

# Impact de l'environnement urbain parisien sur les événements météorologiques extrêmes

Arnaud Forster<sup>1\*</sup>, encadré par Stéphane Bélair<sup>2</sup>

1 École Nationale de la Météorologie, Toulouse, France

2 Environnement et Changement Climatique Canada, Montréal, Canada

\***Contact:** arnaud.forster@meteo.fr

## Résumé

Dans la soirée du 9 juillet 2017, Paris a été touché par de violents orages déversant parfois l'équivalent de 3 semaines de pluie sur des zones fortement urbanisées. De nombreuses inondations ont été observées et cet événement avait été très mal anticipé par les modèles de prévision météorologique. Cela a motivé une étude de cas à l'aide du modèle météorologique canadien GEM et ses configurations à très haute résolution. Deux simulations ont été réalisées : l'une contenant une représentation précise de la ville et l'autre où la ville a été remplacée par des champs et des forêts. Les simulations obtenues à 250 m de résolution horizontale ont mis en avant l'influence de l'urbanisation parisienne sur les orages avec l'absence de précipitations sur Paris dans la simulation où la ville a été retirée et de forts orages dans la simulation comprenant la ville.

## Le contexte

L'augmentation croissante de la population et de l'urbanisation à travers le monde place les villes au cœur des enjeux de demain. Les "mégavilles" (villes de plus de 10 millions d'habitants) représentent des poumons économiques, sources de créativité pour les pays alors même qu'elles sont exposées à de nombreux aléas climatiques. Afin d'aider les décideurs à protéger ces zones urbaines et leurs habitants, et à créer les villes de demain, la météorologie urbaine joue un rôle majeur dans la compréhension des phénomènes météorologiques qui touchent les villes. C'est dans ce contexte que le « Research and Demonstration Project » (RDP) mené par Valéry Masson (2020) a été lancé. Il s'inscrit dans une thématique globale mise en place par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) pour faire avancer la recherche dans le domaine de la météorologie urbaine à l'horizon 2030. Le RDP a pour objectif de réaliser des études de situations météorologiques extrêmes sur Paris à l'aide de modèles à très haute résolution afin de comprendre plus précisément les impacts de l'environnement urbain sur la météorologie.

La météorologie urbaine est un domaine crucial pour les centres de prévision météorologique et l'étude de cas du 9 juillet 2017 a pour objectif d'évaluer l'impact de l'urbanisation de la capitale française sur la formation et l'évolution de cellules orageuses comme cela a été fait sur Indianapolis (Niyogi *et al.*, 2011).



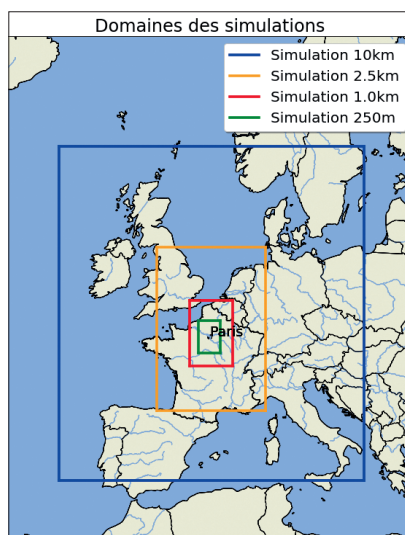
Figure 1 : Orages supercellulaires approchant la capitale.

## Présentation de la démarche

Ce projet a mis en avant les différentes étapes nécessaires à la réalisation de simulations numériques à très haute résolution sur la ville de Paris. D'une analyse globale canadienne avec une maille de 25 km sur la Terre entière il a fallu obtenir une simulation centrée sur Paris à 250 m de résolution horizontale avec une description détaillée de la surface.

### Descente d'échelle dynamique

La complexité et la précision d'un modèle météorologique à l'échelle hectométrique rendent impossible sa mise en place sur la Terre entière avec nos moyens de calculs actuels. Afin de contourner cette difficulté, les chercheurs canadiens utilisent une méthode dite de descente d'échelle dynamique (Wilby and Wigley, 1997) basée sur l'utilisation de modèles à domaines emboîtés. Un modèle de circulation générale à l'échelle globale permet d'obtenir les conditions aux limites des variables météorologiques telles que le vent, la température ou le géopotentiel. De cette manière les valeurs de chaque nouveau domaine à résolution plus fine et les conditions aux limites sont déterminées à l'aide des valeurs fournies sur le domaine à résolution plus lâche. Cette méthode permet ainsi d'obtenir un modèle à domaine limité à très haute résolution à un coût moins élevé que si le modèle à très haute résolution tournait sur la Terre entière.



