

Projet ANR 17-CE22-0002-01
EVNATURB
Programme JCJC 2017

Livrable 2.1 & 2.3: Report on thermo-hydric modelling through scales



Julien CRAVERO (HM&Co-ENPC)

Leydy Alejandra CASTELLANOS DIAZ (HM&Co-ENPC)

Pierre-Antoine VERSINI (HM&Co-ENPC)

Octobre 2019



Table of Content

Table of Content	2
ABSTRACT	5
1. INTRODUCTION	6
2. Modélisation à l'échelle du bâtiment	7
2.1. Modèle ROOFSOL	7
2.2. Autre Modèle 1-D	8
2.3. Modèle EnergyPlus	9
3. Modélisation à l'échelle du quartier	11
3.1. Modèles VUCM	11
3.2. Modèles SURFEX et TEB	12
3.3. Modèle SOLENE-Microclimat	15
3.4. Modèle ENVI-met	18
3.5. Modèle OpenFOAM	19
3.6. Modèle ANSYS FLUENT	21
3.7. Remarques complémentaires sur les modèles CFD	21
4. Modélisation à l'échelle de la ville	23
5. CONCLUSIONS	24
BIBLIOGRAPHIE	25

Abréviations

C_p	Capacité thermique massique [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]
DuT	Coefficient de diffusivité de la vapeur isotherme [$kg.m^2.s^{-1}.K^{-1}$]
e_f	Pression de vapeur de la surface de la feuille [Pa]
e_a	Pression de vapeur de l'air [Pa]
Ψ	Potentiel hydrique [kPa] ou [cm]
ϕ_{rad}	Flux de chaleur radiative [$W.m^{-2}$]
ϕ_{sen}	Flux de chaleur sensible (ou convectif) [$W.m^{-2}$]
ϕ_{lat}	Flux de chaleur latente [$W.m^{-2}$]
ϕ_{trans}	Flux de chaleur due à l'évaporation [$W.m^{-2}$]
ϕ_{trans}	Flux de chaleur due à la transpiration [$W.m^{-2}$]
ϕ_{cond}	Flux de chaleur par conduction dans le sol [$W.m^{-2}$]
ϕ_{cap}	Flux de vapeur d'eau [$kg.m^{-2}$]
K_s	Conductivité hydraulique à saturation [$m.s^{-1}$]
λ	Conductivité thermique [$W.m^{-1}.K^{-1}$]
Λ	Chaleur latente de vaporisation [$J.kg^{-1}$]
LAI	Indice foliaire [$m^2 m^{-2}$]
PET	Potential Evapotranspiration [$mm day^{-1}$]
ρ	Densité [$kg.m^{-3}$]
q_a	Humidité spécifique de l'air [$kg.kg^{-1}$]
q'	Rapport de mélange [$kg.kg^{-1}$]
θ	Teneur en eau volumique [-]
θ_{wilt}	Teneur en eau volumique au point de flétrissement [-]
θ_{fc}	Teneur en eau volumique à la capacité au champ [-]
r_a	Résistance aérodynamique (ou externe) [$s.m^{-1}$]
r_s	Résistance stomatique (ou interne) [$s.m^{-1}$]
T_a	Température de l'air [$^{\circ}C$]
T_s	Température du sol ou substrat [K]
V_a	Vitesse de l'air (vent) [$m s^{-1}$]
z_s	Profondeur du sol [mm]
γ	Constante psychométrique aérodynamique [$Pa.K^{-1}$]

Humidité relative : correspond au rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans l'air (e_a) sur la pression de vapeur saturante (ou tension de vapeur qui est la pression à laquelle la phase gazeuse d'une substance est en équilibre avec sa phase liquide ou solide à une température donnée dans un système fermé) à la même température (e_{sat}). Elle est donc une mesure du rapport entre le contenu en vapeur d'eau de l'air et sa capacité maximale à en contenir dans ces conditions.

$$\phi = \frac{e_a}{e_{sat}}$$

Humidité spécifique : correspond au rapport de la masse d'eau dans l'air sur la masse d'air humide. À ne pas confondre avec le rapport de mélange, qui est le rapport de la masse d'eau dans l'air sur la masse d'air sec. L'humidité spécifique peut aussi être appelée rapport de mélange à saturation.

$$q = \frac{0,622 \times e_a}{p - 0,387 \times e_a}$$

Où e_a est la pression partielle de vapeur d'eau et p la pression de l'air.

L'humidité spécifique à saturation vaut donc :

$$q_s = \frac{0,622 \times e_s}{p - 0,387 \times e_s}$$

La teneur en eau : représente la quantité d'eau (en pourcentage de masse ou de volume) que peut contenir un sol.

Le potentiel hydrique matriciel : traduit l'énergie, ou la force qu'il faut appliquer à un volume de sol donné pour en extraire un certain volume d'eau libre (exprimé en kPa ou en charge hydraulique, soit les cm de colonne d'eau équivalente).

ABSTRACT

Ce livrable correspond aux deux livrables initialement prévus lors de la réponse à l'appel à projet ANR : (i) D2.1 Report presenting the thermo-hydric coupling et (ii) D2.3 Report presenting the thermo-hydric coupling at the district scale. On retrouvera donc ici un état de l'art des modèles (micro-)climatiques urbains prenant en compte la végétation au deux échelles mentionnées (bâtiment et quartier), auxquelles a été ajouté des éléments concernant les modélisations effectuées à l'échelle de la ville. Ce livrable se focalise essentiellement sur les couplages thermo-hydriques et la manière dont les paramètres régissant les échanges thermiques sont liés aux variables hydriques. Il s'avère que cela concerne les caractéristiques du sol, et plus particulièrement sa conductivité thermique, sa capacité thermique et sa résistance aéraulique. Les flux thermiques dépendant de ces paramètres sont la chaleur latente au niveau de la végétation et du sol, ainsi que le flux de chaleur sensible au niveau de l'interface sol / air.

1. INTRODUCTION

Dans une revue de la littérature sur les avancées récentes réalisées en modélisation des îlots de chaleur urbains, Mirzaei (2015) identifie six axes de recherche majeurs – l’écoulement du vent en ville et les matériaux de surface, la santé et le confort, les variations spatio-temporelles de l’îlot de chaleur, le couplage des modèles, la prévision des températures de l’air, la réduction de la demande énergétique des bâtiments – et trois échelles – celle du bâtiment, celle du quartier et celle de la ville. Le bâtiment est le lieu des simulations thermiques dynamiques (STD) sur des logiciels tels que TRNSys, EnergyPlus ou ArchiWIZARD qui effectuent le bilan énergétique d’un volume de contrôle à partir de conditions climatiques extérieures. A l’échelle du quartier, les modèles microclimatiques permettent de traiter les interactions entre plusieurs bâtiments, les rues et la végétation urbaine. Ils se répartissent principalement en deux catégories : les modèles de canopée urbaine qui résolvent le bilan énergétique de la couche limite urbaine comme TEB (Masson, 2000) ou VUCM (Lee and Park, 2008), et ceux utilisant la mécanique des fluides numérique (ou CFD, pour *Computational Fluid Dynamics*) tels ENVI-met (Bruse and Fleer, 1998) et SOLENE-Microclimat (Malys et al., 2014), simulant directement les écoulements d’air mais au prix de calculs plus lourds. Enfin, la ville peut être étudiée au moyen de modèles mésoscopiques, souvent calibrés grâce à de l’imagerie par télédétection (e.g., images satellite, LIDAR). Ils permettent d’étudier l’îlot de chaleur urbain dans son intégralité mais sont dotés d’une résolution spatiale moins importante que les modèles d’énergétique du bâtiment et les modèles microclimatiques.

L’objectif de ce rapport est de réaliser un état de l’art des modèles (micro-)climatiques urbains et d’analyser la manière dont ils prennent en compte la végétation dans les bilans énergétiques. Il s’interroge particulièrement sur la manière dont les bilans hydriques et énergétiques sont couplés et comment les variables influençant ce dernier peuvent varier en fonction de l’état hydrique des sols et substrats (modification de la conductivité thermiques, de l’albédo...). Cet inventaire est présenté sur la base des 3 échelles précédemment définies (bâtiment, quartier, ville). Il se focalise particulièrement sur les couplages réalisés au niveau du bâtiment et du projet d’aménagement, échelle pertinente en regard des objectifs du projet EVNATURB, et correspondant aux livrables D2.1 « Report presenting the thermo-hydric coupling » et D2.3 « Report presenting the thermo-hydric coupling at the district scale ». A termes, ce travail doit alimenter le schéma de couplage à mettre en œuvre pour faire le lien entre les modèles Multi-Hydro et Solene-Microclimat.

La plupart des équations présentées par la suite sont à rapprochées de l’équation du bilan énergétique suivante :

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \varphi_{rad} - \varphi_{lat} - \varphi_{conv} - \varphi_{cond}$$

où T est la température du système, φ_{rad} est la densité de flux de rayonnement net, φ_{conv} est la densité de flux de chaleur sensible (convection), φ_{lat} est la densité de flux de chaleur latente, et φ_{cond} est la densité de flux de chaleur transmise par conduction

2. Modélisation à l'échelle du bâtiment

2.1. Modèle ROOFSOL

Un modèle du comportement thermique et hydrique de toitures végétalisées, couplant des modélisations de la végétation, du substrat et du support structurel, a été proposé par Del Barrio (1998) afin d'estimer le potentiel de rafraîchissement des bâtiments en été. Celui-ci met en exergue 2 problèmes significatifs liés à la modélisation de ce milieu complexe : (i) la forte hétérogénéité de la végétation (à laquelle s'ajoute celle du sol), (ii) la nature turbulente de l'air dans et au dessus de la canopée. Néanmoins, des hypothèses fortes sont faites : (i) modélisation verticale des transfert thermique (1D) en négligeant la variabilité horizontale, (ii) homogénéité verticale de la canopée. Au final le modèle repose sur les équations principales suivantes :

Bilan énergétique du sol :

$$\rho C_p(\theta, T) \frac{\partial T_s(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\lambda(\theta, T) + \Lambda D_{vT}(\theta, T_s) \right) \frac{\partial T_s(z, t)}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Où : ρ est la densité du sol, C_p la capacité thermique massique, θ la teneur en eau volumique, T_s la température du sol, $\lambda(\theta, T)$ la conductivité thermique, Λ la chaleur latente de vaporisation, D_{vT} le coefficient de diffusivité de la vapeur isotherme.

