

27 juin 2019

Intensification des vagues de chaleur : un risque majeur pour les régions tropicales

Par Marie-Noëlle WOILLEZ, IRS/ECO

Résumé

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur représente un risque majeur pour les populations des régions tropicales. D'ici la fin du siècle, les conditions de température et d'humidité pourraient atteindre plusieurs jours à plusieurs mois par an des niveaux difficilement supportables et pour lesquels les possibilités d'adaptation semblent réduites.

Mots clefs: changement climatique, stress thermique, adaptation

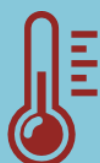
Thématiques ODD : climat

Géographies : multi-pays

Sommaire

<i>Introduction</i>	2
<i>Température ressentie et risques de stress thermique</i>	2
<i>Changement climatique</i>	4
<i>Incertitudes sur la sensibilité climatique</i>	7
<i>Adaptation ?</i>	7
<i>Conclusions</i>	9
<i>Pour aller plus loin</i>	10

Chiffres clés



35°C

Maximum de température humide supportable par l'Homme



x 3,6

Extension des surfaces continentales exposées à des conditions de chaleur extrême plus de 20j/an en 2100 ?

Introduction

Le réchauffement global entraîné par les émissions massives de gaz à effet de serre (GES) va conduire à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur et canicules dans de nombreuses régions (IPCC, 2013). Or, si l'être humain est capable de supporter des températures élevées, il existe néanmoins des limites physiologiques dont le dépassement peut avoir de graves conséquences sur la santé, voire entraîner la mort. En Europe par exemple, on estime que la quinzaine de jours de canicule en août 2003 a causé environ 70 000 décès prématurés. Cependant, les températures mesurées alors restaient inférieures à celles régulièrement observées en période estivale dans bon nombre de régions tropicales, suggérant que cette surmortalité provenait essentiellement d'un manque d'adaptation à des conditions inhabituelles. Des mesures d'adaptation adéquates devraient donc théoriquement permettre de limiter les impacts directs sur la santé de la hausse des températures. Mais ce postulat reste-t-il valable en cas de poursuite de fortes émissions de GES et donc d'un réchauffement global de grande amplitude ? Qu'en est-il en particulier pour les pays du Sud qui connaissent déjà des niveaux de chaleur dangereux en période estivale ? Les conditions climatiques pourraient-elles, à terme, dépasser les capacités d'adaptation ? Nous donnons ici quelques éléments de réponse basés sur des travaux de modélisation récemment publiés dans la littérature scientifique.

Température ressentie et risques de stress thermique

Chaleur ressentie, quantification et impacts sur la santé

Le métabolisme du corps humain génère de la chaleur (environ 100 W au repos), dont une partie doit être évacuée afin de maintenir la température interne à 37 °C. La dissipation de la chaleur en excès dans le milieu ambiant se fait par rayonnement infrarouge, par conduction et par évaporation de la transpiration. Grâce à ces processus, et notamment la transpiration (seul mécanisme permettant de refroidir le corps lorsque la température de l'air dépasse 34-37 °C), l'être humain peut supporter des températures supérieures à la température de la peau (35 °C) ou même à la température interne. En revanche, si les conditions empêchent la dissipation de chaleur ou diminuent son efficacité, la température du corps s'élève et peut atteindre un niveau intolérable pour l'organisme. On parle alors d'un état de stress thermique. Trois facteurs peuvent y concourir :

- **L'activité physique**, qui augmente la production de chaleur par le corps lui-même ;
- **Les conditions atmosphériques** ambiantes (température, humidité, rayonnement solaire, vent), qui influent sur l'efficacité du transfert de chaleur ;
- **L'habillement**, qui lui aussi module le transfert de chaleur par conduction ou évaporation.

Les conséquences sont multiples et dépendent du degré de stress subi (Kjellstrom et al., 2016) : crampes, épuisement, maux de tête, nausées... et jusqu'au coup de chaleur, qui peut conduire à des défaillances d'organes et peut être létale dans les cas extrêmes. À l'impact direct de la température s'ajoute par ailleurs le risque de déshydratation par transpiration excessive.

