

# Remontée des chemins thermiques de la ville dans la colonne d'un modèle de climat

October 28, 2025

## 1 Introduction

On décrit ici une proposition physique et informatique pour le couplage climat-ville. Côté ville, on dispose d'un modèle de conduction thermique dans les bâtiments, couplée au rayonnement dans les pièces et en dehors des bâtiments et à la convection de pièces entièrement brassées. L'intégration numérique de ce modèle se fait sur la base de "tirages" Monte Carlo de "chemins thermiques", balayant successivement les différentes "physiques" et permettant de prendre en compte toute la complexité géométrique des bâtiments (cf. e.g. Villefranque et al., 2022)).

Les calculs sont intégrés dans le logiciel informatique **Stardis** porté par l'entreprise MesoStar pour le consortium ESstar.

Côté climat, les modèles de circulation générale (GCM) permettent de produire des séquences météorologiques toutes les 15 minutes (le pas de temps typique du modèle) en tout point du globe. La résolution spatiale de ces simulation est relativement grossière, mais peut être ensuite raffinée.

Une installation comme un bâtiment ou une ville, est d'échelle plus petite que la maille du modèle de climat. Elle voit donc une seule "colonne" de ce modèle, superposition verticales de mailles, de quelques dizaines à centaines de kilomètres de côté pour une épaisseur de quelques dizaines de mètres près de la surface à plutôt 1 km dans la troposphère libre.

En préalable du travail proposé ici, **Stardis** a été interfacé avec des données météorologiques produite par le GCM. Dans cette première version, on suppose que la température de l'air près de la surface n'est pas affectée par la présence de la ville. **Stardis** n'a alors besoin de connaître que la température dans la première couche du modèle, une température radiative caractéristique du rayonnement infra-rouge, le flux solaire arrivant à la surface, et également le flux latent associé au refroidissement de la surface par évaporation.

L'enjeu du présent document est de présenter des pistes de modélisation et d'implémentation informatique permettant de poursuivre les chemins dans une région au dessus de la ville, typiquement jusqu'à 1 ou 2 km, afin de pouvoir simuler des effets comme l'ilot de chaleur urbain, dans lequel la température de l'air au dessus de la ville est réchauffée par celle-ci.

Ce texte a été co rédigé avec l'entreprise MesoStar dans le cadre d'une prestation du projet MC2.

## 2 Le modèle

### 2.1 Un domaine plongé dans la maille du GCM

Nous décrivons ici le modèle de couplage entre le bâti et la colonne du GCM.

La première idée est de définir un domaine horizontal incluant tout le bâti d'intérêt ainsi que le "panache" de la ville, c'est à dire une certaine distance sous le vent de la ville.

A un moment donné, le vent souffle dans une direction sur la ville, renouvelant l'air en typiquement une heure pour quelques dizaines de km. L'air en amont de la ville n'est pas affecté par

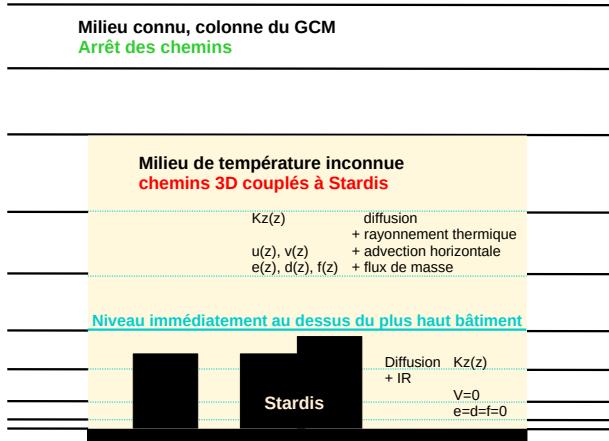


Figure 1:

la ville au premier ordre. L'air en aval est affecté (par exemple réchauffé en cas d'ilot de chaleur urbain) mais ne rétroagit pas sur la ville au premier ordre.

A priori, il n'y a pas besoin d'étendre indéfiniment ce domaine pour ce qui est du couplage avec la ville sauf pour deux aspects : le transfert de rayonnement thermique qui peut faire intéragir l'air en aval ou en amont directement avec la ville ; des cas de changement de vent ou vents faibles induisant des recirculation. La taille nécessaire du domaine pourra être testée numériquement une fois le modèle développé et codé mais on peut penser qu'une vingtaine de km en amont ou en aval suffiront pour une ville d'une vingtaine de km de diamètre.