Notons que les expressions de ρC_p et λ peuvent être simplifiées pour ne dépendre que de la teneur en eau :

$$\rho C_p(\theta) = 4180(0,2 + \theta)\rho \quad (2)$$

$$\lambda(\theta) = \left[2,1 \left(\frac{\rho}{1000} \right)^{(1,2-2\theta)} e^{-0,7(\theta-0,2)^2} + \left(\frac{\rho}{1000} \right)^{(0,8+2\theta)} \right] \rho C_p(\theta) \quad (3)$$

Bilan énergétique de la végétation :

$$(\rho c)_p \cdot d \cdot LAI \frac{dT_f}{dt} = \varphi_{rad,sol} + \varphi_{rad,TIR} + \varphi_{sen,p-a} + \varphi_{trans,p-a} \quad (4)$$

Où : $(\rho c)_p$ est la capacité thermique volumique des feuilles, d l'épaisseur des feuilles, LAI l'indice foliaire, T_f la température des feuilles, $\varphi_{rad,sol}$ la radiation solaire absorbée par les feuilles, $\varphi_{rad,TIR}$ la radiation nette au niveau des feuilles, $\varphi_{sen,p-a}$ la chaleur sensible entre les feuilles et l'air de la canopée, $\varphi_{trans,p-a}$ la transpiration des feuilles calculée comme suit :

$$\varphi_{trans,p-a} = -2LAI \frac{(\rho c)_p}{\gamma(r_a + r_s)} (e_p - e_a) \quad (5)$$

Où : γ est la constante psychométrique aérodynamique (Pa.K^{-1}), e_p et e_a la pression de vapeur de la surface de la feuille et de l'air de la canopée, et r_a et r_s les résistances externe (aérodynamique) et interne (stomatique) de la canopée.

Bilan énergétique de l'air environnant :

$$(\rho c)_a \cdot L \frac{dT_a}{dt} = \varphi_{sen,a-p} + \varphi_{sen,a-g} + \varphi_{sen,a-\infty} \quad (6)$$

Où : $(\rho c)_a$ est la capacité thermique volumique de l'air, L l'épaisseur de la canopée, T_a la température de l'air, $\varphi_{sen,a-p}$ la chaleur sensible entre l'air de la canopée et les feuilles, $\varphi_{sen,a-g}$

la chaleur sensible entre l'air de la canopée et le sol, $\varphi_{sen,a-\infty}$ la chaleur sensible entre l'air de la canopée et l'air extérieur.

Bilan de vapeur de la végétation :

$$\rho_a \cdot L \frac{dq_a}{dt} = \varphi_{vap,a-p} + \varphi_{vap,a-g} + \varphi_{vap,a-\infty} \quad (7)$$

Où : ρ_a est la densité de l'air (kg.m^{-3}), q_a l'humidité spécifique de l'air, $\varphi_{vap,a-p}$ le flux de vapeur entre l'air de la canopée et les feuilles, $\varphi_{vap,a-g}$ le flux de vapeur entre l'air de la canopée et le sol, $\varphi_{vap,a-\infty}$ le flux de vapeur entre l'air de la canopée et l'air extérieur.

Des études de sensibilité ont permis d'identifier les paramètres du modèle influant sur le flux thermique à travers le toit : le rayonnement solaire transmis par la végétation (dépendant de l'indice foliaire et de l'angle fait par les feuilles avec l'horizontale), l'épaisseur de la couche de substrat, sa densité apparente et sa teneur en eau. La toiture végétalisée modélisée est donc efficace pour la thermique du bâtiment par ses fonctions d'ombrage et d'isolation. L'inertie thermique apportée par la toiture végétalisée n'est pas discutée mais le décalage de la réponse temporelle du système est visible sur les graphiques. Malheureusement, l'état thermique et hydrique de la canopée elle-même est peu analysé. La canopée étant représentée comme une couche homogène, l'air entre le feuillage et le sol est caractérisé par une valeur de température et d'humidité, le feuillage par une valeur de température. La résistance stomatique de la végétation joue un rôle important sur la température du feuillage (une augmentation de 4 K à midi est obtenue lorsque cette résistance est multipliée par 4) mais influence faiblement la température de l'air au sein de la canopée car cette dernière est supposée très ventilée (le taux de renouvellement de l'air vaut $R=1000\text{ach}$). Ce point montre que des études aérauliques sont nécessaires pour bien simuler les effets de la végétation sur le microclimat.

2.2. Autre Modèle 1-D

Alexandri and Jones (2007) ont également proposé un modèle 1D de transfert thermique et massique au sein d'une toiture végétalisée en distinguant 4 milieux (structure, sol, canopée, et air). La température du sol (mélange substrat-eau-air) T_s obéit à une loi de conduction de la chaleur où la conductivité thermique varie en fonction de la teneur en eau :

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{1}{\rho_g C_p} \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \quad (8)$$

$$\lambda_s = \max \left\{ 418 \exp(-\log_{10} |\psi| - 2.7), 0.172 \right\} \quad (9)$$

avec ρ_g la densité du sol, C_p la capacité thermique massique du sol, λ_s la conductivité thermique du sol et ψ le potentiel hydrique du sol. Ce dernier vaut :

$$\psi = \psi_s \left(\frac{\theta_{g,s}}{\theta_g} \right)^b \quad (10)$$

avec ψ_s le potentiel hydrique du sol saturé en eau, θ_g la teneur en eau volumique du sol, $\theta_{g,s}$ la teneur en eau volumique à saturation et b un coefficient dépendant du type de sol. La capacité thermique massique du sol varie également selon son contenu en eau :

$$\rho_g C_p = (1 - \theta_{g,s}) \rho_s c_{p,s} + \theta_g \rho_w c_{p,w} \quad (11)$$

où l'indice s désigne les propriétés du substrat solide et w celles de l'eau liquide. Le transfert de masse dans le sol est modélisé par l'équation :

$$\frac{d\theta_g}{dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_g \left(\frac{\partial \psi_p}{\partial z} + 1 \right) \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_g \frac{\partial \theta_g}{\partial z} + K_g \right) \quad (12)$$

$$\text{avec } K_g = K_{g,s} \left(\frac{\theta_g}{\theta_{g,s}} \right)^{2b+3} \quad (13)$$

$$\text{et } D_g = - \frac{b K_{g,s} \psi_{p,s}}{\theta_{g,s}} \left(\frac{\theta_g}{\theta_{g,s}} \right)^{b+2} \quad (14)$$

avec $K_{g,s}$ la conductivité hydraulique à saturation et b un coefficient.

La teneur en eau du sol a également une influence sur la transpiration des feuilles via la résistance stomatique de la canopée, r_s :

$$\varphi_{trans} = \frac{\rho C_{pa}}{\gamma} \frac{e_s(T_f) - e_a}{r_a + r_s} \quad (15)$$

$$r_s = \frac{1}{0,5 \times LAI} r_c \left[\frac{\varphi_{rad,max}}{0.03 \varphi_{rad,max} + \varphi_{rad}} + P + \left(\frac{\theta_{wilt}}{\theta_{root}} \right)^2 \right] \quad (16)$$

Où : $e_f(T_f)$ est la pression de vapeur à la surface de la feuille, e_a est la pression de vapeur d'eau dans l'air, LAI l'indice de surface foliaire, r_c une résistance dépendant du type de plante (en $s.m^{-1}$), $\varphi_{rad,max}$ le rayonnement solaire à midi par temps clair, φ_{rad} le rayonnement solaire, P un paramètre fonction de la saison, θ_{wilt} la teneur en eau du sol en-deçà de laquelle la plante flétrit (point de flétrissement) et θ_{root} la valeur minimale de la teneur en eau près des racines de la plante (prise égale à la valeur minimale de θ_g).

Le modèle a été mis en œuvre sur deux prototypes instrumentés (béton et toiture végétalisée) sur lesquels les températures et humidités relatives ont été comparées. La résistance

stomatique (Eq. $r_s = \frac{1}{0,5 \times LAI} r_c \left[\frac{\varphi_{rad,max}}{0.03 \varphi_{rad,max} + \varphi_{rad}} + P + \left(\frac{\theta_{wilt}}{\theta_{root}} \right)^2 \right]$ (16)) a aussi été comparée à

des mesures effectuées à l'aide d'un poromètre. Les résultats se sont montrés satisfaisants et ont démontré la nécessité de prendre en compte la diffusion thermique dans le calcul de la température de l'air au-dessus des surfaces instrumentées.

2.3. Modèle EnergyPlus

Le modèle de toiture végétalisée de Sailor (2008) a été conçu comme un module du logiciel de simulation thermique dynamique EnergyPlus. Il sert à évaluer l'effet de la toiture sur la consommation énergétique du bâtiment. Deux bilans énergétiques sont écrits, l'un pour le sol et l'autre pour le feuillage, suivant le modèle FASST (Fast All Season Soil Strength) développé par l'USACE (Frankenstein and Koenig, 2004).

