HAL
open science

L'évolution climatique des villes européennes

Sebastian Kopf, Stéphane Hallegatte, Minh Ha-Duong

To cite this version:

Sebastian Kopf, Stéphane Hallegatte, Minh Ha-Duong. L'évolution climatique des villes européennes. 2008. halshs-00114042

HAL Id: halshs-00114042

https://shs.hal.science/halshs-00114042v1

Preprint submitted on 15 Nov 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'évolution climatique des villes européennes

Sebastian Kopf[1], Stéphane Hallegatte[2], Minh Ha-Duong[3]

Introduction

La "météo", c'est le temps qu'il fait au quotidien. Chacun d'entre nous peut observer directement la température et les précipitations, constatant que non seulement elles varient d'un jour sur l'autre, mais aussi d'une année à l'autre. Si ces variables présentent un caractère aléatoire marqué à court terme, sur plusieurs décennies la moyenne pour une ville donnée est beaucoup plus stable. Par exemple, il fait généralement plus doux à Bordeaux qu'à Paris. On complète ainsi le concept de météo avec celui de « climat »: le climat est le temps qu'il fait, *en moyenne*. En général on utilise par convention des moyennes sur des périodes de trente ans pour définir les climats.

À l'échelle de ce siècle les scientifiques s'accordent pour dire que le changement des climats dû à l'action humaine est maintenant inévitable. Le réchauffement global de la fin du 19ème siècle à nos jours est déjà de l'ordre de 0,7°C, avec un rythme actuel de +0,2°C par décennie. Pour le 21ème siècle, les modèles climatiques prévoient des augmentations de la température globale entre 2 et 5°C.

Mais quand on s'interroge sur les conséquences d'un tel changement, ce n'est pas la température globale qui est pertinente, mais plutôt les changements des climats locaux. La difficulté est que l'incertitude est beaucoup plus grande sur les évolutions de petite échelle que sur l'évolution globale. De plus et malgré ces incertitudes, la nécessité s'impose de comprendre en termes humains et non seulement climatiques les changements attendus là où nous vivons. Par exemple, le modèle du *Hadley Centre* simule une augmentation de 4°C en 100 ans de la température moyenne à Paris dans un de ses scénarios. Est-ce grave ? Qu'est ce que cela représente en terme de confort, de mode de vie ?

Pour se représenter ce que signifie ce changement climatique pour Paris, nous utilisons ici la méthode des analogues climatiques. Elle consiste à déterminer un endroit doté aujourd'hui d'un climat comparable à celui que l'on prédit à la fin du siècle. Ainsi, dans le scénario du *Hadley Centre*, le climat de Paris entre 2070 et 2100 ressemble fortement au climat actuel de Badajoz, près de Cordoue, que mon dictionnaire définit ainsi «Capitale de l'Estremadure, dans le sud-ouest de l'Espagne, caractérisé par des étés brûlants et arides ». Comparer ces deux villes permet d'imaginer plus facilement ce que représente une augmentation de 4°C en termes de modification des conditions de vie, en termes d'adaptation de l'urbanisme, de l'architecture des habitations, de système énergétique, de gestion des eaux.

Mais ce scénario n'est qu'un scénario parmi d'autres, et le modèle du *Hadley Centre* n'est qu'un modèle parmi d'autres. Pour tenir compte des incertitudes, cet article expose comment la carte climatique des grandes villes d'Europe pourrait se redessiner à la fin du siècle d'après les résultats de trois des principaux modèles climatiques européens. Comme nous allons le voir, du climat de Badajoz à celui des pays Baltes en passant par Rome, l'éventail des futurs possibles pour Paris est encore très ouvert.