Cette méthode a été adaptée pour le projet afin d'obtenir un modèle à domaine limité à 250 m de maille horizontale centré sur Paris. Depuis l'analyse globale, nous avons obtenu une première simulation à 10 km centrée sur Paris. Puis avec cette simulation nous avons utilisé les variables obtenues pour forcer aux bords une simulation plus fine à 2,5 km et ainsi de suite jusqu'à la résolution hectométrique. Cela a permis d'obtenir 4 configurations différentes avec des mailles de 10 km, 2,5 km, 1 km et 250 m, visibles en Figure 2.

Figure 2 : Domaines de définition des 4 modèles emboîtés.

## Champs géophysiques de surface

La description de la surface est une étape importante de la configuration des simulations. Avec une maille de 250 m, la précision de la description des bâtiments, des routes ou du type de végétation doit être la meilleure possible afin de s'approcher au mieux de la réalité. Pour cela, deux simulations ont été réalisées avec d'un côté une description à 250 m de la ville de Paris (basée sur les données en libre accès « d'Open Street Map » et le modèle de ville « TEB » développé par Météo-France), et de l'autre côté la ville remplacée par des terres agricoles et des forêts.

La description de la ville ne doit pas être négligée afin d'obtenir les représentations les plus proches de la réalité des flux thermodynamiques. Les simulations étant réalisées avec le modèle canadien, la description de la surface est également basée sur la représentation des bâtiments nord-américains. Or ceux-ci diffèrent grandement des bâtiments parisiens. Afin d'obtenir une description plus exacte de la capitale française, nous avons utilisé les données en libre accès des caractéristiques thermiques des bâtiments fournies par De Munck *et al.* (2017). Celles-ci nous ont permis de remplacer les caractéristiques des bâtiments nord-américains par ceux des bâtiments parisiens pour 5 types d'infrastructures: maison individuelle, maison collective, bâtiment Haussmannien, tour de bureau et local industriel. Grâce à ces données nous avons obtenu des paramètres géophysiques plus proches des caractéristiques des bâtiments parisiens (voir Figure 3).

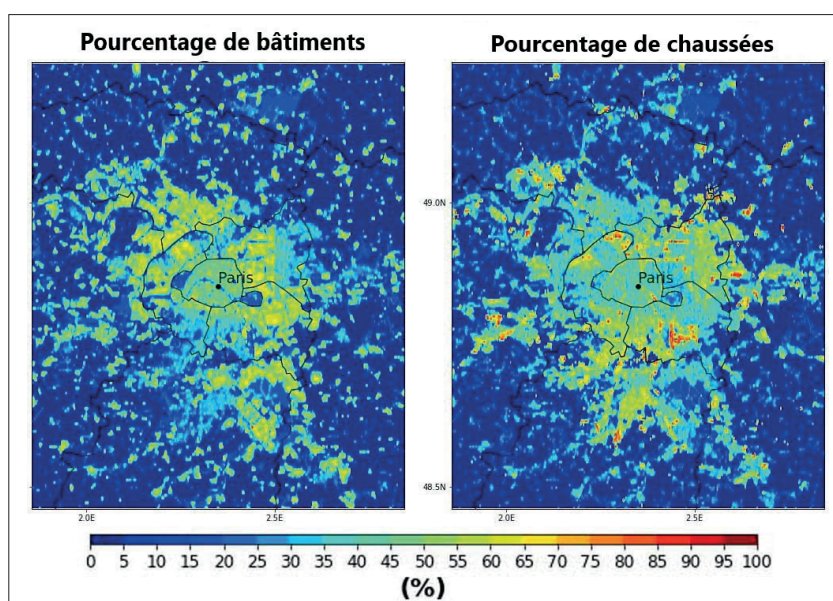


Figure 3 : Types d'environnement urbain générés à 250 m de résolution sur Paris.