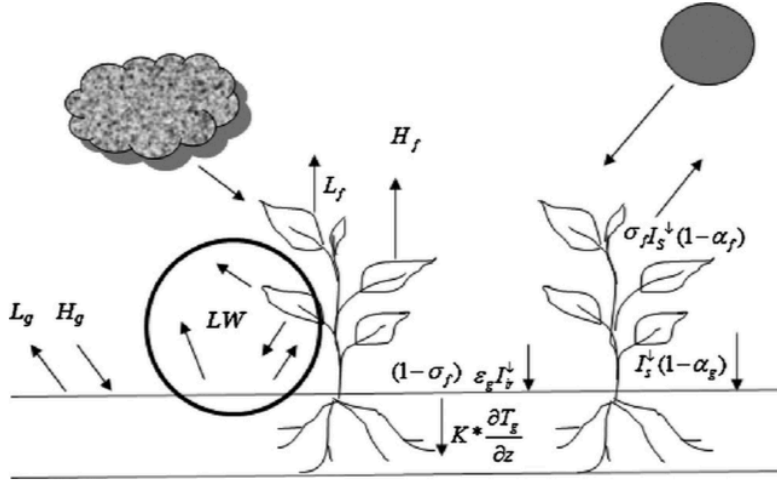


Figure 1. Bilan énergétique d'une toiture végétalisée incluant le flux de chaleur latente ($L=\phi_{lat}$), le flux de chaleur sensible ($H=\phi_{sen}$), la radiation d'onde courte ($I_s=\phi_{rad,sw}$), la radiation incidente grande onde ($I_{ir}=\phi_{rad,lw}$) et les échanges de radiation grande onde (LW). (Sailor, 2008)

L'état hydrique du sol affecte le flux de chaleur latente de ces deux bilans via q_{af} :

$$\phi_{lat} = LAI \times \Lambda_f \rho_{af} C_f v_{af} r'' (q_{af} - q_{f,sat}) \quad (17)$$

$$\phi_{cond} = \Lambda_g \rho_{ag} C_{e,g} V_{a,f} (q_{af} - q_g) \quad (18)$$

$$q_{af} = \frac{(1 - \sigma_f) q_a + \sigma_f (0.3 q_a + 0.6 q_{f,sat} r'' + 0.1 q_{g,sat} \theta_g)}{1 - \sigma_f [0.6 (1 - r'') + 0.1 (1 - \theta_g)]} \quad (19)$$

$$q_g = \theta_g q_{g,sat} + (1 - \theta_g) q_{af} \quad (20)$$

Où : ϕ_{lat} et ϕ_{cond} sont les flux de chaleur latente du feuillage et de conduction dans le sol, Λ_f et Λ_g les chaleurs latente de vaporisation aux températures des feuilles et du sol, $V_{a,f}$ la vitesse de vent dans les feuilles, C_f et $C_{e,g}$ les coefficients de transfert massique des feuilles et du sol, ρ_{af} et ρ_{ag} les densités de l'air près des feuilles et du sol, r'' un facteur d'humidité de la surface du feuillage qui dépend des résistances stomatique et aérodynamique ($r'' = r_a / (r_a + r_s)$), q_a le rapport de mélange (masse de vapeur d'eau sur masse d'air sec dans un volume donné) de l'air, q_{af} le rapport de mélange de l'air dans la canopée, q_g le rapport de mélange de l'air au niveau du sol, $q_{f,sat}$ le rapport de mélange de l'air saturé à la température du feuillage (humidité spécifique), $q_{g,sat}$ le rapport de mélange de l'air saturé à la température du sol (humidité spécifique), σ_f le pourcentage de couverture végétale, θ_g la teneur en eau volumétrique.

L'albédo (relation linéaire entre les valeurs extrêmes), la conductivité thermique, la capacité thermique et la densité du sol varient également selon l'état hydrique du sol (non explicité). Le grand nombre de paramètres nécessaires à la mise en œuvre du modèle n'a pas permis une validation stricto sensu. Les simulations ont toutefois été comparées à des mesures de températures de surface réalisées sur une toiture instrumentée. Celles-ci ont montré la bonne capacité du modèle à reproduire les cycles diurnes et saisonniers avec néanmoins un biais de l'ordre de 3°C.

3. Modélisation à l'échelle du quartier

3.1. Modèles VUCM

Le modèle Vegetated Urban Canopy Model (VUCM) est un modèle de type canopée urbaine (aussi appelé « canyon ») qui limite la représentation de l'espace urbain à des surfaces imperméables (route) et naturelles (sol et végétation) entourées par 2 façades d'immeubles (Lee and Park, 2008).

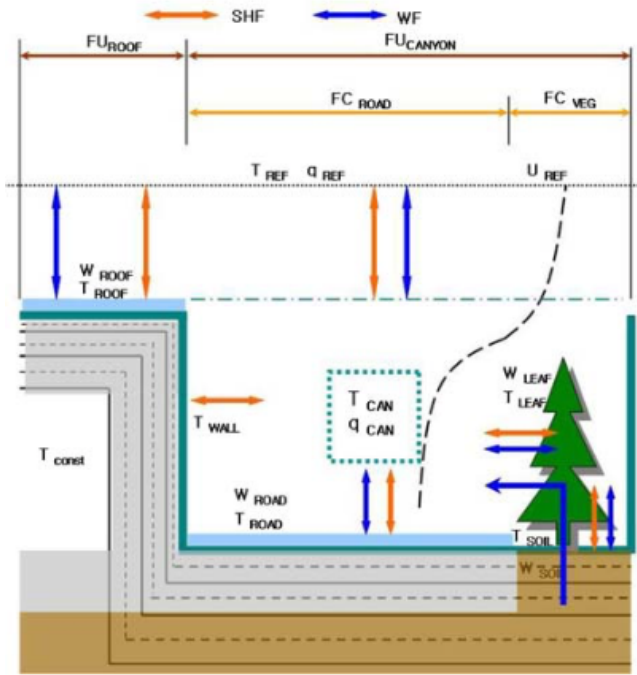


Figure 2. Représentation des échanges thermiques dans VUCM (Lee and Park, 2008)

Le sol naturel et la végétation échangent avec l'air du canyon à travers des flux de chaleur sensibles et latentes détaillés ci-dessous.

Végétation :

$$\varphi_{sen,f} = \rho C_p \frac{T_a - T_f}{r_a} LAI \quad (21)$$

$$\varphi_{evap,f} = \sigma_w \rho \frac{q_{sat}(T_f) - q_c}{r_a} LAI \quad (22)$$

$$\varphi_{trans,f} = (1 - \sigma_w) \rho \frac{q_{sat}(T_f) - q_c}{r_a + r_s} LAI \quad (23)$$

Où φ_{sen} , $\varphi_{evap,f}$ et $\varphi_{trans,f}$ sont les flux de chaleur sensible, d'évaporation et de transpiration, C_p la capacité spécifique de l'air, ρ la densité de l'air, T_a la température de l'air, T_f la température des feuilles, σ_w la fraction de surface de feuille mouillée, $q_{sat}(T_f)$ l'humidité spécifique à saturation, q_c l'humidité spécifique de l'air du canyon, r_a la résistance de la surface des feuilles aux flux turbulents (dépend de la vitesse du vent, de la température et de LAI), r_s la résistance stomatique.

Sol :

$$\varphi_{sen,s} = \rho C_p \frac{T_s - T_l}{r_d} \quad (24)$$

$$\varphi_{lat,s} = \rho \frac{q_s^* - q_c}{r_d} \quad (25)$$

Où T_s est la température du sol, r_d la résistance aérodynamique de surface et q_s^* l'humidité spécifique effective du sol définie comme suit :

$$q_s^* = \beta q_s + (1 - \beta) q_c \quad (26)$$

Où :

$$q_s = \exp\left(\frac{g \Psi_s}{R_v T_s}\right) q_{sat}(T_s) \quad (27)$$

$$\beta = 0,25 \left(1 - \cos \left(\min \left[1, \frac{\theta_s}{\theta_{fc}} \right] \pi \right) \right)^2 \quad (28)$$

Avec : q_s l'humidité spécifique du sol en surface, β un coefficient de pondération, g la constante gravitationnelle, Ψ_s le potentiel hydrique du sol saturé en surface (paramètre fixé), R_v la constante de gaz de la vapeur d'eau, $q_{sat}(T_s)$ l'humidité spécifique à saturation du sol, θ_s la teneur en eau du sol, θ_{fc} la teneur en eau de la capacité au champ.

Notons que la conductivité thermique du sol est aussi dépendante de la teneur en eau via le potentiel hydrique comme présenté au-dessus (Eq. $\lambda_s = \max \{ 418 \exp(-\log_{10} |\psi| - 2.7), 0.172 \}$ (9)). Le modèle a été testé sur différents sites expérimentaux et ses simulations comparées à des températures de surface (sol et mur). Ces résultats satisfaisants ont montré qu'un paramétrage approprié de la végétation du canyon est un préalable nécessaire à une modélisation urbaine réaliste.

3.2. Modèles SURFEX et TEB

La plateforme de modélisation SURFEX (pour SURface EXternalisée) développée par Météo-France, utilise aussi une approche par tuiles. Les quatre types de surface (nature, ville, mer et lac) occupant la tuile sont paramétrés différemment. SURFEX permet de coupler, en particulier, les modèles ISBA (Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère) de Noilhan and Planton (1989) et TEB (*Town Energy Balance*) de Masson (2000) dédiés aux surfaces continentales et urbanisées, respectivement. Cependant, la géométrie urbaine standard adoptée par TEB est une rue canyon (approche de type canopée urbaine) totalement minérale constituée de deux bâtiments identiques se faisant face (cf. Figure 3). Une zone urbaine hétérogène, comme une rue bordée d'arbres, est donc représentée par une tuile dont une fraction (ville) est modélisée par TEB d'un côté et dont la fraction restante (nature) est modélisée par ISBA de l'autre. Les valeurs calculées par chacun des modèles sont ensuite agrégées dans SURFEX. Cette approche empêche certaines interactions physiques : par exemple, les arbres ne sont pas soumis aux conditions de rayonnement, vent, température et humidité dues à la géométrie de la rue. Afin de raffiner la modélisation de l'hétérogénéité de la ville à petite échelle, la végétation urbaine a été directement intégrée dans le schéma TEB-Veg (Lemonsu et al., 2012), qui fait appel au modèle ISBA en interne. L'évapotranspiration

suit la loi de Dalton modifiée par le coefficient de Halstead (Eq. $H_V = \frac{r_a + \sigma_w r_s}{r_a + r_s}$ (30)), indiquant l'humidité relative de la végétation (Noilhan and Planton, 1989). Le schéma TEB-Veg, testé sur les données expérimentales de Shashua-Bar et al. (2009), aboutit à une meilleure représentation du microclimat. Il doit être enrichi d'autres types de végétation urbaine (arbres, murs et toits végétalisés).

