
PMV	Panneau à messages variables
PNACC	Plan national d'adaptation au changement climatique
PNC	Plan national canicule
PPE	Programmations pluriannuelles de l'énergie
RATP	Régie autonome des transports parisiens
RCP	Representative Concentration Pathway
RER	Réseau express régional
RTE	Réseau de transport d'électricité
SACS	Système d'alerte canicule et santé
SAFN	Solution d'adaptation fondée sur la nature
SAMU	Service d'Aide médicale urgente
SCOT	Schéma de cohérence territoriale
SDF	Sans domicile fixe
SDIS	Services départementaux d'incendie et de secours
SFEC	Stratégie française énergie-climat
SFN	Solution fondée sur la nature
SMUR	Structure mobile d'urgence et de réanimation
SNBC	Stratégie nationale bas carbone
SNCF	Société nationale des chemins de fer français
SPF	Santé publique France
SPM	Summary for Policy Makers
SRADDET	Schéma régional d'aménagement de développement durable et d'égalité des territoires
SROCC	Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate
SSP	Shared Socio-economic Pathway
STAC	Service technique de l'aviation civile
SurSaUD	Surveillance sanitaire des urgences et des décès
SYR	Synthesis Report
TGV	Train à grande vitesse
TSU	Technical Support Unit
UE	Union européenne



L'année 2022 a été une année hors norme, à la fois exceptionnellement chaude, ensoleillée et peu arrosée. Si trois vagues de chaleur ont ponctué l'été, la France a également connu des épisodes de chaleur successifs du printemps, du 15 au 23 mai, jusqu'en automne avec un pic de chaleur du 12 au 14 septembre et un épisode de chaleur tardif du 15 au 31 octobre.

Ces vagues de chaleur ont eu des conséquences parfois inédites sur la nature et les activités humaines. En particulier, plus de 66 000 hectares de forêt ont été réduits en cendres jusque dans des régions auparavant épargnées comme la Bretagne. Avec 2 816 décès en surmortalité, le bilan sanitaire des canicules souligne la nécessité de rester vigilant, et ce malgré les résultats encourageants des politiques mises en place après la canicule tragique de 2003. Une fois de plus, les épisodes de canicule ont eu également de lourdes conséquences sur les conditions de travail en extérieur, sur la productivité agricole avec des conséquences accentuées par la sécheresse, sur les activités sportives et de loisirs, sur les écosystèmes terrestres et marins ainsi que sur la fonte des glaciers alpins et pyrénéens.

Avec l'accroissement inévitable dans le futur du nombre et de la sévérité des vagues de chaleur, les politiques nationales, locales et sectorielles doivent être renforcées, ainsi que leur mise en œuvre concrète. Des outils toujours plus innovants et plus performants doivent être mis à disposition des multiples acteurs de l'adaptation. Ils permettront de mieux anticiper les futures vagues de chaleur et de limiter ainsi leurs impacts.

Cet ouvrage aborde la problématique des vagues de chaleur dans de nombreux secteurs, tant du point de vue de leurs impacts que de celui des solutions concrètes pour s'en protéger.

Direction de l'information légale et administrative

La Documentation française

<https://www.vie-publique.fr/publications>



Ouvrage non vendu



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET DE LA COHÉSION
DES TERRITOIRES**

*Liberté
Égalité
Fraternité*