1 Étudiant à l'Université Internationale de Brême
2 Ingénieur Météo-France, chercheur au CIRED et à l'École Nationale de la Météorologie (Météo-France)
3 Chargé de Recherches CNRS, Centre International de Recherches sur l'Environnement et le Développement (CIRED).
Correspondance: haduong@centre-cired.fr, 01 43 94 73 81

Les indices climatiques

Dans les atlas, les climats des villes sont en général représentés par les moyennes des températures et précipitations pour chacun des 12 mois de l'année. C'est aussi ce que l'on appelle les moyennes saisonnières. Si le climat est stable, ces moyennes prédisent la météo à laquelle on peut s'attendre l'année prochaine, tout en sachant que la température et les précipitations que l'on observera en réalité seront différentes, puisqu'il est rare que le temps soit exactement égal à la moyenne. Par exemple, la température moyenne en Juin observée au Bourget entre 1757 et 1990 est 16,9°C, mais la moitié des observations est hors de l'intervalle [15.8°C, 17,9°C]. C'est ce qui fait parfois dire que "la température actuelle est au-dessus ou en-dessous des moyennes (ou normales) saisonnières".

Beaucoup de métiers utilisent des mesures du climat plus spécifiques que les moyennes saisonnières. Le producteur d'électricité s'intéressera plutôt au nombre de jours où le chauffage – ou la climatisation – est nécessaire dans les habitations. L'agriculteur s'intéressera au cumul annuel des précipitations, à la présence des parasites, et à la durée de la période de pousse, quand la température moyenne journalière dépasse environ 5°C. L'assureur regardera plutôt la fréquences des inondations et la présence de phénomènes extrêmes, comme les cyclones tropicaux. Le médecin regardera si les insectes vecteurs de maladie comme le paludisme peuvent survivre au cours de l'année et examinera la fréquence de canicules meurtrières. Le touriste en chacun de nous s'intéressera avant tout à la température estivale et au nombre de jours de pluie en Juillet (pour les « juilletistes ») ou en Août (pour les « aoûtiens »). De tels exemples peuvent se répéter à l'infini… C'est pourquoi chacun de ces acteurs a développé des *indices climatiques*, qui sont des mesures plus simples et mieux adaptées – pour certaines activités – que la température et les précipitations des 12 mois de l'année. La Figure 1 (page 6) illustre la définition des trois indices retenus pour caractériser le climat des villes d'Europe.

L'index d'aridité est un indice très utilisé qui décrit la quantité d'eau disponible pour les plantes, en fonction des précipitations et de la température. En fonction de cet indice, la végétation d'une région n'est pas la même, et la production agricole possible est également très différente. Cet indicateur est aussi utilisé dans la gestion des eaux, pour mesurer précisément l'intensité des sécheresses estivales.

Une définition pertinente pour la consommation d'énergie repose sur la comparaison du nombre de jours chauffés et du nombre de jours climatisés dans l'année, en tenant compte pour chaque jour de l'écart entre la température réalisée et la température de confort 18°C. Année par année, de tels indices exprimés en *degrés-jours* sont utilisés par les producteurs d'électricité pour « s'assurer » contre les mauvaises années. En effet, la douceur hivernale diminue les ventes d'électricité. Les producteurs négocient donc des contrats avec des compagnies d'assurances, par lesquels ces dernières s'engagent à compenser le producteur si l'indice du nombre de degrés-jours unifié (DJU) pour l'hiver s'avère en-dessous du seuil contractuel. Plus généralement, il existe depuis une dizaine d'années des contrats boursiers qui s'appuient sur ces indices et permettent de se protéger contre (ou spéculer sur) diverses sortes de fluctuations de la météo.

Un indice d'aridité et un indice de température sont en général suffisants pour définir les grandes zones bioclimatiques du globe, c'est pourquoi la distribution sur 30 ans des trois indices définis plus haut nous semble suffisante pour bien définir le climat des villes européennes. Les valeurs sur 1970-2000 nous donnent le climat de référence, ou climat actuel. La projection dans l'avenir de ces indices par les modèles climatiques définit les climats possibles pour la fin du siècle.

Les sources d'incertitudes

Les prédictions du réchauffement au cours du siècle qui vient sont entachées de larges incertitudes. En réalité, deux inconnues de nature très différentes se combinent.