Le rôle essentiel de l'évaporation de la transpiration pour refroidir le corps en cas de forte chaleur fait de la seule température de l'air un mauvais indicateur des risques de stress thermique. En effet, la teneur en humidité de l'air module les capacités d'évaporation. Dans un air déjà saturé en humidité l'évaporation de la transpiration ne peut avoir lieu et ce mécanisme ne permet donc plus l'évacuation de la chaleur corporelle excédentaire. Aussi, des dizaines d'indices thermiques combinant

entre autres température de l'air et humidité ont été développés afin de mieux quantifier la chaleur effectivement *ressentie* par l'organisme. Il est toutefois délicat de déterminer quel indice est effectivement le meilleur indicateur de risque car le degré de tolérance à la chaleur dépend de l'âge, du sexe, de l'état de santé général, de l'habillement et du degré d'activité physique.

Un des indices le plus utilisé est la température au thermomètre-globe mouillé (*wet-bulb globe temperature*, ou WBGT), qui tient compte de la température de l'air, de l'humidité relative, du rayonnement et du vent, et qui a été conçu pour quantifier l'effet de la chaleur sur des personnes en activité. Il a l'avantage d'avoir été largement testé par l'armée américaine et d'être utilisé internationalement pour formuler des recommandations concernant l'activité physique, les temps de repos et l'habillement en cas de fortes chaleurs. Les valeurs seuils pour définir les différents niveaux de dangerosité peuvent toutefois varier d'une organisation à l'autre.

Un autre indice possible est la température humide¹ (*wet-bulb temperature*, Tw), qui représente la température la plus basse qu'il est possible d'atteindre grâce à l'évaporation. Autrement dit, il est thermodynamiquement impossible pour un objet de perdre de la chaleur dans un environnement où Tw est supérieure à sa température de surface. La température de la peau étant de 35 °C, une exposition prolongée à Tw ≥ 35 °C conduit inévitablement à une élévation de la température corporelle. Quelques heures suffisent pour que l'hyperthermie soit létale, y compris pour une personne en bonne santé au repos à l'ombre (Sherwood & Huber, 2010). On peut donc envisager Tw = 35 °C comme la valeur limite haute permettant de définir des conditions de température et d'humidité létales en cas d'exposition prolongée. En pratique, des niveaux de 30-31 °C sont déjà extrêmement dangereux.

Régions actuelles à risque

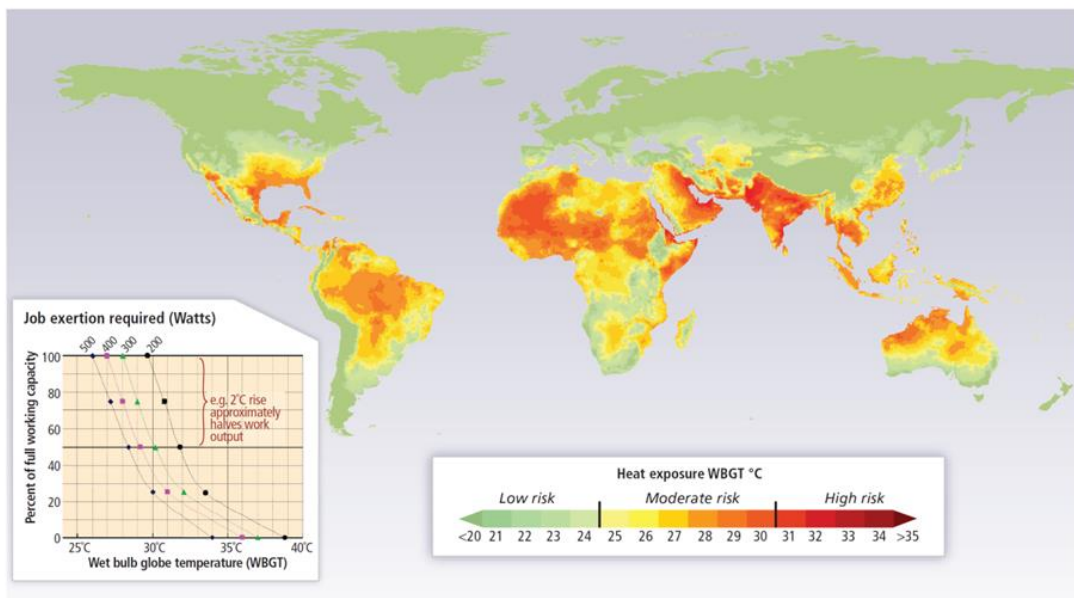


Figure 1 : Température au thermomètre-globe mouillé (°C), moyenne des mois les plus chauds calculée sur la période 1980-2009, avec seuils de dangerosité ISO (1989). En général, avec le changement climatique, lorsque la température maximale augmente de 1 °C, WBGT augmente d'environ 0.9°C. L'encadré montre la capacité de travail possible pour différents niveaux d'activité, pour des travailleurs jeunes et en pleine santé. Source : IPCC 2014, WGII, Fig.11-5.