En parallèle, nous nous sommes appuyés sur les données caractérisant le Mode d'Occupation des Sols (MOS) publiées sur le site « Institut Paris Région » ([www.institutparisregion.fr](http://www.institutparisregion.fr)) pour remplacer de manière réaliste la ville par de la végétation. Le schéma de ville a été désactivé et les données urbaines comme les routes et les bâtiments ont été remplacées par une description du couvert végétal dominant en Ile-de-France. Il s'agit en grande partie de terres agricoles, environ 60 %, de forêts constituées d'arbres caduques, environ 30 %, ainsi que 10 % d'herbes et d'arbustes.

Ces configurations nous permettent ainsi d'avoir deux simulations cohérentes avec d'un côté une description détaillée de la ville avec des routes, bâtiments et couvert végétal urbain, et de l'autre une représentation précise de la végétation sans ville en Ile-de-France. Cela nous permet ainsi d'évaluer l'impact d'un environnement urbain sur les orages.

## Le cas d'étude

La situation météorologique orageuse sur la ville de Paris étudiée est celle du 9 juillet 2017. Après un début de mois de juillet très chaud, un thalweg traverse le pays et va déstabiliser la masse d'air. Avec un flux en altitude très faible et de l'air chaud et humide en basses couches, les orages qui se forment sont très peu mobiles et l'un d'eux va déverser plus de 50 mm de pluie sur la capitale en fin de journée.

En lien avec un apport d'air chaud et humide une ligne orageuse se déclenche en début d'après-midi ; Celle-ci évite Paris mais avec le passage du front, l'air est devenu instable sur la capitale. L'air chaud emmagasiné dans la journée (30 °C à Paris Montsouris) renforce alors cette instabilité et en début de soirée des cellules orageuses se forment exactement au-dessus de la ville. Cette formation imprévue des cellules orageuses au-dessus de la capitale nous a ainsi motivés à étudier l'influence de l'environnement urbain sur celles-ci.



## Résultats clés

La comparaison des deux simulations (avec et sans modélisation de la ville) apporte plusieurs indications intéressantes sur ces phénomènes orageux extrêmes du 9 juillet 2017. La simulation sans environnement urbain, appelée NO\_CITY, n'a simulé aucun orage sur Paris alors qu'au contraire la simulation avec ville, appelée TEB, a donné des cellules orageuses intenses sur Paris. C'est pourquoi il est pertinent d'examiner maintenant les divers paramètres physiques qui sont à l'origine des différences entre les deux simulations et permettent de comprendre l'influence de l'environnement urbain sur les orages dans le cadre de cette étude.

### Îlot de chaleur urbain

Dans le courant de l'après-midi du 9 juillet, la chaleur est déjà bien présente sur la capitale avec plus de 29 °C pour la simulation NO\_CITY et jusqu'à 32 °C de moyenne sur la simulation TEB. La figure 4 illustre la présence d'un îlot de chaleur urbain en ville puisque la simulation avec environnement urbain donne jusqu'à 3 °C de plus que la simulation avec couvert végétal. En associant à cela la courbe du point de rosée moyennée sur Paris (non montrée ici) pour chacune des simulations, il en ressort que l'humidité est plus faible sur la simulation TEB, l'évaporation moindre en ville qu'en campagne, puis vers 16 h UTC une forte augmentation de l'humidité est observée sur les deux simulations. La combinaison des températures à 2 m et l'apport d'humidité vers 16 h UTC illustre parfaitement l'augmentation d'énergie nécessaire pour générer l'instabilité favorable aux orages. Mais en raison d'une température à 2 m plus élevée pour TEB et d'un apport d'humidité plus important vers 16 h UTC, l'instabilité est plus élevée pour la simulation avec ville.