D’abord, on ne connaît pas la quantité de gaz à effet de serre que nos sociétés émettront dans l’atmosphère au cours de ce siècle. Selon les choix que nous ferons en termes de natalité (la population mondiale se stabilisera-t-elle à 9 ou 10 milliards d’habitants ou continuera-t-elle d’augmenter ?), de mobilité (habiterons-nous loin de notre lieu de travail ? Irons-nous en vacances à l’autre bout du monde ?), de consommation (plus de voitures ou plus de cinéma ?), de technologies (plutôt pétrole et charbon, ou soleil et éolien ?), le niveau de nos émissions sera très différent. Les conséquences pour le climat dépendront donc largement des choix que fera l’humanité dans son ensemble.

Une deuxième incertitude est également importante : il reste de larges inconnues sur la réponse du climat à l’accumulation de gaz à effet de serre. Les modèles prédisent des réchauffements globaux plus ou moins importants (entre 2 et 5°C) et les prédictions locales varient encore plus d’un modèle à l’autre ; ainsi les prédictions oscillent entre 1°C et 10°C sur la France. Et d’une manière plus radicale, certains disent possible un arrêt, ou un ralentissement, du Gulf Stream, un courant marin qui participe à la maintenance d’un climat tempéré sur l’Europe de l’Ouest. Un tel arrêt de ce courant est considéré comme très improbable – mais pas impossible – au cours de ce siècle, et possible au cours des siècles qui suivent. Un des trois scénarios présentés ici étudie cette éventualité.

Ces incertitudes sont d’une nature très différente. La première est une incertitude liée à notre liberté d’action, elle traduit le fait que nous pouvons influencer l’avenir. La second est une incertitude scientifique liée à notre connaissance imparfaite du climat.

En fonction du scénario que l’on retient pour les émissions de gaz à effet de serre et pour le comportement du système climatique, l’ampleur et la vitesse du changement climatique seront différentes, et le besoin d’adaptation variera d’autant.

Analogues actuels des climats futurs

La méthode utilisée afin de définir un analogue climatique pour Paris détermine parmi les climats locaux actuels ceux qui ressemblent le plus au climat attendu pour Paris à la fin du siècle. Pour cela, on utilise un scénario d’émission de gaz à effet de serre développé par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur les Changements Climatiques (GIEC, aussi appelé IPCC en anglais), le scénario SRES/A2. Ce scénario suppose une croissance importante de la population et de l’économie mondiales, et donc des émissions de gaz à effet de serre relativement fortes au cours de ce siècle. Dans le cadre de ce scénario, et avec trois modèles climatiques différents, on calcule la distribution entre 2070 et 2099 des trois indices climatiques (degrés-jours unifiés, degrés-jours climatisés et aridité relative) présentés plus haut. Enfin on utilise la statistique de Kolmogorov-Smirnov trivariée pour mesurer la proximité entre le climat futur de Paris et chaque point de la carte des climats actuels.

La figure 2 montre le « score » de ce test sur l’ensemble de l’Europe, c’est-à-dire, pour chaque endroit en Europe, la statistique mesurant la proximité de son climat actuel avec le futur climat de Paris. Trois modèles différents sont comparés. Pour le modèle Arpège-Climat de *Météo-France*, les stations dotées d'un climat actuel assez proche du climat futur de Paris sont sises dans le sud-ouest de la France, le sud de l’Italie, le sud-ouest de l’Espagne et l’Afrique du Nord. Le point pour lequel l’analogie est la meilleure est Rome.
Mais pour les autres modèles on trouve des distributions différentes. Le meilleur analogue est Badajoz en Estremadure espagnole dans la simulation du *Hadley Centre*. La simulation du modèle REMO étudie les effets d'un ralentissement de la circulation du Gulf Stream. Elle suggère pour Paris un climat rencontré actuellement dans les régions Baltes.
La figure 3 illustre où se placent les meilleurs analogues pour neuf métropoles européennes. On voit encore que les résultats des trois simulations sont très contrastés. L'exercice pourrait être multiplié en étudiant d'autres scénarios d'émissions

et d'autres modèles, mais le message est déjà clair: les climats changeront, mais on ne peut pas encore prédire comment.