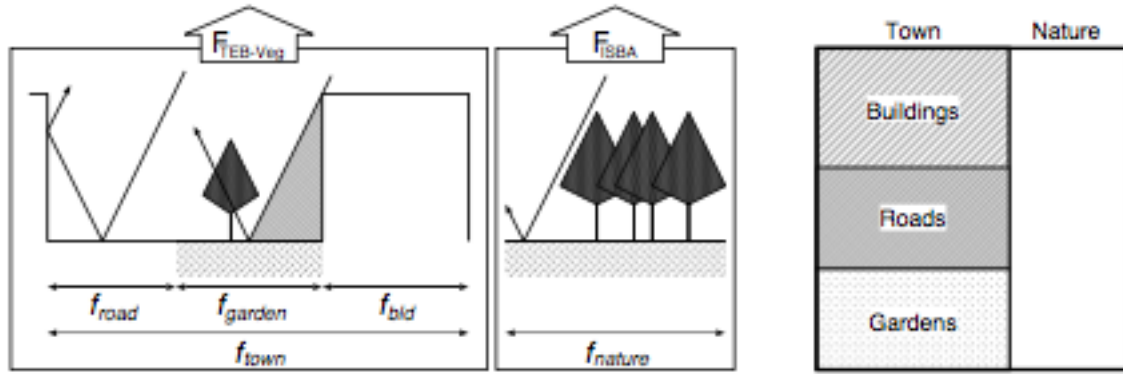


Figure 3. Représentation du canyon urbain dans TEB-Veg (Lemonsu et al., 2012)

Lors de ses travaux de thèse, De Munck (2013) a développé un module de TEB spécifiquement dédié à la représentation des toitures végétalisées. Celui-ci avait pour objectif de modéliser les échanges de flux d'eau et de chaleur entre la végétation et l'atmosphère. Testé sur une toiture végétalisée instrumentée de Nancy, ce module TEB-GREENROOF a montré des résultats plutôt satisfaisants avec néanmoins une sous-estimation de la teneur en eau du substrat et une surestimation des températures de surface. En détails, le flux d'évapotranspiration issu du modèle de surface ISBA-DF (Boone et al., 2000; Noilhan and Planton, 1989), comprend trois composants : (i) la transpiration des plantes (φ_{trans}), (ii) l'évaporation du sol (φ_{evap}), et (iii) l'évaporation de l'eau interceptée par les feuilles (φ_{evf}).

Le premier terme peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\varphi_{trans} = F_{veg} \rho_a C_H V_a H_V (VPD) \quad (29)$$

où F_{veg} représente la fraction de végétation recouvrant le sol, ρ_a la densité de l'air, C_H le coefficient d'échange turbulent, V_a la vitesse du vent, H_V le coefficient de Halstead, et VPD le déficit de pression de vapeur. Ces deux derniers termes s'expriment de la manière suivante :

$$H_V = \frac{r_a + \sigma_w r_s}{r_a + r_s} \quad (30)$$

$$VPD = q_{sat}(T_s) - q_a \quad (31)$$

où r_a et r_s représentent les résistances aérodynamique et stomatique, σ_w la proportion du feuillage recouvert d'eau de pluie interceptée, $q_{sat}(T_s)$ l'humidité spécifique de l'air à saturation et q l'humidité spécifique de l'air autour des plantes.

Une partie du couplage thermo-hydrigue se matérialise au niveau du calcul de la résistance stomatique qui doit tenir compte de l'état hydrique du substrat :

$$r_s = \frac{r_{smin}}{LAI} \frac{F_1}{F_2 F_3 F_4} \quad (32)$$

où r_{smin} représente la résistance stomatique minimum de la végétation, F_1 , F_3 et F_4 des paramètres faisant respectivement état de l'influence du rayonnement photosynthétique actif,

de la température et du déficit de pression de vapeur sur l'évapotranspiration. C'est le paramètre F_2 qui tient compte de la variation de la teneur en eau dans le substrat :

$$F_2(t) = \frac{\theta(t) - \theta_{wilt}}{\theta_{fc} - \theta_{wilt}} \quad (33)$$

Où $\theta(t)$ est la teneur en eau à l'instant t , θ_{wilt} et θ_{fc} les teneurs en eau au point de flétrissement et à la capacité au champ (capacité de rétention maximale du sol).

Le second terme lié à l'évaporation du sol s'écrit de la manière suivante :

$$\varphi_{evap} = (1 - F_{veg}) \rho_a C_H V_a (H_u q_{sat}(T_s) - q_a) \quad (34)$$

Où : F_{veg} est la fraction de végétation, ρ_a la densité de l'air, V_a la vitesse de l'air, C_H le coefficient de trainée, $q_{sat}(T_s)$ l'humidité spécifique à saturation du sol, q_a l'humidité spécifique de l'air, H_u représente l'humidité relative de la surface du sol et s'exprime :

$$H_u(t) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{\theta(t)}{\theta_{fc}} \pi \right) \right], \quad si \quad \theta(t) < \theta_{fc} \quad (35)$$

$$H_u(t) = 1 \quad si \quad \theta(t) \geq \theta_{fc}$$

Notons que ce modèle a encore été amélioré par la suite pour représenter explicitement les arbres de rue et leurs impacts sur les transferts radiatifs, énergétiques, et aérauliques (Redon et al., 2017).

Le couplage thermo-hydrique est aussi effectif au niveau des caractéristiques thermiques du sol qui peuvent évoluer en fonction de la teneur en eau. C'est particulièrement le cas de la capacité et conductivité thermiques effectives (sur le même schéma que Eq. $\lambda_s = \max \{ 418 \exp(-\log_{10} |\psi| - 2.7), 0.172 \}$ (9)).

Suter et al. (2017) ont utilisé TEB afin d'estimer le rafraîchissement évaporatif produit par des toits végétalisés, l'albédo des toitures restant inchangé et l'évapotranspiration de la végétation étant modélisée par la formule de Penman-Monteith. La structure du modèle a été modifiée pour mieux tenir compte de l'impact des toitures végétalisées sur les températures au dessus du canyon. Ainsi une nouvelle couche a été ajoutée entre l'atmosphère et la rue (Figure 4).

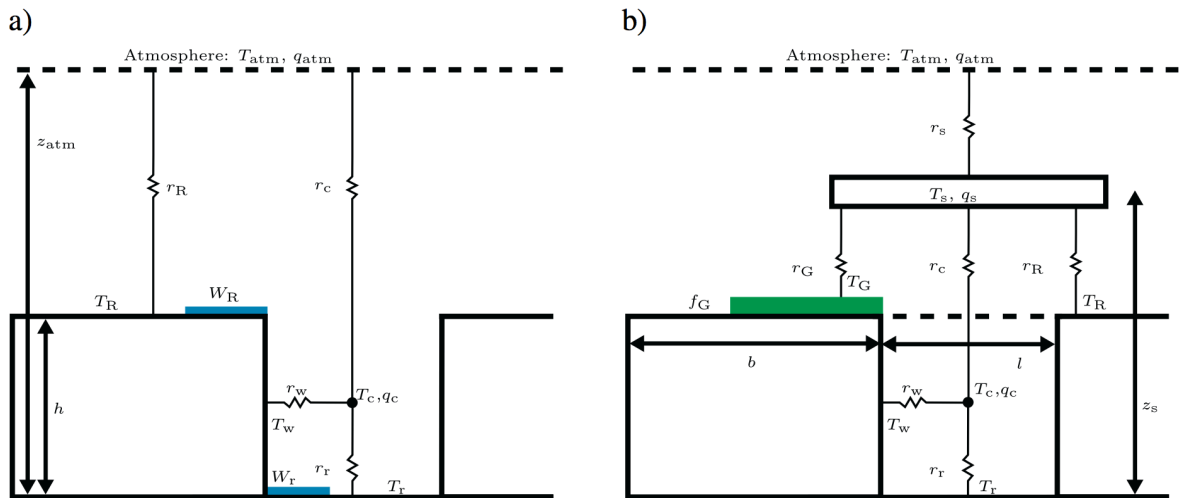


Figure 4. Modification de la schématisation TEB par Suter et al. (2017)

Leurs simulations indiquent une relation linéaire entre la baisse de température de l'air et le flux moyen de chaleur latente $\bar{E}$ (en W.m^{-2}) :

$$\Delta T_s = -0,014 \cdot \Delta \bar{E} \quad (36)$$

Pour la comparer à des taux de précipitations, cette relation peut s'écrire en fonction de la colonne d'eau évaporée mmW (en mm.jr^{-1}) :

$$\Delta T_s = -0,35 \cdot mmW \quad (37)$$

Une expression analytique du potentiel de rafraîchissement évaporatif, le coefficient de proportionnalité entre la température et le flux de chaleur latente, montre que le terme dominant est la résistance de surface (r_s dans la formule de Penman-Monteith, cf. Eq(38)).

3.3. Modèle SOLENE-Microclimat

SOLENE-Microclimat est un modèle développé par le laboratoire CRENAU à L'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes. Adapté pour réaliser des simulations de microclimat à l'échelle du quartier, il permet de représenter la complexité de l'environnement étudié en 3 dimensions. Il comprend un modèle radiatif, un modèle de thermique du bâtiment ainsi qu'un modèle thermo-aérodynamique de type CFD (Code Saturne), et des outils de couplage assurant les interactions et rétroactions entre ces différents composants.