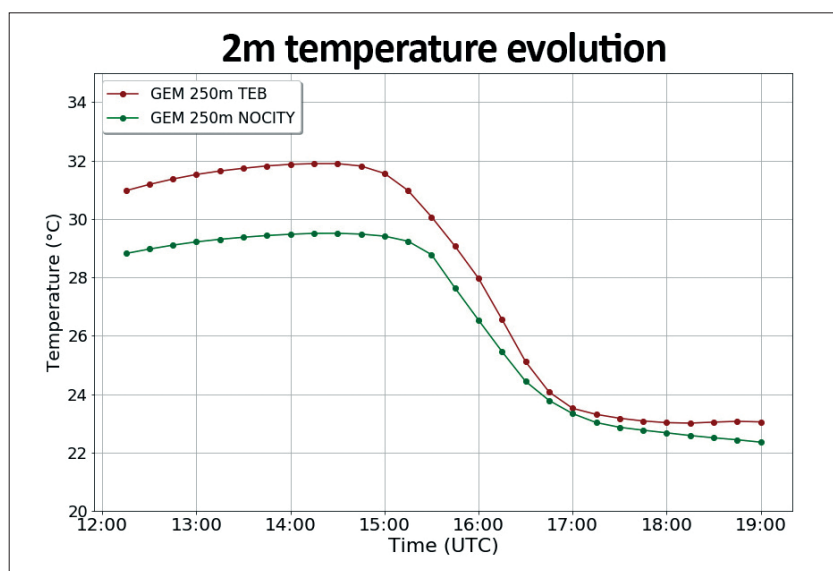


Figure 4 : Graphes d'évolution de la température à 2 m moyennée sur le département de Paris.

### Développement de la couche limite

Dans cette situation, le développement de la couche limite atmosphérique sur Paris semble avoir joué un rôle important pour la formation des orages car il est très différent dans les deux simulations. Du fait d'une température plus élevée pour la simulation TEB, le chauffage radiatif est plus important et la turbulence au sein de la couche limite est ainsi exacerbée. Il en découle alors pour la couche limite un développement plus important dans la simulation TEB que dans la simulation NO\_CITY. La couche limite atmosphérique s'élève jusqu'à 2000 m environ pour TEB alors qu'elle n'atteint qu'une hauteur de 1500 m pour NO\_CITY. La présence du milieu urbain modifie de manière non négligeable la couche limite qui se développe de façon plus importante avec une turbulence plus élevée.

### Stabilité de l'atmosphère

Dans notre cas d'étude, la stabilité de l'atmosphère joue aussi un rôle dans la formation des orages. Afin de comprendre cela, les profils verticaux de température potentielle équivalente ont été représentés à 15 h et 16 h UTC pour les deux simulations sur la figure 5. La température potentielle équivalente permet de caractériser le potentiel instable de la masse d'air. On voit dans un premier temps que des inversions autour de 2500 m sont présentes sur les deux simulations à 15 h UTC. Cela traduit à ce moment une atmosphère encore stable où les inversions forment comme un couvercle bloquant les mouvements verticaux des particules d'air et stoppent ainsi la formation des orages. À l'échéance suivante, on s'aperçoit que les inversions ont totalement disparu pour TEB alors qu'elles sont encore présentes, bien que plus faibles, pour NO\_CITY.

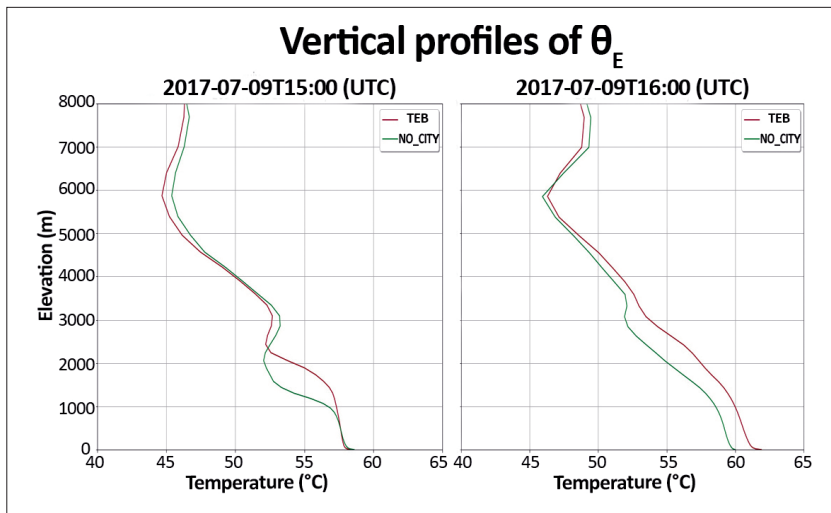


Figure 5 : Profils verticaux de la température potentielle équivalente moyennée sur le département de Paris.

Cette constatation est primordiale puisqu'elle traduit une instabilité bien plus importante de la masse d'air pour TEB où toutes les inversions ont été éliminées par le chauffage radiatif et la turbulence alors que ces inversions, qui persistent pour NO\_CITY ont fortement freiné la formation d'orages.