¹ Température mesurée par un thermomètre enrobé d'un linge mouillé et dans un lieu bien ventilé.

Si l'on considère les valeurs actuelles de WBGT (Fig.1), on constate que les conditions thermiques durant les mois les plus chauds sont déjà problématiques dans de nombreuses régions tropicales et subtropicales : dans l'ouest de la Chine, en Asie du Sud-Est, sur la péninsule Indienne, et notamment dans la plaine indo-gangétique, le pourtour du golfe Persique, l'Amérique centrale, au Sahel et en Afrique de l'Ouest, mais aussi dans le nord de l'Australie et le sud-est des États-Unis. Dans ces zones, les valeurs moyennes de WBGT pour le mois le plus chaud se situent dans une gamme représentant un risque modéré pour la santé (entre 25 °C et 30 °C), voire dépassent le seuil de 30 °C au-delà duquel le risque est élevé (péninsule Indienne et golfe Persique notamment). Les températures journalières peuvent bien sûr dépasser ces moyennes mensuelles.

Par ailleurs, dans les pays en développement, le travail physique intense en extérieur est courant, la saison chaude est longue et les systèmes de refroidissement type air conditionné sont peu présents. Les populations sont donc d'autant plus exposées au risque de stress thermique.

Changement climatique

Diminution de la capacité de travail

En se basant sur les recommandations sur l'intensité de travail physique possible selon le niveau de WBGT, il est possible de relier capacité de travail et WBGT (voir encadré Fig.1). Pour les conditions climatiques actuelles, Dunne et al. (2013) estiment ainsi qu'au niveau mondial la capacité de travail moyenne durant les mois les plus chauds est d'environ 90 %. Les projections climatiques pour un scénario de poursuite de fortes émissions de GES (RCP8.5) font chuter cette capacité à 75 % en 2050 et 60 % en 2100 (sans tenir compte des changements démographiques). Il s'agit là d'une moyenne globale, et la diminution des capacités de travail ainsi calculée peut être bien supérieure dans les pays les plus exposés. Par ailleurs, ces estimations sont établies pour des individus bien adaptés et en pleine santé, sous-estimant très vraisemblablement les impacts que pourrait avoir l'élévation de la WBGT sur la capacité de travail de l'ensemble de la population.

Focus sur les scénarios RCP : Le rapport du GIEC de 2013 considère plusieurs scénarios de forçage radiatif, appelés *Representative Concentration Pathways* ou RCP. Chaque scénario correspond à des hypothèses différentes en matière d'émissions de gaz à effet de serre et d'évolution de leurs concentrations atmosphériques. Le RCP2.6 est un scénario de forte baisse des émissions, permettant de limiter le forçage radiatif à +2,6 W/m² à la fin du siècle et ainsi de stabiliser la température moyenne globale sous le seuil de +2 °C par rapport à la période 1850-1900. Le RCP8.5 correspond à de fortes émissions, suivant la trajectoire actuelle ("business as usual"), pour aboutir à un forçage de +8,5 W/m² et une augmentation de la température moyenne globale supérieure à 4 °C à la fin du siècle. Le RCP4.5 est un scénario intermédiaire.