Verticalement, par définition, la partie affectée directement par le couplage à la surface s'appelle la couche limite. Elle fait typiquement quelques dizaines de mètres d'épaisseur (dans des conditions très stables) à quelques kilomètres (en cas de convection). En présence de ville, la hauteur de cette couche peut cependant être notablement affectée. Là encore, c'est typiquement une chose qui pourra être testée avec le modèle puisqu'il n'existe pas pour le moment de modèle ou code permettant de tester ces hypothèses.

## 2.2 Les différents processus pris en compte

### Le chauffage solaire

Le modèle de transfert radiatif du MCG permet de calculer les flux radiatifs direct et diffus en surface en tenant compte de la composition de l'atmosphère et de la présence de nuages. Ce calcul n'est que très faiblement couplé à la température. Il pourrait l'être au dessus d'une ville par exemple si la présence de la ville créait ou détruisait des nuages. On n'essaiera pas d'aborder ce type de question ici et on supposera que les nuages ne sont pas affectés. Ce rayonnement peut également dépendre de la pollution, qui peut absorber et diffuser une partie du flux provenant du soleil. Cette partie serait sans doute plus facile à intégrer mais ne sera pas considérée dans un premier temps.

Il faut tenir compte aussi du chauffage direct de l'air par absorption de rayonnement solaire.

On sait faire ? C'est un des trucs pas évidents c'est ça ?

### Le rayonnement infra-rouge

La surface des bâtiments comme l'air émettent et absorbent du rayonnement infra-rouge dit thermique. On supposera pour simplifier là aussi que la composition de l'atmosphère est connue. On négligera la diffusion comme c'est fait dans le GCM. En revanche le rayonnement contribue au couplage des températures à l'intérieur du domaine et entre le domaine et la maille du GCM, y

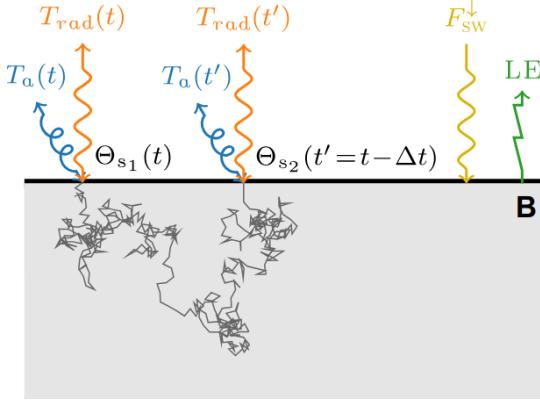


Figure 2: Schema des échanges pris en compte dans la version sans couplage avec la température de l'air.

compris potentiellement très loin horizontalement. On essaiera plusieurs modèles, incluant ou non une dépendance spectrale.

### Advection de grande échelle

On suppose le vent horizontal connu et uniforme dans tout le domaine, égal à sa valeur dans la maille du GCM ( $u(z), v(z)$ ). Pour simplifier, on supposera que le mouvement horizontal est bloqué en annulant le vent dans les couches du modèles qui intersectent la géométrie de **Stardis**.

### Diffusion turbulente

On supposera qu'elle s'effectue avec un coefficient de diffusion turbulente  $K_z(z)$  connu. Rendre ce coefficient dépendant du gradient vertical de température (au quel il est sensible) pourra être envisagé par la suite mais compliquera grandement le modèle en introduisant une forte non linéarité.

### Schéma de convection de couche limite

Elle utilisera le schéma en flux de masse du thermique, un schéma en flux de masse qui s'apparente à de l'advection. Dans ce schéma, la colonne atmosphérique est séparée entre de l'air qui monte à une vitesse  $w_{th}(z)$  dans les panaches, sur une surface  $\alpha_{th}(z)$  de la maille horizontale, et de l'air qui descend pour compenser l'ascendance sur une surface  $1 - \alpha_{th}$  et donc à une vitesse  $w_{th}\alpha_{th}/(1 - \alpha_{th})$ . L'air est entraîné latéralement vers le panache vers sa base et détrainé vers son sommet, avec des taux  $e_{th}(z)$  et  $d_{th}(z)$ , en suivant une équation de continuité

$$\frac{\partial f_{th}}{\partial z} = e_{th} - d_{th} \quad (1)$$

Là aussi, on imposera  $f_{th}(z) = 0$  dans les couches interceptant la géométrie du bâti. Il faudra alors imposer que tout l'air qui était entraîné sous cette couche l'est dans la première couche non affectée :

$$f_{thk} = e_{thk} = d_{thk} = 0. \text{ pour } k < k_{libre,1} \quad (2)$$

$$e_{thk_{libre,1}} = \sum_{k=1}^{k_{libre,1}-1} (e_{thk} - d_{thk}) \quad (3)$$

## 2.3 Formulation en espace de chemins

### Sans couplage avec la colonne atmosphérique

C'est ce qui a été implémenté dans **Stardis** à l'occasion de la première prestation du projet MC2/WP2, suivant le modèle illustré dans la Fig. 2 publiée par Villefranque et al. (2022).