Afin d'analyser l'effet de la végétation sur le microclimat urbain et sur la consommation énergétique des bâtiments, Malys et al. (2014) y ont ajouté un modèle de façade végétalisée. Comparées aux toits végétalisés, les murs végétalisés possèdent une capacité de rétention d'eau plus faible mais influencent directement les échanges radiatifs et thermiques des canyons urbains. Le modèle se fonde sur les bilans énergétiques du feuillage, du substrat et de l'air présent dans la couche de feuillage afin de calculer leurs températures respectives. La végétation est considérée comme suffisamment irriguée pour pouvoir utiliser la formule d'évapotranspiration potentielle de Penman-Monteith :

$$ETP = \frac{R_n \Delta + \rho_a \cdot c_p \cdot \frac{e_s - e_a}{r_a}}{L \left(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right)} \quad (38)$$

Où : R_n est le rayonnement net (en W.m^{-2}), L la chaleur de vaporisation de l'eau (en J.kg^{-1}), e_s la pression saturante (en Pa) calculée en fonction de la température de l'air T_a (cf

eq. $e_s(T_a) = 610,7 \left[1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{T_a}{3}\right) \right]^{8,827}$ (39), e_a la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (en

Pa), Δ la pente de la courbe de pression de vapeur saturante (en Pa.K^{-1}) (cf

eq. $\Delta = 44,352 \cos\left(\frac{T_a}{3}\right) \left[1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{T_a}{3}\right) \right]^{7,827}$ (40), γ la constante psychrométrique ($\sim 0,059 \text{ kPa.K}^{-1}$),

r_a la résistance aérodynamique du couvert (en s.m^{-1}) et r_s la résistance stomatique (en s.m^{-1}).

$$e_s(T_a) = 610,7 \left[1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{T_a}{3}\right) \right]^{8,827} \quad (39)$$

$$\Delta = 44,352 \cos\left(\frac{T_a}{3}\right) \left[1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{T_a}{3}\right) \right]^{7,827} \quad (40)$$

Les résistances aérodynamique et stomatique sont déterminées à l'aide des formules de la FAO (Allen et al., 1998) :

$$r_a = \frac{1}{\kappa^2 V_a} \ln \left[\frac{z_m - d}{z_0} \right]^2 \quad (41)$$

$$r_s = \frac{r_f}{0,5 \cdot LAI} \quad (42)$$

avec κ la constante de Von Karman (0,41), V_a la vitesse de vent (en m.s⁻¹), z_m la hauteur référence pour la vitesse, z_0 la hauteur de rugosité, d la hauteur de déplacement, r_f la résistance stomatique d'une feuille isolée (100 s.m⁻¹) et LAI l'indice de surface foliaire.

Cette formulation de l'évapotranspiration potentielle repose sur deux hypothèses fortes : (i) elle ne fait pas de différence entre l'eau transpirée par les feuilles et l'eau évaporée par le sol, (ii) elle ne tient pas compte du stress hydrique de la végétation, les conditions d'irrigation sont considérées idéales. Pour pallier ces défauts, deux ratios ont été ajoutés pour pondérer les valeurs d'ETP : α_{lat} qui correspond à la part d'évapotranspiration des plantes et f qui représente la disponibilité en eau. Ce dernier paramètre peut varier entre 0 (absence d'eau) et des valeurs supérieures à 1 après un événement pluvieux. Au final, les flux de chaleur latente calculés pour la végétation (feuilles) et le substrat de la façade sont :

$$\varphi_{lat,f} = \alpha_{lat} \cdot f \cdot ETP \quad (43)$$

$$\varphi_{lat,se} = (1 - \alpha_{lat}) \cdot f \cdot ETP \quad (44)$$

Ces calculs dépendent donc des variables climatiques suivantes : R_n (rayonnement solaire et infrarouge + émis par les feuilles et fonction de leur température), T_a , q_a (l'humidité spécifique de l'air en lien avec e_a) et v .

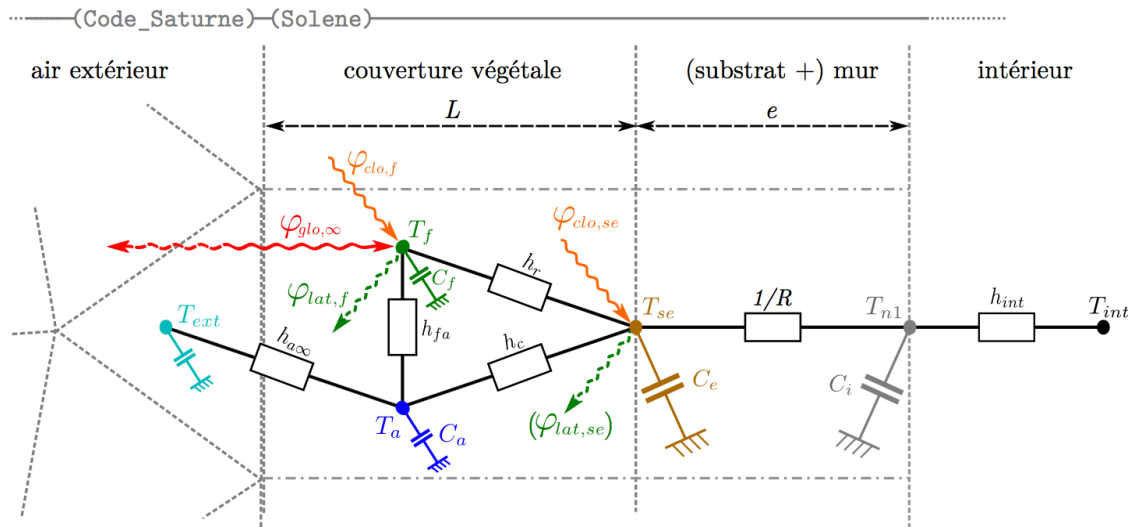


Figure 5. Modèle de façade végétale (Malys, 2012)

Ces deux valeurs de chaleur latente $\varphi_{lat,f}$ et $\varphi_{lat,se}$ sont introduites dans les bilans énergétiques de la canopée et de la façade. Dans SOLENE-Microclimat, ces bilans sont réalisés par facette. Deux nœuds thermiques ont donc été ajoutés par facette dans le modèle thermique tenant compte de la végétation des façades : un pour la végétation et un pour l'air au sein des feuilles (cf. Figure Figure 5). Cela implique le calcul de deux températures supplémentaires : T_f la température de la facette (feuille) dans le modèle radiatif (échanges infrarouges) et T_a la température de l'air fixée aux surfaces extérieures du modèle aéraulique.

Ainsi au niveau des feuilles, le bilan énergétique s'écrit :

$$C_f \frac{dT_f}{dt} = \varphi_{clo,f} + \varphi_{glo,\infty} + \varphi_{glo,se} + \varphi_{conv,f-a} + \varphi_{lat,f} \quad (45)$$

où :

$C_f \frac{dT_f}{dt}$ représente la variation d'énergie thermique stockée par les feuilles à la température T_f et dont la masse thermique est exprimée en fonction de celle de l'eau, d'une épaisseur moyenne de feuille d et du LAI : $C_f = (\rho \cdot c_p)_{eau} \cdot d \cdot LAI$, $\varphi_{clo,f}$ est le rayonnement solaire absorbé par les feuilles, $\varphi_{glo,\infty}$ est le flux radiatif infrarouge, $\varphi_{glo,se}$ est le flux radiatif entre les feuilles et le support, $\varphi_{conv,f-a}$ est le flux thermique transmis par convection entre les feuilles et l'air.

On a un bilan énergétique similaire au niveau du substrat (surface extérieure de la façade) :

$$C_e \frac{dT_{se}}{dt} = \varphi_{clo,se} - \varphi_{glo,se} - \varphi_{conv,se-a} + \varphi_{cond,se-n1} - \varphi_{lat,se} \quad (46)$$

où : $C_e \frac{dT_{se}}{dt}$ représente la variation d'énergie thermique stockée par la paroi recouverte de substrat dont la capacité de stockage C_e peut être fonction de la teneur en eau de celui-ci, $\varphi_{clo,se}$ est le rayonnement solaire absorbé par le substrat du mur, $\varphi_{conv,se-a}$ est le flux échangé par convection entre l'air et le substrat, $\varphi_{cond,se-n1}$ est le flux conduit à travers la paroi.

En plus des variables météorologiques précédemment citées, cette modélisation repose sur de nombreux paramètres : d , r_f , LAI , L , ρ_f et k_s (coefficient de réflexion des feuilles et d'extinction utilisés pour le calcul de $\varphi_{clo,f}$), α_{lat} , f , λ (résistance thermique de la paroi) et h_c (coefficient d'échange superficiel entre l'air et le substrat). Ces deux derniers paramètres n'étant pas constant dans le temps, ils peuvent évoluer en fonction de la vitesse du vent et de l'état hydrique du substrat (pas pris en compte ici).

L'approche adoptée a été validée par des données expérimentales sur des prototypes de 1 m² instrumentés (température de surface, données climatiques, mesure de l'évapotranspiration par pesée, de l'irrigation et du drainage). En vue d'améliorer le modèle, les auteurs de l'étude conseillent d'avoir un suivi plus précis du bilan hydrique – en particulier de l'évapotranspiration –, de mesurer des structures réelles plutôt que des échantillons isolés et d'étendre la base de données à d'autres contextes climatiques. Le schéma de modélisation initialement développé pour les façades végétalisées a ensuite été étendue aux toitures végétalisées et aux pelouses (Musy et al., 2017). Mis en œuvre sur un quartier nantais, SOLENE-microclimat a été utilisé pour évaluer l'impact d'une végétalisation sur le confort thermique des bâtiments.

Par ailleurs, SOLENE-microclimat a également été enrichi d'un modèle d'humidification/arrosage de la chaussée afin de jauger l'efficacité de cette technique lors de vagues de chaleur (Azam et al., 2018). Suite à l'arrosage d'une surface, deux mécanismes successifs sont considérés : dans un premier temps, l'échange de chaleur par convection entre la surface et l'eau ruisselée ; dans un second temps, l'évaporation d'eau vers l'atmosphère, modélisée par la loi de Dalton. La surface étant considérée imperméable, les phénomènes d'infiltration ne sont pas pris en compte. Les données expérimentales du programme ROSURE/Hydroville (Cohard et al., 2018), obtenues sur un parking asphalté de 2500m²,

servent à calibrer et évaluer le modèle. Sur ce jeu de données, le flux de chaleur échangée par ruissellement est estimé à un quart du flux de chaleur latente.