L'adaptation

Intuitivement, certains pourraient se réjouir de vivre dans le futur sous un climat plus chaud et plus sec. Pourtant, il faut garder à l'esprit que des températures qui serait passées inaperçues à Cordoue ont provoqué plus de 15.000 décès en France en 2003, montrant ainsi que notre pays était tout à fait inadapté à de telles températures. L'été dernier, les conséquences de la canicule, moins intense que la précédente, ont été largement limitées grâce à une gestion de crise améliorée, qui a mobilisé des ressources exceptionnelles (bénévoles, étudiants en médecine, indemnisation des agriculteurs…). Ce type de réponse est toutefois difficilement tenable sur le long terme. Si les canicules se répètent fréquemment, la gestion de crise doit être remplacée par une réelle adaptation, permettant de faire face de manière plus sereine.

Le besoin d'adaptation aux nouvelles conditions climatiques sera donc probablement important. Les bâtiments, les infrastructures et les systèmes électriques sont parmi les équipements les plus vulnérables aux conditions climatiques et ces installations représentent la majorité du capital installé[4]. Par exemple, l'habitat représente à lui seul 50% de la valeur totale du patrimoine des français ! De plus, la durée de vie de ces installations est souvent longue : plus de 150 ans pour les bâtiments de logement, près de cent ans pour les bureaux, quarante à cinquante ans pour une centrale nucléaire… Donc, une partie significative des installations actuelles sera toujours présente à la fin du siècle, et, comme elles ont été conçues pour le climat actuel, elles seront sans doute mal adaptées aux conditions climatiques d'alors, à moins que de coûteuses remises à niveau ne soient entreprises. Aussi, nombre de bâtiments et d'infrastructures actuellement en construction ou en phase de conception auront à traverser ce siècle, et il serait bon de tenir compte dès aujourd'hui des changements de climat qu'ils auront à subir.

Pour prendre en compte l'évolution du climat dans la conception des infrastructures et équipements, il faudrait savoir avec précision comment le climat se transformera. Malheureusement, l'incertitude sur l'ampleur du changement climatique local reste telle qu'il est difficile de concevoir les nouvelles installations d'une manière optimale. Par exemple, les prévisions pour la température maximale l'été à Paris à la fin du siècle oscillent entre 1.5 et 10°C, selon le modèle climatique et le scénario d'émission que l'on utilise. Or, l'architecture optimale d'un bâtiment de logement varie largement sur cette gamme de température : l'orientation du bâtiment, l'épaisseur des murs et l'utilisation d'isolants, la position et la protection des fenêtres, la forme du toit, la couleur des murs et du toit, la gestion de la ventilation, l'installation éventuelle d'une climatisation centralisée… Tous ces paramètres dépendent des conditions climatiques, et l'incertitude sur le climat futur rend ces choix difficiles : ne pas investir assez dans la protection thermique peut rendre le bâtiment inhabitable vers la fin du siècle, ou faire baisser sa valeur de manière importante. Mais investir dans la protection thermique augmente – dès aujourd'hui – les frais de construction, et trop investir dans ce domaine risquerait de freiner inutilement la construction de nouveaux immeubles, alors que la France est déjà en pénurie de logements. La balance entre le risque d'inadaptation à la fin du siècle et les coûts de l'adaptation sur le court terme est subtile, et la détermination du niveau d'investissement idéal est malheureusement impossible en raison des incertitudes sur le réchauffement futur.

Les mêmes problèmes se posent à l'urbaniste : en réponse à l'élévation des températures estivales, on pourrait créer plus d'espaces verts au cœur des villes, ainsi que des plans d'eau. Mais on ferait alors diminuer la densité de l'habitat, créant ainsi des villes plus étendues qui imposent

4 Le capital installé est l'ensemble des biens durables qui produisent des services ou d'autres biens. Il est constitué des bâtiments, des usines, des équipements, des véhicules…

des temps de transport plus longs, donc des consommations de carburant plus importantes, avec des émissions supplémentaires de gaz à effet de serre. On pourrait aussi envisager de modifier la couleur de l'asphalte et des trottoirs, modifier la largeur des rues et installer des pare-soleil. Comme l'a montré l'épisode chaud du mois de Juillet dernier, pendant lequel la température a dépassé 47°C dans le métro londonien et 50°C dans les bus, il pourrait aussi devenir nécessaire de climatiser de manière systématique les transports en commun.

