



HAL
open science

Quantification et modélisation des services climatiques rendus par les arbres dans une rue canyon

Souleymane Mballo

► **To cite this version:**

Souleymane Mballo. Quantification et modélisation des services climatiques rendus par les arbres dans une rue canyon. Biologie végétale. Agrocampus Ouest, 2022. Français. NNT : 2022NSARD097 . tel-03943782

HAL Id: tel-03943782

<https://theses.hal.science/tel-03943782>

Submitted on 17 Jan 2023

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

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

THESE DE DOCTORAT DE

L'INSTITUT NATIONAL D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR POUR L'AGRICULTURE,
L'ALIMENTATION ET L'ENVIRONNEMENT

ECOLE DOCTORALE N° 600
Ecole doctorale Ecologie, Géosciences, Agronomie et Alimentation
Spécialité : « *Sciences de la terre et de l'environnement* »

Par

Souleymane MBALLO

Quantification et modélisation des services climatiques rendus par les arbres dans une rue canyon

Thèse présentée et soutenue à Angers, le 8 mars 2022
Unité de recherche : UP Environnement physique de la plante horticole (EPHOR)
Thèse N° D-97_2022-4

Rapporteurs avant soutenance :

Marjorie MUSY Directrice de recherche, CEREMA, Nantes
Andrée TUZET Chargée de recherche, INRAE, Thiverval-Grignon

Composition du Jury :

Président :	Hervé NICOLAS	Professeur, Institut Agro Rennes-Angers
Examineurs :	Jean-Claude ROY Yves RICHARD	Maître de conférences, Université de Franche-Comté Professeur, Université de Bourgogne
Directeur de thèse :	Pierre-Emmanuel BOURNET	Professeur, Institut Agro Rennes-Angers
Co-encadrante de thèse :	Sophie HERPIN	Maître de conférences, Institut Agro Rennes-Angers
Co-encadrante de thèse :	Sabine DEMOTES-MAINARD	Chargée de recherche, INRAE IRHS

Remerciements

Je remercie toutes celles et tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de cette thèse.

Je remercie mon directeur de thèse Pierre-Emmanuel BOURNET et mes co-encadrantes Sophie HERPIN et Sabine DEMOTES-MAINARD de m'avoir fait bénéficier de leurs compétences dans leurs domaines respectifs. Je les remercie également de m'avoir formé à la rigueur intellectuelle et à l'esprit critique.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de Dominique LEMESLE pour son appui sur le volet expérimental tout au long de cette thèse, à Patrice CANNAVO pour l'expertise qu'il a apportée sur les données de sol, à Lydie LEDROIT et Bénédicte DUBUC pour leur aide sur la réalisation des mesures sur les arbres.

J'exprime ma reconnaissance et ma gratitude à l'ADEME et à la région Pays-de-Loire d'avoir financé cette thèse, à RFI Objectif Végétal pour son appui financier, au pépiniériste Jacques Briant pour les arbres qu'ils nous a fournis et au personnel de la plateforme Phenotic pour leur aide dans ce projet de thèse.

Mes sincères remerciements à tous les membres de l'unité EPHor de leur accueil chaleureux dont je me souviendrai encore longtemps.

J'exprime mon infinie reconnaissance à mon papa, à ma maman, à mes frères et sœurs, à mon épouse, à mon fils, à ma tante Agnieszka et à mon cousin Serge pour le soutien qu'ils m'ont apporté, et sans lequel, ce travail n'aurait pas été possible.

Je dédie cette thèse à ma tante Haouly, pour qui, j'ai une pensée toute particulière.