3.4. Modèle ENVI-met

Le modèle ENVI-met, mis au point par Bruse and Fleer (1998), vise à simuler les interactions entre les bâtiments, la végétation et l'atmosphère. Il est dédié à la simulation du microclimat à l'échelle du quartier : la résolution spatiale horizontale est de l'ordre du mètre et la durée d'analyse courte (typiquement, de 24 à 48 heures avec un pas de temps de quelques secondes). Il permet en particulier d'étudier l'influence de la morphologie et de la végétation urbaines sur le champ de température et de vent de la zone considérée. ENVI-met combine un modèle atmosphérique 3D basé sur les équations de Navier-Stokes, un modèle de sol 1D et un modèle de végétation dans lequel le flux d'évapotranspiration suit une loi de Dalton modifiée par des résistances aérodynamique et stomatique. Celui-ci repose sur un schéma de modélisation détaillé dans Bruse et Fleer (1998). Le bilan énergétique est résolu à l'échelle de la feuille dont la capacité de stockage de chaleur est négligée :

$$0 = \varphi_{rad,sol}(z) + \varphi_{rad,TIR}(z) - \varphi_{sen,f} - \varphi_{evap,f} - \varphi_{trans,f} \quad (47)$$

Où $\varphi_{rad,sol}(z)$ et $\varphi_{rad,TIR}(z)$ sont les rayonnements solaire et infrarouge nets, C_p la capacité spécifique de l'air, ρ la densité de l'air et Λ la chaleur latente de vaporisation, $\varphi_{sen,f}$, $\varphi_{evap,f}$, et $\varphi_{trans,f}$ les flux convectif, d'évaporation et de transpiration détaillés ci-dessous.

$$\varphi_{sen,f} = \rho C_p \times 1.1 \frac{(T_f - T_a)}{r_a} \quad (48)$$

$$\varphi_{evap,f} = \rho \Lambda \left(\frac{\Delta q \delta_c f_w}{r_a} + \frac{(1 - \delta_c) \Delta q}{r_a} \right) \quad (49)$$

$$\varphi_{trans,f} = \rho \Lambda \left(\frac{\delta_c (1 - f_w) \Delta q}{(r_a + r_s)} \right) \quad (50)$$

Où T_a et q_a sont la température et l'humidité spécifique de l'air, $\Delta q = q^*(T_a) - q_a$ la différence d'humidité, T_f la température des feuilles, r_a la résistance dynamique, δ_c un indice valant 1 si il y a évapotranspiration et 0 sinon, f_w la fraction de feuilles mouillées, r_s la résistance stomatique.

Les flux convectif et latent sont ensuite introduits comme termes source dans le modèle atmosphérique :

$$\Phi_{sen}(z) = LAD(z) \varphi_{sen,f} \quad (51)$$

$$\Phi_{lat}(z) = LAD(z) (\varphi_{evap,f} + \varphi_{trans,f}) \quad (52)$$

Où $LAD(z)$ est la densité de feuille à l'altitude z

La quantité d'eau transpirée par les plantes est ensuite déduite de la teneur en eau dans le sol. Notons qu'à l'instar des modèles précédemment présentés, la conductivité thermique du sol dépend de la teneur en eau suivant (cf. Eq(3)).

Un cas d'étude – un îlot standard modifié par l'ajout d'un parc – montre que le champ de température dépend fortement des écoulements autour des bâtiments et qu'il ne peut être déduit simplement de la modification paysagère apportée. Parmi les limitations d'ENVI-met, on peut citer certains paramètres à fixer en entrée du modèle, tels que des conditions atmosphériques non modifiables (rayonnement solaire) ou constantes (vitesse et direction du vent) pour toute la durée de la simulation (Liu et al., 2018), ainsi qu'une valeur de température intérieure des bâtiments unique (Ambrosini et al., 2014), ce qui empêche une interaction entre le bâti et l'atmosphère en ce qui concerne la température de l'air. Ambrosini et al. (2014) notent également une limitation importante sur la géométrie des bâtiments (lignes droites et perpendiculaires) et l'impossibilité de modéliser des murs végétalisés tandis que Toparlar et al. (2017) regrettent l'utilisation d'un seul modèle de turbulence et les options limitées de génération du maillage.

L'effet de la végétation sur la température de l'air a été étudié par Dimoudi and Nikolopoulou (2003) par le biais d'un modèle basique de la physiologie des plantes. La transpiration végétale est représentée par la donnée d'un coefficient de culture et d'une évapotranspiration de référence, dépendant de la température de l'air et du rayonnement solaire absorbé. La géométrie 3D analysée est celle d'un environnement urbain générique : un parc carré entouré de huit immeubles identiques. L'influence de différents paramètres d'entrée (dimensions des bâtiments et du parc, vitesse et direction du vent, température de l'air, type de végétation, etc.) sur le champ de températures résultant est ensuite étudiée au moyen du logiciel de CFD PHOENICS. La température du parc et de la rue adjacente sous le vent est réduite du fait de la présence de végétation, le parc étant modélisé par un puits d'enthalpie. Dans ces zones, la tendance observée est une réduction de la température moyenne de l'ordre de 1 K pour 100 m² de végétation ajoutés au parc, avec les conditions climatiques et la configuration urbaine choisies.

3.5. Modèle OpenFOAM

OpenFOAM (pour *Open Source Field Operation and Manipulation*) est un logiciel de simulation multi-physiques développé à l'origine à l'Imperial College de Londres pour résoudre des problèmes de mécanique des milieux continus par la méthode des volumes finis (Weller et al., 1998). Il est distribué librement depuis 2004 sous forme d'une boîte à outils programmable en C++, constituée de bibliothèques (outils de pré et post-traitement, modèles de turbulence, schémas numériques...) et d'applications (solveurs spécifiques, utilitaires de visualisation, de maillage...).

Il a été utilisé récemment par Manickathan et al. (2018) pour étudier le rafraîchissement par évaporation et par ombrage qu'un arbre peut fournir, en vue de lutter contre les îlots de chaleur urbains et d'améliorer le confort humain. Le modèle utilisé repose sur la modélisation de l'écoulement de l'air humide (mélange de vapeur d'eau et d'air sec) autour et dans la végétation, assimilée à un milieu poreux. Les équations à résoudre reposent sur la conservation des bilans de masse, moment, température, humidité et de modèle de turbulence (2 équations). La présence de végétation apporte un source terme dans chacune de ces 6 équations. Ces derniers sont déduits du vecteur vitesse et des flux de chaleur sensible et latent issus du bilan énergétique réalisé au niveau des feuilles (et dont la capacité de stockage est supposée nulle) :

$$0 = \varphi_{rad,f} - \varphi_{sen,f} - \varphi_{lat,f} \quad (53)$$

Où φ_{rad} , φ_{sen} et φ_{lat} sont les flux de chaleur radiatif, sensible et latent, explicités comme suit.

$$\varphi_{sen} = h_c (T_f - T_a) = \frac{2\rho C_p}{r_a} (T_f - T_a) \quad (54)$$

Où h_c est le coefficient de transfert convectif, T_f la température de surface de la feuille, T_a la température de l'air, r_a la résistance aérodynamique, C_p la capacité thermique massique (ou chaleur spécifique) de l'air et ρ sa densité.

$$\varphi_{lat} = \Lambda E = \Lambda h (e_f - e_a) = \Lambda \frac{\rho R_a}{p R_v} \frac{1}{r_a + r_s} (e_f - e_a) \quad (55)$$

Où Λ la chaleur latente de vaporisation, E le flux massique de vapeur d'eau (évapotranspiration), h le coefficient de transfert convectif, e_f et e_a , les pressions de vapeur de la feuille et de l'air, R_a et R_v les constantes de gaz et de l'air sec et de la vapeur d'eau, r_s la résistance stomatique.

$$\varphi_{rad} = \frac{\nabla \cdot \varphi_{r,sw} + \nabla \cdot \varphi_{r,lw}}{a} \quad (56)$$

Avec :

$$\varphi_{r,sw}(z) = \varphi_{r,sw,0} \exp \left\{ -\beta \int_z^H a(z) dz \right\} \quad (57)$$

$$\varphi_{r,lw} = C_{lw} \frac{\varphi_{r,lw}}{H} \quad (58)$$

Où $\varphi_{r,sw}$ et $\varphi_{r,lw}$ sont les flux radiatifs de courtes et grandes longueurs d'onde, a la densité surfacique des feuilles, $\varphi_{r,sw,0}$ et le flux radiatif courtes longueurs d'onde atteignant le sommet des feuilles, β un coefficient d'extinction, H l'épaisseur de feuillage.

Ici, seul le rayonnement solaire direct est pris en compte. Il est par ailleurs considéré que le soleil est positionné constamment à 90° de la surface de la végétation. Le modèle de végétation, validé sur un cas d'étude expérimental, donne des résultats numériques satisfaisants mais est fondé sur l'équation de Monteith qui ne représente pas fidèlement certains mécanismes (Schulze and Küppers, 1979).

Malgré une géométrie très simplifiée – un modèle 2D d'un espace ouvert contenant un arbre carré –, leur étude paramétrique permet de mieux comprendre l'influence des facteurs environnementaux (vitesse du vent, température de l'air, humidité relative, rayonnement solaire), des caractéristiques des arbres (taille des feuilles, résistance stomatique, densité foliaire) et de la forme de végétation (rangée d'arbres, hauteur des arbres) sur la température de l'air et l'indice universel du climat thermique (UTCI, pour *Universal Thermal Climate Index*). Ce dernier donne une mesure du stress thermique humain en combinant plusieurs paramètres environnementaux : la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement (Jendritzky et al., 2012). L'étude paramétrique montre que par vent faible, la température aux abords de l'arbre est plus basse, créant une zone fraîche, mais que plus de chaleur sensible est retirée à l'air par vent fort. La température de l'air est maximale au sommet de l'arbre, près des feuilles réchauffées par le soleil. En ce qui concerne le confort, l'effet du rafraîchissement évaporatif est faible par rapport à l'ombre apportée par l'arbre. La solution recommandée consiste à combiner des arbres hauts et larges afin d'ombrager le sol et

de la végétation basse qui apporte du rafraîchissement évaporatif à hauteur des passants. Cette étude éclaire les interactions entre certains facteurs et révèle les mécanismes dominants qui influent d'un côté sur la température de l'air, et de l'autre sur l'UTCI. Une disponibilité en eau variable et les échanges radiatifs thermiques restent toutefois à ajouter à ce modèle.