Si la climatisation se généralise, cela induira un pic de consommation électrique en été, période jusqu'alors plutôt creuse sur les réseaux européens. Cette modification de la courbe de charge annuelle devra être prise en compte dans la gestion des infrastructures de production et de distribution d'énergie électrique. Compte tenu des délais et des montants financiers mis en jeu dans ce secteur, une meilleure anticipation de la demande à moyen terme et des contraintes sur la production sera nécessaire pour éviter la répétition des difficultés que l'Europe a traversé lors des récentes canicules, où plusieurs centrales nucléaires ont rencontré des problèmes de refroidissement à cause de la température élevée de l'eau des rivières. Ici encore, cependant, l'anticipation se heurte à l'incertitude sur le climat futur, et le changement climatique va rendre la planification du système énergétique encore plus complexe qu'elle ne l'est aujourd'hui.

Les changements climatiques auront également des conséquences dans des secteurs a priori moins exposés. On observe par exemple que, pendant les périodes chaudes, les consommateurs délaissent les magasins des centres-villes au profit des centres commerciaux climatisés. On sait également que les destinations touristiques dépendent largement des conditions climatiques, et que certaines régions vivent du tourisme : qui passerait ses vacances d'été sur la Côte d'Azur s'il y faisait 45°C tous les jours ? Que fera-t-on des infrastructures touristiques si les touristes ne viennent plus ? Quelles activités remplaceront le tourisme pour faire vivre la population ? Et surtout, compte tenu des incertitudes qui entourent les climats futurs, comment anticiper de tels changements pour les rendre moins douloureux ?

On l'a vu, les changements climatiques se traduiront par d'importants besoins d'adaptation, en particulier pour les villes, qui concentrent les infrastructures et le capital. Et compte tenu de la concurrence que se livrent les grandes métropoles pour attirer les activités économiques, elles se devront de maintenir leur attractivité en s'adaptant, pour épargner à leurs habitants et leurs entreprises une perte de confort ou de revenu substantielle. De plus, la valeur de l'immobilier jouant un rôle essentiel dans les économies modernes, comme investissement et réserve de valeur en particulier, les conséquences économiques d'une baisse des prix de l'immobilier dans une ville qui ne peut maintenir son attractivité seraient générales.

Pour éviter un tel scénario, le montant des investissements nécessaires pourrait se révéler important. Ceci souligne le besoin d'anticipation, afin de pouvoir répartir ces investissements sur une longue période. Il est en effet important d'éviter une coûteuse adaptation « d'urgence », en réaction à des événements extrêmes qui démontreront probablement la nécessité de l'action encore plus clairement que les cartes de cet article. A la Nouvelle Orléans, il eût été moins coûteux de renforcer les digues avant Katrina.

Pour en savoir plus

Stéphane Hallegatte, Jean-Charles Hourcade et Philippe Ambrosi, *Using climate analogues for assessing climate change economic impacts in urban areas*, Climatic Change, sous presse.

Stéphane Hallegatte, 2006, *A Cost-Benefit Analysis of the New Orleans Flood Protection System*, Regulatory Analysis 06-02. American Enterprise Institute and Brookings Joint Center, disponible sur : http://www.aei-brookings.org/publications/abstract.php?pid=1057