Risques de mortalité accrus

S'il est reconnu que de fortes chaleurs durant une période prolongée augmentent la mortalité, il est toujours délicat d'établir des prédictions. Une approche possible consiste à se baser sur les épisodes historiques passés pour déterminer quelles conditions météorologiques sont associées à une surmortalité. Ainsi, Mora et al. (2017)², en se basant sur des centaines de cas analysés dans la littérature scientifique, ont déterminé les conditions de température et humidité potentiellement létales. En utilisant un seuil assez conservateur, les projections climatiques pour le scénario RCP8.5 montrent que près de la moitié des surfaces continentales seraient exposées plus de 20 jours par an à de telles conditions à horizon 2100. La part correspondante de la population mondiale touchée, sans tenir compte des évolutions démographiques, pourrait atteindre 74 % (Tableau 1). Dans les régions tropicales, ces conditions deviendraient la norme presque toute l'année (Fig.2). Les projections pour le scénario RCP4.5 sont inférieures, mais néanmoins très préoccupantes, avec 54 % de la population exposée à horizon 2100. Il faut souligner que les projections du scénario RCP4.5 pour 2100 correspondent à peu près à celles obtenues dès le milieu du siècle pour le scénario RCP8.5. L'Asie du Sud-Est et l'Afrique de l'Ouest notamment pourraient donc être fortement exposées bien avant la fin du siècle (Fig.2).

Scénario climatique	Surface continentale exposée	Population mondiale exposée (fixée à celle de l'année 2000)
Historique (1995-2005)	13,2 %	30,6 %
RCP2.6 (2090-2100)	26,9±8,7 %	47,6±9,6 %
RCP4.5 (2090-2100)	34,1±7,6 %	53,7±8,7 %
RCP8.5 (2090-2100)	47,1±8,9 %	73,9±6,6 %

Tableau 1 : Pourcentages des terres et de la population mondiale exposées plus de 20 j/an à des conditions de température et d'humidité potentiellement mortelles. Source : Mora et al. (2017).

Les données utilisées par les chercheurs pour caractériser les conditions létales correspondent toutefois en grande majorité à des épisodes survenus en Amérique du Nord et Europe. Quelques dizaines de cas documentés se situent en Inde ou en Chine, mais globalement les données manquent pour les régions tropicales. Avoir davantage de données issues de régions où les populations sont mieux adaptées à la chaleur conduirait peut-être à définir des seuils de dangerosité différents. D'un autre côté, les pays développés sont également ceux qui disposent de davantage de moyens pour faire face aux canicules (air conditionné, accès à l'eau et aux soins) et où une moindre proportion de la population occupe des emplois impliquant une activité physique importante.

² Voir aussi l'application en ligne : <https://maps.esri.com/globalriskofdeadlyheat/#>