Table des matières

Table des figures	13
Liste des tableaux	17
1 Introduction	27
1.1 Contexte et enjeux scientifiques	28
1.1.1 Croissance de l'urbanisation	30
1.1.2 Phénomène d'îlot de chaleur urbain	30
1.1.3 La végétation, un moyen de remédiation contre l'ICU	33
1.1.4 Typologie urbaine et rue canyon	34
1.2 Questionnements scientifiques et hypothèses	36
1.3 Organisation du document	37
2 Description des mécanismes biophysiques en milieu urbain	39
2.1 Aéraulique	40
2.1.1 Écoulement dans la couche limite urbaine	40
2.1.2 Écoulement dans la rue canyon	43
2.2 Échanges énergétiques	45
2.2.1 Conduction	45
2.2.2 Convection	47
2.2.3 Rayonnement	48
2.3 Impact du végétal sur le bilan énergétique	52
2.3.1 Convection	52
2.3.2 Rayonnement	53

2.3.3	Evapotranspiration	53
2.4	Impact du végétal sur le bilan hydrique du sol	57
2.5	État de l'art et verrous scientifiques	58
2.5.1	Études expérimentales en soufflerie	58
2.5.2	Études expérimentales en milieu extérieur	62
2.5.2.1	Échelle réduite	62
2.5.2.2	Échelle réelle	65
2.5.3	Études numériques	66
2.5.3.1	Modèles globaux	66
2.5.3.2	Modèles de climat distribué (CFD)	67
2.5.4	Conclusion de l'état de l'art	72
2.6	Objectifs de la thèse	72
3	Formalisation mathématique des phénomènes biophysiques mis en jeu en vue d'une intégration dans un modèle de climat distribué	75
3.1	Équations de base du modèle de climat distribué	76
3.1.1	Équation de conservation de la masse	76
3.1.2	Équation de conservation de la quantité de mouvement	77
3.1.3	Équation de conservation de l'énergie	77
3.2	Equation de conservation d'espèces	78
3.3	Loi d'état	79
3.4	Sous modèle radiatif	80
3.4.1	Équation de transferts radiatifs (ETR)	80
3.4.2	Couplage entre l'ETR et l'équation de conservation de l'énergie	83
3.4.3	Méthode des ordonnées discrètes (DO)	83
3.5	Choix du modèle de turbulence	84
3.5.1	Equations de fermeture	85
3.5.2	Lois de paroi	87
3.6	Sous-modèle de culture et couplage avec les équations de conservation de quantité de mouvement, de l'énergie et de vapeur d'eau	89
3.6.1	Effet mécanique des arbres	89
3.6.2	Effet écophysologique des arbres	91

3.6.2.1	Source de chaleur sensible	92
3.6.2.2	Source de chaleur latente (transpiration)	92
3.7	Discrétisation des équations de transport	97
3.7.1	Discrétisation temporelle	97
3.7.2	Discrétisation spatiale par la méthode des volumes finis	99
3.8	Synthèse du système d'équations	100
4	Dispositif expérimental et instrumentation	103
4.1	Objectifs du dispositif expérimental	104
4.2	Présentation de la rue canyon	104
4.2.1	Caractéristiques de la rue canyon	104
4.2.2	Arbres	106
4.2.3	Caractéristiques du substrat	112
4.2.4	Modalité d'irrigation	113
4.3	Instrumentation de la rue canyon	113
4.3.1	Compartiment aérien	115
4.3.1.1	Mesure du vent	115
4.3.1.2	Mesure de températures d'air et d'humidité relative	117
4.3.1.3	Mesure de flux de chaleur et de températures de parois	120
4.3.1.4	Mesure du rayonnement	120
4.3.1.5	Mesure de la température de globe	124
4.3.1.6	Mesure de la pluviométrie	124
4.3.2	Compartiment racinaire	124
4.3.2.1	Détermination de la courbe de rétention en eau	125
4.3.2.2	Mesure du potentiel hydrique et de teneur en eau dans le sol	125
4.3.3	Compartiment végétal	128
4.3.3.1	Mesure de températures de feuille	128
4.3.3.2	Mesure des résistances stomatiques	128
4.3.3.3	Mesure de rayonnement PAR	130
4.3.3.4	Mesure de la surface foliaire	130
4.3.3.5	Mesure du volume de peuplement	132