Timothy R. Oke, 1987, Boundary layer climates. Second Edition. Routledge

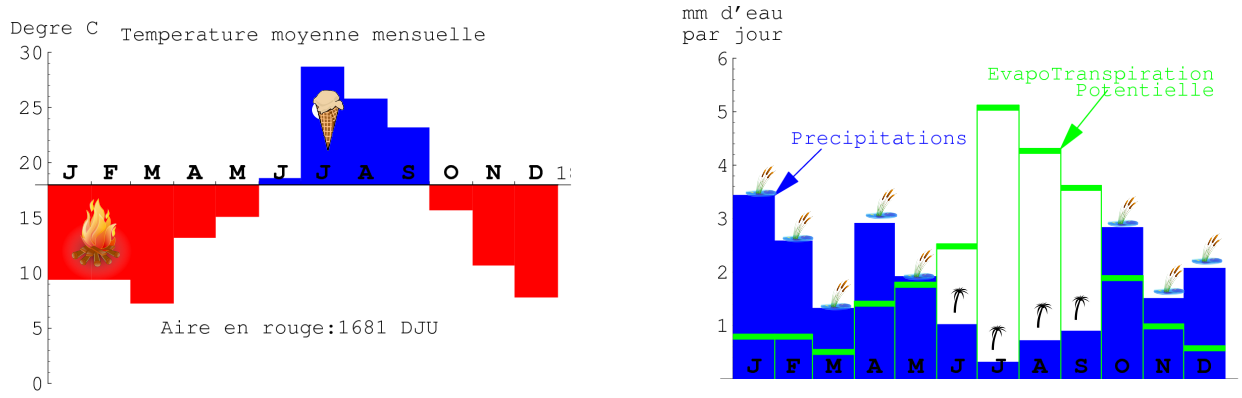

Figure 1: Définition des indices climatiques. Simulations pour Paris 2071 (avec le modèle ARPEGE-Climat).

La première unité représentative de la rigueur climatique est le Degré Jour Unifié (DJU). C'est l'indice qu'on demande par exemple à la Météo pour dimensionner une installation de chauffage. Chaque jour, le DJU est constitué par l'écart entre la température moyenne extérieure et une température de référence de 18°C. Les DJU journaliers sont ensuite additionnés sur l'année (ou sur la période de chauffe), en ne tenant pas compte des jours de température supérieure à 18°C. L'aire en rouge sur la figure de gauche représente le calcul des 1680 DJU pour le climat simulé de Paris en 2071. A titre de comparaison, les DJU à Orly étaient de 2812 en 1996 et 2171 en 2002.

L'aire en bleu sur la même figure, au dessus de 18°C, représente un second indice climatique, moins utilisé en France pour l'instant: le nombre de degrés-jours de climatisation (DJC).

La figure de droite représente un troisième aspect important du climat: l'aridité. Le déficit d'eau est la différence entre les précipitations tombées un mois donné (quantité d'eau disponible, en bleu sur la figure), et la quantité d'eau que le couvert végétal pourrait utiliser ce même mois (compte tenu de l'ensoleillement et de la température, en vert sur la figure). Cette dernière variable est appelée EvapoTranspiration Potentielle (ETP). Dans la simulation représentée, quatre mois sont déficitaires à Paris en 2071. L'indice d'aridité de Thornthwaite se définit comme la somme sur les mois arides des déficits d'eau relatifs (ETP-précipitations)/ETP. Le déficit pluviométrique à Paris de Février à Juillet est de actuellement de l'ordre de 200mm en année normale. Le cas représenté ici, de l'ordre de 400 mm de déficit cumulé, correspond à une année de sécheresse comme 1976.