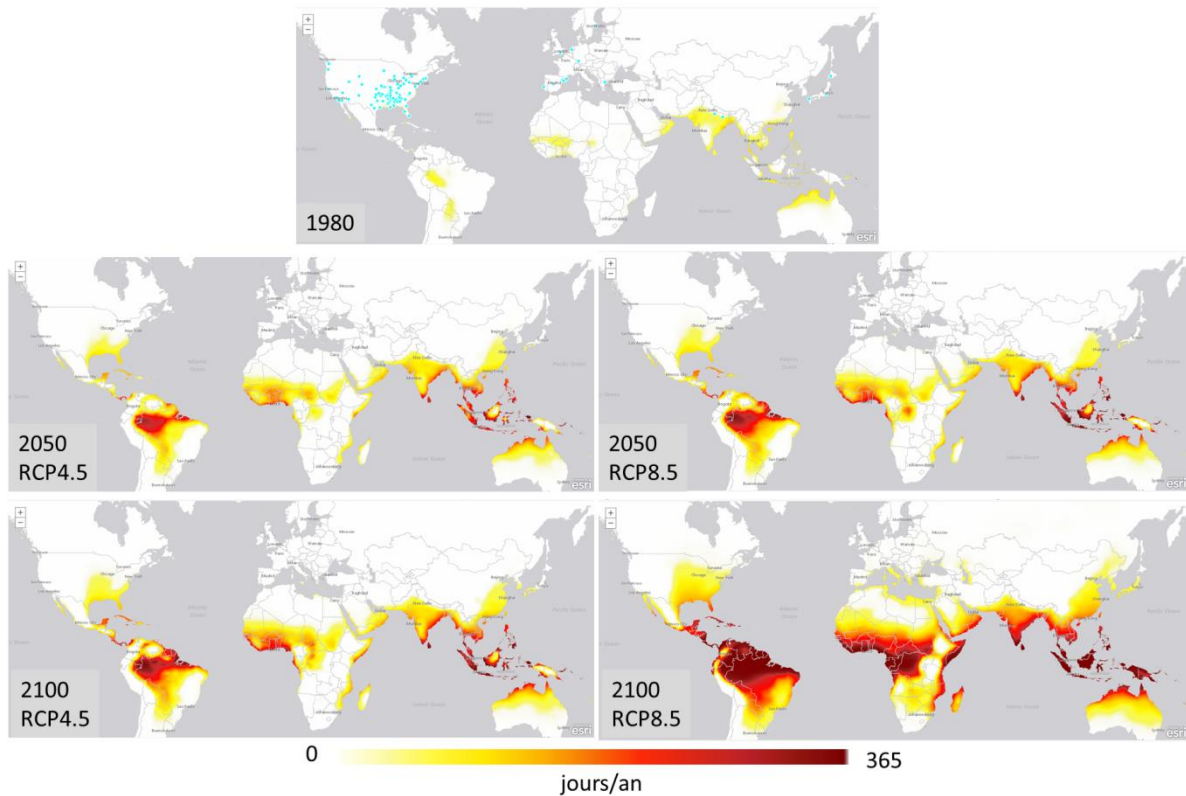


Figure 2 : Distribution géographique du nombre de jours par an avec des conditions de température et humidité potentiellement mortelles, en 1980 et pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 en 2050 et 2100. Les résultats correspondent à la moyenne des simulations de 20 modèles climatiques globaux.

Source : <https://maps.esri.com/globalriskofdeadlyheat/#>, d'après Mora et al. (2017).

Par ailleurs, les projections présentées sur la Fig.2 proviennent de modèles climatiques globaux, donc à résolution spatiale relativement faible (de l'ordre de 200 km). Des simulations réalisées avec des modèles climatiques régionaux, à résolution spatiale plus fine, ont permis d'affiner la caractérisation des zones à risques pour la péninsule arabe (Pal & Eltahir, 2016), l'Asie du Sud (Im et al., 2017) et l'est de la Chine (Kang & Eltahir, 2018).

Les projections pour l'Asie du Sud montrent que ce serait surtout les plaines du Gange et de l'Indus qui subiraient des conditions de température et d'humidité dangereuses, et non le sud de l'Inde (Fig.2). Cette région est particulièrement vulnérable en raison de la très forte densité de population, essentiellement rurale et donc très exposée lors des travaux agricoles en extérieur durant les mois les plus chauds. Pour le scénario RCP8.5 (RCP4.5), 75 % (55 %) de la population de l'Asie du Sud connaîtrait vers 2100 des épisodes avec une température humide journalière maximale (T_w) supérieure à 31 °C, contre 15 % actuellement (à population fixe).

Les plaines du Nord de la Chine, où vivent actuellement 400 millions de personnes, ainsi que la région autour de Canton risquent également de connaître des conditions de température et d'humidité insupportables durant la période estivale à horizon 2100 (scénario RCP8.5). Les résultats montrent également que l'effet du changement climatique est renforcé par l'irrigation massive. En effet, si elle a pour effet de refroidir la surface du sol, dans le même temps elle augmente l'humidité de l'air. Ce deuxième effet s'avère prépondérant dans les projections et conduit à intensifier les vagues de chaleur humide.

Incertitudes sur la sensibilité climatique

L'augmentation de la température moyenne globale avec les émissions de GES, ce que l'on appelle la sensibilité climatique, demeure relativement mal contrainte. Selon les modèles globaux de simulation numérique du climat utilisés pour le 5e rapport du GIEC (IPCC, 2013), l'élévation de température, à l'équilibre, en réponse à un doublement de la concentration atmosphérique en CO₂ se situerait entre +2,1 °C et +4,7 °C. Pour le scénario RCP8.5, la moyenne des projections indiquait une élévation de température à horizon 2100 de +4,5 °C par rapport à la période préindustrielle. Cependant, les premiers résultats des nouvelles simulations en cours pour le prochain rapport du GIEC montrent une sensibilité climatique supérieure, entre +2,8 °C et +5,8 °C pour un doublement de CO₂³. Des valeurs nettement supérieures ne sont pas exclues, un certain nombre de phénomènes susceptibles d'avoir un effet de rétroaction positive n'étant pas pris en compte dans les modèles globaux actuels. La réponse des nuages en particulier est une source majeure d'incertitude. Des travaux récents (Schneider et al., 2019) ont mis en évidence un possible effet de seuil pour les très hautes concentrations en CO₂ : au-delà de 1200 ppm, certains types de nuages tropicaux disparaîtraient totalement, ce qui aurait pour conséquence d'augmenter la température globale de 8 °C supplémentaires. Autrement dit, un tel phénomène conduirait à une élévation de température non pas de +4 °C à la fin du siècle en cas de poursuite de fortes émissions mais de +12 °C. Un réchauffement de cette ampleur entraînerait vraisemblablement d'autres rétroactions positives, telle la fonte du pergélisol en Arctique, susceptible de dégager d'importantes quantités de CO₂ et méthane supplémentaires.