Afin de visualiser cela spatialement, la représentation de la CAPE (Convective Available Potential Energy, c'est -à-dire l'énergie potentielle susceptible d'être transformée en énergie cinétique pour les ascendances) est proposée en Figure 6 ; on voit effectivement que celle-ci est beaucoup plus élevée, 2400 J/kg pour TEB, contre 2000 J/kg pour NO\_CITY. On a ainsi une masse d'air bien plus instable pour la simulation TEB du fait de la présence de l'environnement urbain. Le potentiel convectif est donc plus élevé et si un forçage de basses couches intervient les orages vont pouvoir se développer.

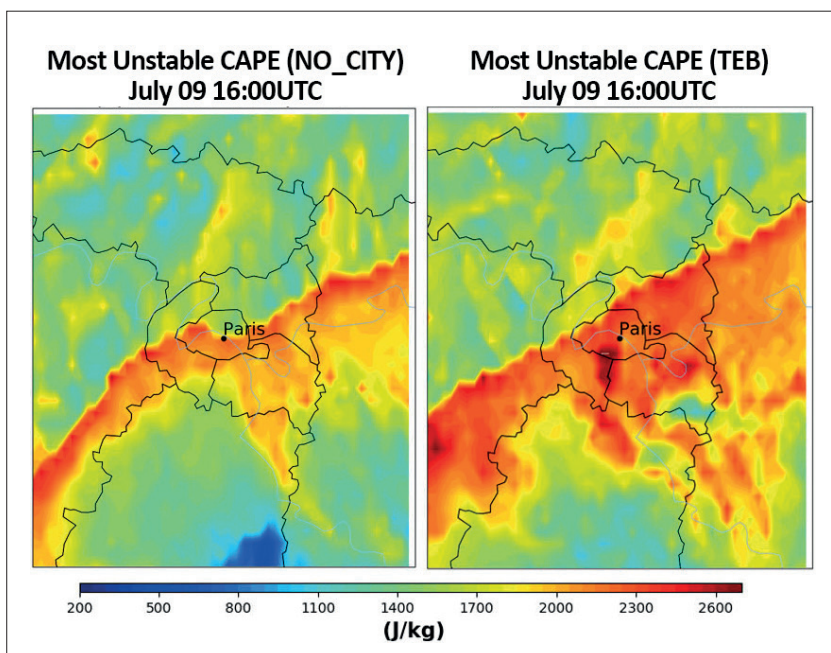


Figure 6 : Cartes de la CAPE la plus instable simulée à 16 h UTC.

### Zone de convergence

Comme l'énergie nécessaire à la convection est simulée notamment pour TEB, il s'agit maintenant de vérifier s'il existe des éléments déclencheurs de la convection (ce qu'on appelle les forçages). Paris étant située en plaine, les forçages peuvent se traduire par une zone frontale ou une convergence de basses couches. En observant la divergence à 950 hPa environ représentée sur la Figure 7, on voit distinctement une bande de convergence (divergence négative), constituant l'élément déclencheur de la convection, traverser Paris le dimanche 9 juillet 2017.

En étudiant de manière plus poussée des résultats non montrés ici, il semblerait que cette convergence de basses couches soit générée par le changement de direction des vents du nord-est au sud-est lors du passage des orages au sud de l'île de France.

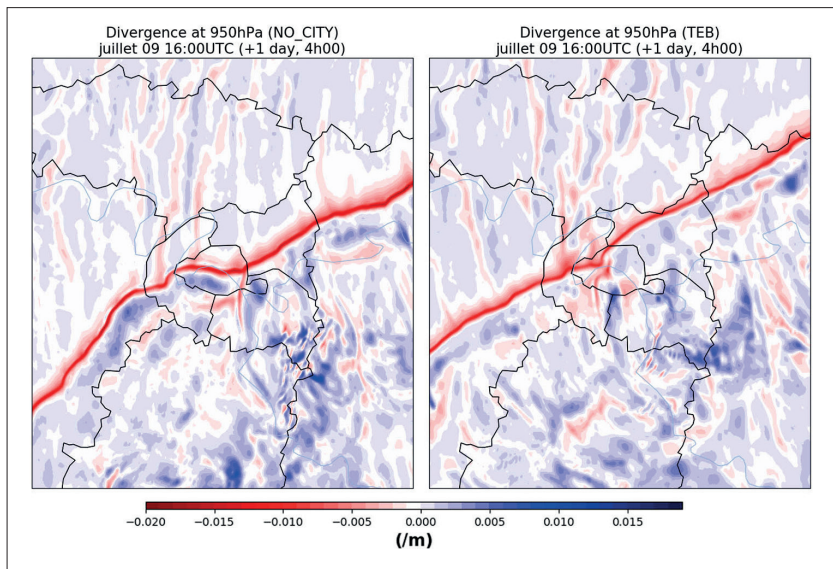


Figure 7 : Cartes de la divergence à 950 hPa simulée à 16 h UTC.