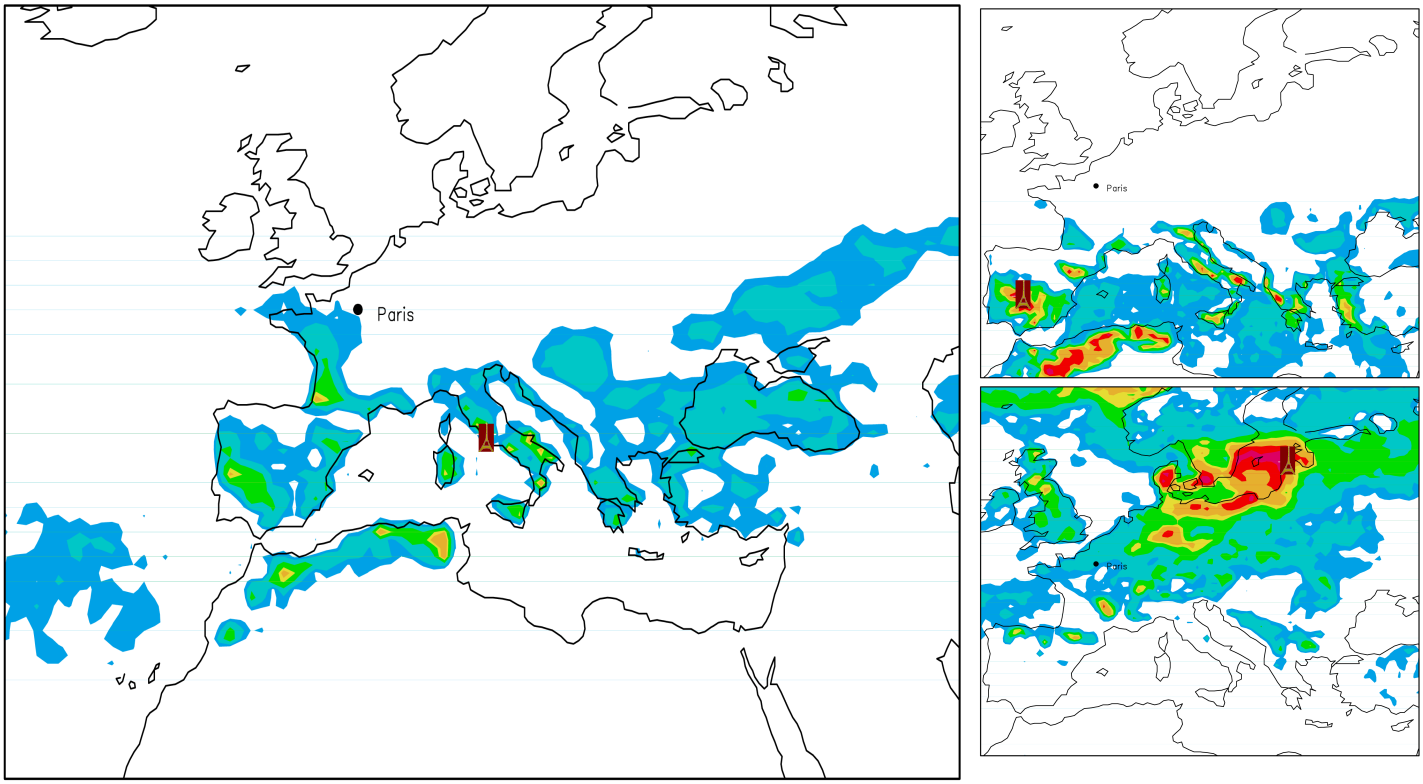

Figure 2: Les analogues actuels du climat futur de Paris (les couleurs chaudes et la tour Eiffel représentent des analogues meilleurs).

La carte de gauche, calculée à partir d'une simulation du modèle Arpège-Climat de *Météo-France*, suggère qu'à la fin du XXIe siècle Paris pourrait bénéficier d'un climat méditerranéen comparable à celui de Rome. En haut à droite, une simulation du modèle HadRM3H du *Hadley Centre*, UK, suggère une alternative plus chaude et sèche: un climat que l'on trouve aujourd'hui dans l'Estremadure, au sud-ouest de l'Espagne. En bas à droite, la visualisation des conséquences possibles d'un ralentissement de 50% de la circulation thermohaline en Atlantique Nord (modèle REMO du *Max-Planck-Institute für Meteorologie*) suggère un climat balte. Les connaissances actuelles ne permettent malheureusement pas de trancher entre ces différents futurs possibles.