Si un tel scénario se produisait, quelles seraient les conséquences sur l'exposition au stress thermique ? Actuellement, si les valeurs journalières maximales de température observées à terre peuvent atteindre 50°C dans les régions les plus chaudes du globe, celles de température humide (Tw) excèdent rarement 31°C. En revanche, si la température moyenne globale augmentait d'environ 10°C, toutes les zones tropicales et subtropicales connaîtraient chaque année des périodes avec des conditions de Tw journalière maximale supérieures au seuil de 35 °C, au-delà duquel une exposition prolongée est létale (Sherwood & Huber, 2010). Ces régions seraient donc confrontées certains mois à des conditions de température et d'humidité insupportables pour un être humain au-delà de quelques heures.

Adaptation ?

Sans aller jusqu'à envisager une situation où des rétroactions positives au sein du système climatique conduiraient à un emballement du réchauffement, l'ampleur de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des conditions de chaleur extrême projetée par les modèles climatiques pour les régions tropicales questionne les capacités d'adaptation.

Pour éviter des impacts majeurs sur la santé des populations, mais aussi les impacts économiques liés à la diminution des capacités de travail et d'apprentissage, certains auteurs (e.g. Kjellstrom et al., 2016) préconisent entre autres le développement massif de l'air conditionné et de la mécanisation.

³ <https://www.carbonbrief.org/guest-post-why-results-from-the-next-generation-of-climate-models-matter>

Si la mécanisation est envisageable pour un certain nombre de tâches, force est de constater que certaines activités nécessitent toujours du travail physique humain, y compris dans les pays développés, notamment dans le bâtiment.

La généralisation de l'air conditionné se heurte quant à elle au problème des ressources énergétiques nécessaires. Actuellement, le nombre de climatiseurs dans le monde est estimé à 1,6 milliard et l'usage de l'air conditionné et des ventilateurs électriques représente déjà environ 10 % de la consommation électrique globale. Selon un rapport de l'Agence internationale de l'énergie de 2018⁴, le nombre de climatiseurs pourrait atteindre 5,6 milliards en 2050, en raison de l'augmentation des niveaux de vie dans les pays en développement, ce qui conduirait à une augmentation de la demande énergétique équivalente à la consommation actuelle des États-Unis, de l'Union européenne et du Japon réunis. Ces chiffres ne tiennent pas compte du changement climatique et donc de l'augmentation de la consommation électrique des appareils avec la hausse des températures, ainsi que de l'extension des zones et des périodes de l'année où la climatisation serait nécessaire (cf Fig.2).

Or la hausse de la température pose également des problèmes à la production électrique et au réseau, ce qui complique les capacités d'adaptation :

- Une chaleur excessive peut endommager le réseau électrique et provoquer des coupures, ainsi que cela a déjà été régulièrement observé localement en période de canicule, y compris dans les pays développés.
- La production d'électricité est affectée négativement par les hautes températures : problèmes de refroidissement des centrales électriques thermiques et baisse du rendement des panneaux photovoltaïques. À titre d'exemple, en août 2018 EDF a dû mettre quatre réacteurs à l'arrêt et d'autres en production réduite pour éviter de dépasser les seuils autorisés de rejets d'eau chaude. Les vagues de chaleur correspondent généralement également à des sécheresses susceptibles de limiter les capacités de production hydroélectriques.

Par ailleurs, compte tenu du mix énergétique mondial actuel, très largement dominé par l'usage des combustibles fossiles, l'explosion de la consommation électrique pour l'air conditionné contribuerait à renforcer les émissions de GES et donc le réchauffement. En outre, les fluides réfrigérants utilisés par la majorité des climatiseurs actuels sont eux-mêmes des GES extrêmement puissants⁵. Sans oublier qu'un usage massif des climatiseurs entraînerait également une augmentation des rejets de chaleur à l'extérieur et renforcerait donc localement la hausse des températures.