La formulation en espace de chemin prolongera dans l'atmosphère des chemins qui "sortent" à la surface des bâtiments.

Jusque là ces chemins ont plusieurs issues possibles quand ils arrivent à la surface des bâtiments :

- ils s'arrêtent à la température atmosphérique  $T_a$  imposée uniforme par convection.
- ils partent en rayonnement solaire ajoutant un sac à dos.
- ils partent en rayonnement infra-rouge vers une autre paroi du bâti ou vers la température de ciel  $T_{rad}$ , elle aussi imposée et uniforme.
- ils partent en évaporation. Cette évaporation étant un terme imposé du bilan d'énergie, il s'agit d'un sac à dos.

### Couplage et remontée des chemins dans l'atmosphère

Le couplage avec l'atmosphère à partir de la surface s'effectue à partir des échanges radiatifs infra-rouge et des échanges convectifs.

Au lieu de s'arrêter en  $T_{rad}$ , les chemins convectifs vont être réinjectés à une certaine distance de la paroi (à travailler) où ils "prendront" la température de l'air.

De la même façon, les chemins radiatifs infra rouges détermineront un point d'absorption par l'atmosphère, où ils "prendront" la température de l'air.

Cette température de l'air étant elle-même inconnue, les chemins vous se prolonger jusqu'à trouver une issue de température connue (auquel cas le chemin s'arrête) ou à ré-intercepter le bâti. Ces chemins peuvent "partir" en:

**advection horizontale** en remontant en arrière le long du vent dominant. Ce vent peut amener à "sortir" en amont de la ville dans la maille du GCM. Cette issue contribue à l'influence de l'air entrant en amont de la ville sur le bâti. Pour éviter les problèmes d'intersection du bâti, on suppose  $(u(z), v(z)) = (0, 0)$  dans les couches qui l'interceptent.

**diffusion turbulente**, de coefficient  $K_z(z)$  issu du GCM, qui sera traitée comme une marche aléatoire à pas fixe. Cette diffusion peut faire des sorties (issues) sur toutes les parois du domaine, et également sur le bâti.

**flux de masse**, associés à la convection de couche limite. Les chemins se font à l'envers, c'est à dire que les chemins ont une probabilité de "rentrer" dans le panache donnée par le détrainement latéral  $d_{th}(z)$  et de sortir parfois directement en haut du panache, ou de sortir par rétro entraînement latéral  $d_{th}(z)$  en haut du panache. La subsidence compensatoire fera aussi qu'une fraction des chemins partira vers le haut, pouvant là aussi sortir en haut du domaine (issue).

**rayonnement infra-rouge** ; comme depuis la paroi, le chemin peut partir en rayonnement et échantillonner soit un autre point de l'atmosphère (dans ou en dehors du domaine) soit un point de la surface.

Une maquette de ce couplage sans rayonnement et en géométrie plane (dalle de béton en surface) a déjà été réalisée montrant la praticabilité.

Plusieurs hypothèses sont actuellement travaillées pour le rayonnement infra-rouge.

## 3 Aspects informatiques

### 3.1 Accès à la donnée

(Surement pas en premier)

On fournira donc toutes les heures ou toutes les 3 heures typiquement des profils verticaux discrétisés de  $u$ ,  $v$ ,  $T$ ,  $q$  (concentration en vapeur d'eau)  $e_{th}$ ,  $d_{th}$ ,  $f_{th}$ ,  $K_z$ , en plus d'informations sur le rayonnement (à définir).

Le fichiers d'origine sera fourni au format NetCFF.

La colonne est discrétisée typiquement sur une centaine de couches, donc quelques dizaines dans le domaine couplé. Il s'agira donc d'avoir un algorithme de recherche rapide de la couches et de lecture dans le jeu de données.

## References

Villefranque, N., F. Hourdin, L. d'Alençon, S. Blanco, O. Boucher, C. Caliot, C. Coustet, J. Dauchet, M. El Hafi, V. Eymet, O. Farges, V. Forest, R. Fournier, J. Gautrais, V. Masson, B. Piaud, and R. Schoetter, 2022: The “teapot in a city”: A paradigm shift in urban climate modeling, *Science Advances*, **8**.