3.6. Modèle ANSYS FLUENT

Le rafraîchissement évaporatif causé par différents types de végétation (rangées d'arbres, murs végétalisés, toitures végétalisées) a également été étudié par Gromke et al. (2015) dans le cas d'une rue canyon d'Arnhem, aux Pays-Bas, lors d'une chaude journée d'été. Les effets de la végétation sur la circulation de l'air et sur le champ de température dans la rue ont été évalués au moyen du logiciel de CFD ANSYS FLUENT. Un pouvoir de rafraîchissement volumétrique P_C , calculé à partir des données expérimentales de Shashua-Bar et al. (2009), a été assigné à chaque type de végétation en fonction de sa densité foliaire. Cette approche s'intéresse plutôt grossièrement à un volume contenant de la végétation contrairement à ce qui peut être fait plus finement lorsque l'on s'intéresse au flux de chaleur latente émanant des feuilles via leurs stomates. Elle permet de déterminer un changement de température à partir de ce pouvoir de rafraîchissement :

$$\Delta T = C_p m P_C \frac{1}{V} \quad (59)$$

Où : C_p est la capacité thermique spécifique, m la masse de l'objet considéré, et V son volume.

La rangée d'arbres est la mesure de rafraîchissement la plus efficace, que ce soit en matière d'intensité (-1.6 K près de l'arbre) ou de distribution spatiale (-1 K sur tout le trottoir parallèle aux arbres). Des effets plus faibles et plus locaux ont été trouvés pour les façades végétalisées, tandis que les toitures végétalisées n'ont pas d'effet sur la température dans la rue, l'air au-dessus des toits n'y étant pas entraîné, avec la vitesse et la direction de vent considérées dans cette étude. La combinaison de tous les types de végétation aboutit à des réductions locales de température de l'air de 2 K et à un champ de température qui est une superposition linéaire des champs obtenus pour chaque solution de végétalisation.

3.7. Remarques complémentaires sur les modèles CFD

Récemment, Toparlar et al. (2017) ont réalisé une revue de la littérature remarquable sur les études CFD du microclimat urbain. Sur 183 articles – répartis de 1998, avec la description du logiciel ENVI-met par Bruse et Fleer, à 2015 –, la moitié traite de végétation urbaine. Environ un quart de ces 90 articles étudie les effets de la végétation dans des aires urbaines génériques à la géométrie simplifiée (plusieurs bâtiments parallélépipédiques, canyon(s) urbain(s), espace ouvert, cour intérieure fermée), le reste des articles analysant des aires urbaines réelles. Le nombre d'études de cas de l'influence de la végétation dans des quartiers existants a rapidement augmenté ces dernières années. Environ deux tiers des articles sur la végétation urbaine ne comportent pas de validation : ils s'intéressent pour la plupart au développement de nouveaux modèles ou se concentrent sur des comparaisons de configurations urbaines et des études paramétriques (conditions climatiques, matériaux, formes des bâtiments, scénarios de chauffage/climatisation, etc.). La validation des études CFD se fait principalement sur maquette en soufflerie dans le cas des géométries génériques et avec des mesures expérimentales sur site dans le cas des quartiers réels. Bien que ce travail de validation soit également sujet à erreurs, du fait des effets d'échelle, de la variabilité et de la non-répétabilité des conditions météorologiques, de la précision de l'instrumentation, du nombre limité de points de mesure dans l'espace, des fréquences d'échantillonnage, etc. (van Hooff and

Blocken, 2012), une méthodologie d'évaluation systématique des modèles CFD est requise afin de pouvoir comparer la qualité de leurs résultats (Schatzmann and Leidl, 2011). Toparlar et al. attribuent l'absence de validation des études CFD à la rareté des données expérimentales bien documentées, ce qui pourrait potentiellement être pallié par des réseaux de capteurs connectés spatialement distribués dans les villes (Muller et al., 2013). En raison des coûts de calcul, pratiquement toutes les études citées utilisent le modèle de turbulence RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*) qui consiste à moyennner temporellement les équations de Navier-Stokes pour toutes les échelles, quelques études seulement étant réalisées avec l'approche LES (*Large Eddy Simulation*) qui simule uniquement les grands tourbillons en filtrant les petites échelles.

Comme évoqué précédemment, il est régulièrement reproché aux simulations CFD leur gourmandise en temps de calcul, ce qui limiterait leur utilisation en phase de conception ou lors d'études d'optimisation (Zuo and Chen, 2009). Pour étudier les flux d'air autour des bâtiments, Waibel et al. (2017) proposent donc d'utiliser un code de *Fast Fluid Dynamics* (FFD) dans un plug-in de *Rhinoceros/Grasshopper*. L'approche FFD, proposée par Stam (1999), est une méthode de projection implicite qui approxime les équations de Navier-Stokes en découplant la pression et la vitesse. Le fait de l'utiliser dans la plateforme *Rhinoceros/Grasshopper* permet de la coupler avec plusieurs outils dédiés (géométrie 3D, recherche de forme, calcul de structures, échanges radiatifs, énergétique du bâtiment, optimisation, etc.). *Rhinoceros/Grasshopper* possède les qualités de la plateforme de simulation intégrée décrite par Murakami (2004). En particulier, les interactions entre le microclimat urbain et la consommation énergétique des bâtiments peuvent être étudiées, ce qui n'est actuellement pas possible avec le logiciel ENVI-met par exemple, dans lequel une température unique est fixée pour tous les bâtiments en entrée du modèle. Des études comparatives de simulations FFD avec des simulations CFD sur OpenFOAM et des données expérimentales en soufflerie montrent que la méthode FFD reproduit assez fidèlement les écoulements à part dans le sillage de certains obstacles.

Les travaux de Dimoudi and Nikolopoulou (2003) et Gromke et al. (2015) présentent des résultats similaires en matière d'intensité de rafraîchissement et de distribution des températures autour des zones végétalisées. Cependant, les effets d'ombrage dus à la végétation sont omis, tout comme la quantité d'eau disponible – dans les deux modèles, l'évapotranspiration n'est pas limitée par les ressources hydriques. Ces problèmes montrent la nécessité de développer deux techniques identifiées par Murakami (2006) : la simulation couplée et les systèmes de rétroaction. La simulation couplée vise à modéliser les interactions des nombreux paramètres physiques propres aux systèmes environnementaux (vent, rayonnement, transferts de masse et de chaleur, etc.) au sein d'une même plateforme logicielle comportant des sous-modèles dédiés. La prise en compte de tous ces paramètres physiques est essentielle lorsqu'il s'agit d'étudier des mesures d'atténuation d'un îlot de chaleur urbain qui peuvent avoir des effets positifs et négatifs sur le confort humain. Ce dernier point illustre au passage une autre difficulté soulevée par Murakami lors d'analyses du microclimat urbain : les différentes échelles spatiales des phénomènes en jeu (échelles de l'individu, de la pièce, du bâtiment, du quartier, de la ville). Concernant les boucles de rétroaction, Murakami prend comme exemple l'influence du microclimat sur la commande d'un système de chauffage/ventilation/climatisation d'un bâtiment, ce dernier modifiant lui-même la température de l'air (Murakami et al., 1999). Le mécanisme d'évapotranspiration des végétaux semble également être régi par une rétroaction semblable (Morton, 1990).

4. Modélisation à l'échelle de la ville

TEB peut être utilisé à l'échelle de la ville qui est désagrégée en pixels à cette fin. Chaque maille est ainsi constituée d'une rue canyon (celle qui est majoritaire) dont l'orientation est conservée (Pinson et al., 2015). Cette rue-type possède des murs et toits et le modèle calcule les échanges thermiques entre ces murs, la rue-type et le toit. La maille contient aussi un pourcentage d'autres éléments (végétation, eau, etc) qui sont, eux aussi, agrégés à partir d'une représentation de la réalité.

Une approche similaire a été mise en œuvre sur Londres (Mavrogianni et al., 2011) à l'aide du modèle MORUSES (met Office-Reading Urban Surface Exchange Scheme) (Harman and Belcher, 2006; Porson et al., 2009). Sur des mailles de $1 \times 1 \text{ km}^2$, une fraction de la surface est représentée par un environnement rural et une autre par un environnement urbain. Ce dernier comprend une portion de route délimitée par sa largeur et un immeuble caractérisé par sa hauteur et sa largeur de toit. Le bilan énergétique est ainsi résolu à cette échelle et permet le calcul de température à une hauteur de 1,5 m. Sur Londres, cette approche a permis de cartographier le phénomène d'îlot de chaleur lors de l'événement caniculaire du 7 mai 2008.

Une alternative aux modèles de type CFD peut aussi être l'utilisation de modèles basés sur des perturbations des champs de vitesses et de températures comme ADMS (<http://www.cerc.co.uk/environmental-software/ADMS-model.html>). Celui-ci a par exemple été utilisé sur la ville de Lecce en Italie pour des études climatiques (Maggiotto et al., 2014). Son principe repose sur la résolution mathématique de formes linéarisées des équations de transfert thermique. Il ne prend pas en compte explicitement les immeubles, mais les matérialise à l'aide de coefficients de rugosité. Un ΔQ_h est ainsi calculé en comparant le bilan énergétique d'une situation de départ à une situation perturbée par l'environnement urbain. Il en est déduit un ΔT_s qui permet de modifier les températures de surface. Bien que les équations ne soient pas toutes explicitées, il s'avère que :

- ΔQ^* varie en fonction de l'albédo (α) et volume de bâtiment normalisé (NBV)
- ΔQ_g varie en fonction de l'admittance thermique (μ) et la résistance stomatique (r_s)
- ΔQ_E est exprimé en fonction de ΔQ_h à l'aide de l'indice de Bowen lui-même déterminé à l'aide de SRE , l'humidité spécifique de l'air à saturation (q_{sat}), la capacité spécifique de l'air (C_p), la chaleur latente de vaporisation (L).