La généralisation de la climatisation à tous les lieux de vie en zones tropicales semble donc assez peu réaliste en pratique : les besoins en énergie seraient colossaux, les coûts probablement prohibitifs pour des millions de personnes et cela ne résoudrait pas la question du travail en extérieur. Par ailleurs, les animaux d'élevage seraient également affectés, et plus largement l'ensemble des écosystèmes. Pour le scénario RCP8.5, les régions tropicales deviendraient donc extrêmement inhospitalières d'ici la fin du siècle, ou même dès le milieu du siècle pour certaines zones (Fig.2).

⁴ <https://webstore.iea.org/the-future-of-cooling>

⁵ Il existe des climatiseurs basés sur des technologies différentes, mais ils sont encore au stade de l'expérimentation à petite échelle.

Conclusions

Il est assez généralement admis qu'un réchauffement supérieur à 3 °C aurait des conséquences désastreuses (IPCC, 2013). Cependant, l'estimation des coûts fait l'objet de vastes controverses. Les estimations basées sur les données climatiques et économiques des dernières décennies conduisent généralement à une perte de quelques points de PIB au niveau mondial (e.g. Tol 2018 pour une revue), résultats qui semblent peu en accord avec les projections de bouleversements climatiques et écosystémiques majeurs. Compte tenu de la diversité des conditions climatiques auxquelles l'humanité a su s'adapter jusqu'ici, beaucoup estiment qu'il sera également possible de s'adapter au changement climatique en cours.

Or les seules projections de chaleurs extrêmes dressent un tableau de la situation bien plus inquiétant : les régions tropicales et subtropicales, densément peuplées, pourraient faire face à des conditions de température et d'humidité dangereuses pour la santé humaine, plusieurs mois par an, et ce dès le milieu du siècle pour un scénario de fortes émissions (sous réserve que les ressources en combustibles fossiles soient effectivement suffisantes pour alimenter de telles émissions). L'intensité et la durée des vagues de chaleur extrême projetées en cas de poursuite de fortes émissions de GES rendent discutable l'hypothèse de l'adaptation pour l'ensemble des populations. Par ailleurs, si des phénomènes de rétroactions positives, avec effet de seuil, conduisaient à un réchauffement global 2 à 3 fois supérieur aux projections actuelles, les régions tropicales et subtropicales deviendraient littéralement inhabitables, que ce soit pour les êtres humains et probablement pour la plupart des mammifères et oiseaux. Les impacts potentiels du réchauffement sur la santé et le risque non négligeable que ces impacts dépassent les capacités d'adaptation dans certaines régions ne sont donc peut-être pas encore suffisamment pris en considération. Seule une diminution drastique et rapide des émissions de GES peut permettre d'éviter un tel scénario.

Pour aller plus loin

Dunne, J. P., Stouffer, R. J., & John, J. G. (2013). Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nature Climate Change*, 3(6), 563.

Im, E. S., Pal, J. S., & Eltahir, E. A. (2017). Deadly heat waves projected in the densely populated agricultural regions of South Asia. *Science advances*, 3(8), e1603322.

IPCC (2013), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC (2014), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

Kang, S. & Eltahir, E. A. (2018). North China Plain threatened by deadly heatwaves due to climate change and irrigation. *Nature communications*, 9(1), 2894.

Kjellstrom, T., Briggs, D., Freyberg, C., Lemke, B., Otto, M., & Hyatt, O. (2016). Heat, human performance, and occupational health: a key issue for the assessment of global climate change impacts. *Annual review of public health*, 37, 97-112.

Mora, C., Dousset, B., Caldwell, I. R., Powell, F. E., Geronimo, R. C., Bielecki, C. R., ... & Lucas, M. P. (2017). Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change*, 7(7), 501.

Pal, J. S. & Eltahir, E. A. (2016). Future temperature in southwest Asia projected to exceed a threshold for human adaptability. *Nature Climate Change*, 6(2), 197.

Sherwood, S. C. & Huber, M. (2010). An adaptability limit to climate change due to heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(21), 9552-9555.

Schneider, T., Kaul, C. M., & Pressel, K. G. (2019). Possible climate transitions from breakup of stratocumulus decks under greenhouse warming. *Nature Geoscience*, 12(3), 163.

Tol, R. S. (2018). The economic impacts of climate change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 12(1), 4-25.