Une analyse plus détaillée des cartes de divergence (non montrées ici) permet de voir la vitesse de déplacement de cette zone de convergence. Cette zone traverse la région parisienne plus rapidement pour NO\_CITY que pour TEB. En l'absence de milieu urbain les vents se sont propagés plus rapidement qu'en présence de ville.

Cela semble cohérent et expliqué par les faibles valeurs de rugosité pour un couvert végétal. Il se pourrait donc que le déplacement de cette zone de convergence ait joué un rôle dans le déclenchement de la convection pour TEB. En effet dans cette simulation, la zone de convergence se déplace plus lentement, ce qui permet d'avoir plus de temps pour que les vitesses verticales se renforcent et soulèvent la masse d'air de manière plus conséquente.

### Déclenchement des orages

Les points détaillés dans les paragraphes précédents permettent d'expliquer la formation des orages sur la simulation TEB alors qu'aucun orage n'est simulé dans la simulation NO\_CITY. La combinaison de ces paramètres a ainsi permis de déclencher les orages pour TEB et pas pour NO\_CITY. Ceci apparaît clairement sur la figure 8 qui présente les taux de précipitations horaires à l'échéance de leur maximum d'intensité au-dessus de Paris. Il n'y a quasiment pas d'orages sur Paris avec NO\_CITY alors qu'avec TEB on relève des pics à 70 mm/h comme observé par les radars. On notera qu'un décalage de 3 h est présent entre les observations et les simulations. Ce décalage est dû notamment au fait que le modèle était plus chaud que les observations, et ainsi déclenché la convection plus tôt que dans la réalité.