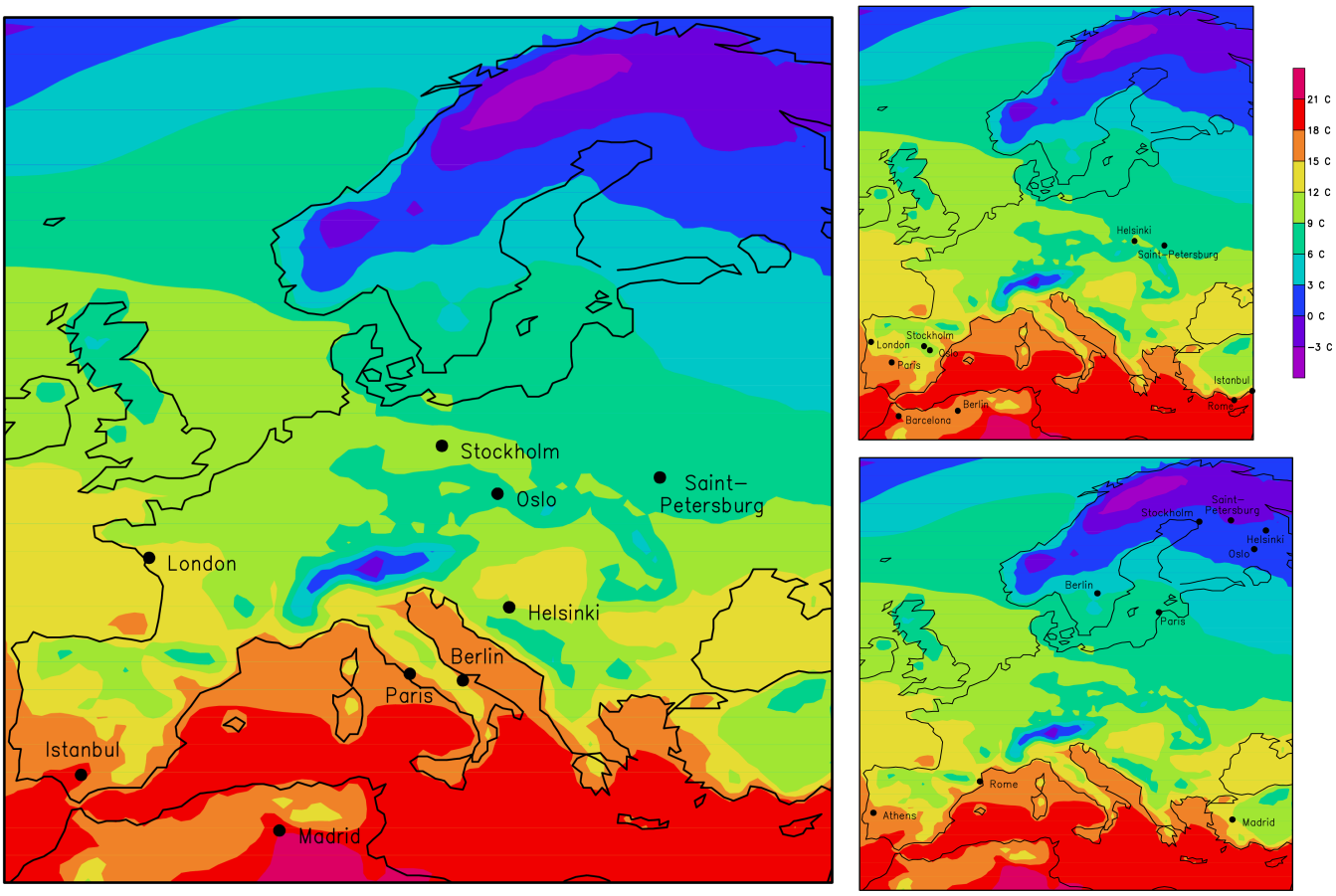

Figure 3: Meilleurs analogues actuels des climats futurs pour quelques métropoles européennes.

Pour chaque ville, la carte indique où on peut trouver aujourd'hui son climat futur. Les scénarios sont les mêmes que sur la Figure 2: Arpège à gauche, une simulation du même profil d'émissions de gaz à effet de serre mais avec le modèle HadRM3H à droite en haut, et le cas du Gulf Stream perturbé à droite en bas. Le fond de carte représente la température moyenne actuelle. On voit que l'affaiblissement du Gulf Stream simulé a un effet sensible, mais pas catastrophique, sur les climats européens.