Le modèle n'a pas été utilisé pour modéliser l'effet de la végétation mais cela est envisageable si les paramètres listés précédemment sont modifiés en conséquence. Dans l'état actuel des choses, ADMS a été comparé à ENVI-met sur différents sites pilotes instrumentés de Lecce. Les deux modèles ont donné des résultats similaires (bonne reproduction des températures mais difficulté à reproduire les valeurs maximales) pour des temps de calcul très différents (quelques heures vs quelques jours).

5. CONCLUSIONS

Cette revue de la littérature a montré la grande complexité qui relie les différents bilans énergétiques relatifs à un environnement urbain et la présence de végétation. En fonction de l'état de cette végétation et de l'état hydrique des sols sur lesquels elle repose, différents paramètres peuvent être modifiés :

- Caractéristiques physiques du sol : sa conductivité thermique, sa capacité thermique, sa résistance aérodynamique

Les flux de chaleur suivants peuvent donc être impactés :

- Chaleur latente au niveau de la végétation
- Chaleur latente au niveau du sol
- Chaleur sensible au niveau de l'interface sol / air

On s'assurera lors de la mise en œuvre des travaux de modélisation prévus dans le cadre du projet EVNATURB que le couplage thermo-hydrique tienne compte de ces interactions.

BIBLIOGRAPHIE

- Alexandri, E., Jones, P., 2007. Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results. *Build. Environ.* 42, 2835–2849. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.004>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ambrosini, D., Galli, G., Mancini, B., Nardi, I., Sfarra, S., 2014. Evaluating Mitigation Effects of Urban Heat Islands in a Historical Small Center with the ENVI-Met® Climate Model. *Sustainability* 6, 7013–7029. <https://doi.org/10.3390/su6107013>
- Azam, M.-H., Bernard, J., Morille, B., Musy, M., Andrieu, H., 2018. A pavement-watering thermal model for SOLENE-microclimat: Development and evaluation. *Urban Clim.* 25, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.04.005>
- Boone, A., Masson, V., Meyers, T., Noilhan, J., 2000. The Influence of the Inclusion of Soil Freezing on Simulations by a Soil–Vegetation–Atmosphere Transfer Scheme. *J. Appl. Meteorol.* 1544–1569.
- Bruse, M., Fleer, H., 1998. Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environ. Model. Softw.* 373–384.
- Cohard, J.-M., Rosant, J.-M., Rodriguez, F., Andrieu, H., Mestayer, P.G., Guillevic, P., 2018. Energy and water budgets of asphalt concrete pavement under simulated rain events. *Urban Clim.* 24, 675–691. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.08.009>
- de Munck, C.S., Lemonsu, A., Bouzouidja, R., Masson, V., Claverie, R., 2013. The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB. *Geosci. Model Dev.* 6, 1941–1960. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1941-2013>
- Del Barrio, E.P.D., 1998. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy Build.* 27, 179–193. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00029-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00029-7)
- Dimoudi, A., Nikolopoulou, M., 2003. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy Build.* 35, 69–76. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00081-6)
- Frankenstein, S., Koenig, G.G., 2004. Fast All Season Soil STrength (FASST) Model. (No. ERDC/CRREL SR-04-1). Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Gromke, C., Blocken, B., Janssen, W., Merema, B., van Hooff, T., Timmermans, H., 2015. CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. *Build. Environ.* 83, 11–26. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.022>
- Harman, I.N., Belcher, S.E., 2006. The surface energy balance and boundary layer over urban street canyons. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 132, 2749–2768. <https://doi.org/10.1256/qj.05.185>
- Jendritzky, G., de Dear, R., Havenith, G., 2012. UTCI—Why another thermal index? *Int. J. Biometeorol.* 56, 421–428. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>
- Lee, S.-H., Park, S.-U., 2008. A Vegetated Urban Canopy Model for Meteorological and Environmental Modelling. *Bound.-Layer Meteorol.* 126, 73–102. <https://doi.org/10.1007/s10546-007-9221-6>
- Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., Pearlmutter, D., 2012. Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geosci. Model Dev.* 5, 1377–1393. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1377-2012>

- Liu, Z., Zheng, S., Zhao, L., 2018. Evaluation of the ENVI-Met Vegetation Model of Four Common Tree Species in a Subtropical Hot-Humid Area. *Atmosphere* 198.
- Maggiotto, G., Buccolieri, R., Santo, M.A., Leo, L.S., Di Sabatino, S., 2014. Validation of temperature-perturbation and CFD-based modelling for the prediction of the thermal urban environment: the Lecce (IT) case study. *Environ. Model. Softw.* 60, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.06.001>
- Malys, L., Musy, M., Inard, C., 2014. A hydrothermal model to assess the impact of green walls on urban microclimate and building energy consumption. *Build. Environ.* 73, 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.012>
- Masson, V., 2000. A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Bound.-Layer Meteorol.* 94, 357–397. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>
- Mavrogianni, A., Davies, M., Batty, M., Belcher, S., Bohnenstengel, S., Carruthers, D., Chalabi, Z., Croxford, B., Demanuele, C., Evans, S., Giridharan, R., Hacker, J., Hamilton, I., Hogg, C., Hunt, J., Kolokotroni, M., Martin, C., Milner, J., Rajapaksha, I., Ridley, I., Steadman, J., Stocker, J., Wilkinson, P., Ye, Z., 2011. The comfort, energy and health implications of London's urban heat island. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 32, 35–52. <https://doi.org/10.1177/0143624410394530>
- Mirzaei, P.A., 2015. Recent challenges in modeling of urban heat island. *Sustain. Cities Soc.* 19, 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.04.001>
- Morton, F.I., 1990. Studies in evaporation and their lessons for the environmental sciences. *Can. Water Resour. J.* 15, 261–286. <https://doi.org/10.4296/cwrj1503261>
- Muller, C.L., Chapman, L., Grimmond, C.S.B., Young, D.T., Cai, X., 2013. Sensors and the city: a review of urban meteorological networks: SENSORS AND THE CITY. *Int. J. Climatol.* 33, 1585–1600. <https://doi.org/10.1002/joc.3678>
- Murakami, S., 2006. Environmental design of outdoor climate based on CFD. *Fluid Dyn. Res.* 38, 108–126. <https://doi.org/10.1016/j.fluiddyn.2004.10.006>
- Murakami, S., Kato, S., Kim, T., 1999. Indoor climate design based on feedback control of HVAC, Coupled simulation of convection, radiation, and HVAC control for attaining given operative temperature, in: *Proceedings of the International Conference of IBPSA - Building Simulation*. Kyoto (Japan).
- Musy, M., Malys, L., Inard, C., 2017. Assessment of Direct and Indirect Impacts of Vegetation on Building Comfort: A Comparative Study of Lawns, Green Walls and Green Roofs. *Procedia Environ. Sci.* 38, 603–610. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.134>
- Noilhan, J., Planton, S., 1989. A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models. *Mon. Weather Rev.* 536–549.
- Pinson, L., Ruas, A., Masson, V., Chancibault, K., 2015. Une meilleure connaissance et estimation du risque caniculaire en zone urbaine dense, in: 275-280. Presented at the XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège (Belgique).
- Porson, A., Harman, I.N., Bohnenstengel, S.I., Belcher, S.E., 2009. How Many Facets are Needed to Represent the Surface Energy Balance of an Urban Area? *Bound.-Layer Meteorol.* 132, 107–128. <https://doi.org/10.1007/s10546-009-9392-4>
- Redon, E.C., Lemonsu, A., Masson, V., Morille, B., Musy, M., 2017. Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0. *Geosci. Model Dev.* 10, 385–411. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-385-2017>
- Sailor, D.J., 2008. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy Build.* 40, 1466–1478. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.001>

- Schatzmann, M., Leitl, B., 2011. Issues with validation of urban flow and dispersion CFD models. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 99, 169–186.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2011.01.005>
- Schulze, E.-D., Küppers, M., 1979. Short-term and long-term effects of plant water deficits on stomatal response to humidity in *Corylus avellana* L. *Planta* 146, 319–326.
<https://doi.org/10.1007/BF00387804>
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., Erell, E., 2009. The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate. *Landsc. Urban Plan.* 92, 179–186.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.04.005>
- Stam, J., 1999. Stable fluids, in: *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 121–128.
- Suter, I., Maksimović, Č., van Reeuwijk, M., 2017. A neighbourhood-scale estimate for the cooling potential of green roofs. *Urban Clim.* 20, 33–45.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.02.007>
- Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., van Heijst, G.J.F., 2017. A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 80, 1613–1640.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.248>
- van Hooff, T., Blocken, B., 2012. Full-scale measurements of indoor environmental conditions and natural ventilation in a large semi-enclosed stadium: Possibilities and limitations for CFD validation. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 104–106, 330–341.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.02.009>
- Waibel, C., Bystricky, L., Kubilay, A., Evins, R., Carmeliet, J., 2017. Validation of Grasshopper-based Fast Fluid Dynamics for Air Flow around Buildings in Early Design Stage, in: *Proceedings of the 15th International Conference of IBPSA - Building Simulation*. San Francisco (USA).
- Weller, H.G., Tabor, G., Jasak, H., Fureby, C., 1998. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Comput. Phys.* 12, 620.
<https://doi.org/10.1063/1.168744>
- Zuo, W., Chen, Q., 2009. Real-time or faster-than-real-time simulation of airflow in buildings. *Indoor Air* 19, 33–44. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2008.00559.x>