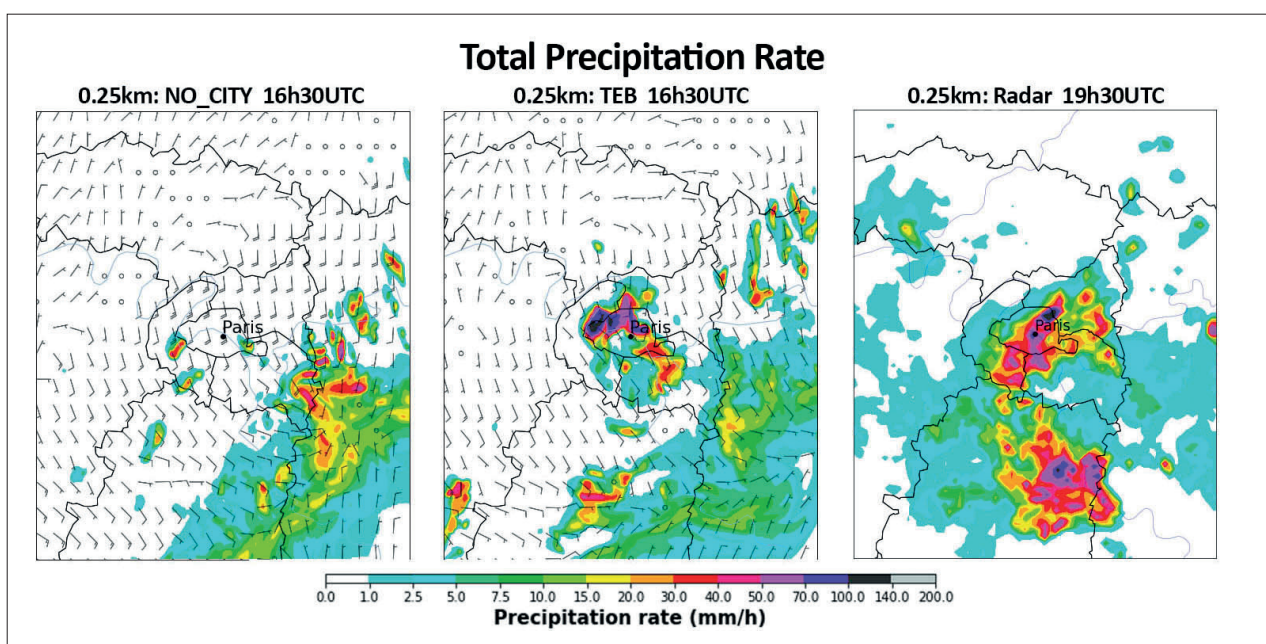


Figure 8 : Taux de précipitations horaires simulées à l'échéance du maximum d'intensité au-dessus de Paris pour NO\_CITY (à gauche), TEB (au milieu) et valeurs issues des réflectivités radar relevées au maximum d'intensité (à droite).



A titre comparatif, la lame d'eau radar (non montrée ici) confirme ce comportement avec plus de 50 mm sur la zone de Paris. Les taux de précipitations horaires appuient cette constatation puisqu'au maximum de l'événement ils atteignent 70 mm/h à 16h30 UTC pour TEB alors que NO\_CITY ne voit aucune précipitation. La seule différence entre les deux simulations étant la présence ou non du milieu urbain, on en déduit que celui-ci a effectivement une influence sur l'initiation des orages dans cette situation. Il apparaît également sur la troisième vignette de la figure 8 que, dans la réalité, les orages ne se manifestent que vers 19h30 UTC, c'est-à-dire avec près de 3 h de retard par rapport aux deux simulations. Cette difficulté des modèles de prévision à bien simuler le cycle diurne du développement de la convection est assez générale et bien connue dans les centres de prévision numérique du temps. Elle se manifeste pareillement dans nos deux simulations et provient certainement des conditions initiales qui diffèrent de la réalité. L'urbanisation n'a que très peu d'impact dans l'heure de déclenchement des orages dans cette expérience.

## Conclusion et perspectives

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'impact d'un environnement urbain comme Paris sur le développement des orages violents en utilisant la situation du 9 juillet 2017. Deux simulations ont été effectuées avec d'un côté une simulation sans environnement urbain et de l'autre un environnement urbain détaillé grâce au modèle TEB. Les résultats sont très concluants car ils mettent en avant l'impact de l'environnement urbain sur le déclenchement des orages puisque dans le cas de NO\_CITY aucun orage ne s'est développé alors qu'avec la simulation TEB de forts orages ont éclaté en raison d'un chauffage radiatif plus important. Cela est bien confirmé par les observations de ce jour là, en dépit d'un décalage de 3 h.

Pour poursuivre cette étude, un projet de recherche à l'échelle mondiale a été lancé afin d'obtenir des simulations avec plusieurs modèles dans le but d'obtenir des analyses multimodèles. Cela permettra d'évaluer la robustesse des scénarios d'impact de l'environnement urbain en terme d'initiation, de renforcement ou de séparation des orages.

## Remerciements

Je tiens à remercier mon encadrant Stéphane Bélair pour son aide tout au long du stage, Sylvie Leroyer et Oumarou Nikiema pour leurs explications sur la mise en place des configurations du modèle canadien. 🌈

## Bibliographie

De Munck C., A. Lemonsu, V. Masson, J. Le Bra and M. Bonhomme (2017). Evaluating the impacts of greening scenarios on thermal comfort and energy and water consumptions for adapting Paris city to climate change. *Urban Climate* **23**, 260-286. doi: 10.1016/uclim.2017.01.003.

Foulard S. (2019) : Mode d'occupation des sols (MOS) - L'inventaire numérique de l'occupation du sol en Île-de-France. URL : <https://www.institutparisregion.fr/mode-doccupation-du-sol-mos.html>.

Masson V. (2020). WMO Research Demonstration Project « Paris Olympic Games 2024 ». [http://www.umr-cnrm.fr/RDP\\_Paris2024](http://www.umr-cnrm.fr/RDP_Paris2024).

Niyogi D., P. Pyle, M. Lei, S. Pal Arya, C. M. Kishtawal, M. Shepherd, F. Chen and B. Wolfe (2011). Urban Modification of Thunderstorms: An Observational Storm Climatology and Model Case Study for the Indianapolis Urban Region. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **50**, 1129-1144. doi: 10.1175/2010JAMC1836.1.

Wilby R.L. and T. M. L. Wigley (1997). Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* **21**(4), 530-548. doi:10.1177/030913339702100403.