4.3.3.6	Mesure du LAI et du LAD	134
4.4	Identification des journées types retenues pour l'étude et modalité de calcul de la transpiration des arbres	134
4.4.1	Choix des journées étudiées	134
4.4.2	Méthode de détermination de la transpiration	135
4.5	Synthèse	136
5	Résultats expérimentaux	139
5.1	Impact of well-watered trees on the microclimate inside a canyon street scale l in outdoor environment for two contrasting individual days	140
5.1.1	Introduction	141
5.1.2	Materials and methods	149
5.1.2.1	Experimental site	149
5.1.2.2	Instrumentation	151
5.1.2.3	Methods	156
5.1.3	Results	162
5.1.3.1	Meteorological conditions during the selected days	162
5.1.3.2	Characteristics of the trees during the selected days	163
5.1.3.3	Radiation balance of the street	164
5.1.3.4	Interception of global incident radiation by the street and by the trees	167
5.1.3.5	Impact of the trees on wall fluxes and wall temperatures	169
5.1.3.6	Tree transpiration	171
5.1.3.7	Impact of the street and trees on air temperature	175
5.1.3.8	Impact of the street and trees on air relative and absolute humidity	180
5.1.3.9	Impact of the street and the trees on Universal Thermal Climate Index (UTCI)	182
5.1.3.10	Energy balance	185
5.1.4	Discussion	187
5.1.4.1	Impact of the canyon street scale reduction on the energy balance	187

5.1.4.2	Impact of the canyon street configuration and its environment on urban overheating	189
5.1.4.3	Climatic benefits of the trees	191
5.1.5	Conclusion	192
5.2	Impact d'arbres en confort hydrique sur le microclimat dans une rue canyon arborée à échelle réduite : données obtenues sur des périodes de plusieurs jours ensoleillés pendant la campagne 2020	196
5.2.1	Choix des journées étudiées	196
5.2.2	Analyse des résultats	199
5.3	Synthèse	202
6	Simulations numériques	205
6.1	Computational Fluid Dynamics (CFD)	206
6.2	Principales étapes de la modélisation	206
6.2.1	Définition et discrétisation du domaine de calcul	207
6.2.1.1	Définition du domaine de calcul	207
6.2.1.2	Discrétisation du domaine de calcul	209
6.2.2	Paramétrage numérique et résolution des équations	211
6.2.2.1	Propriétés physiques et optiques des matériaux	212
6.2.2.2	Conditions aux limites et initiales	213
6.2.2.3	Relaxation et critères de convergence	215
6.2.2.4	Résolution des équations	216
6.3	Simulations numériques	217
6.3.1	Choix de la journée étudiée	217
6.3.2	Dimensions du milieu poreux	218
6.3.3	Caractéristiques du milieu poreux	219
6.3.3.1	Porosité et propriétés physiques du milieu poreux	219
6.3.3.2	Coefficient de traînée	220
6.3.3.3	Surface foliaire, LAI et LAD	221
6.3.3.4	Coefficient d'extinction du rayonnement	221
6.3.3.5	Les UDF (User Defined Functions) utilisées	223
6.3.4	Évaluation de la qualité du modèle numérique	226

6.3.5	Impact des arbres sur le rayonnement incident	231
6.3.6	Impact des arbres sur la température de l'air	233
6.3.7	Impact des arbres sur la vitesse de l'air	234
6.3.8	Impact des arbres sur l'humidité de l'air	238
6.4	Synthèse	240
7	Conclusion et perspectives	243
	Bibliographie	250
	Appendices	272
A	Article de conférence	273
A.1	Influence of solar radiation on flow and temperature fields within a canyon street	273
A.1.1	Introduction	274
A.1.2	Methodology	275
A.1.2.1	Experimental setup	275
A.1.2.2	Numerical approach	279
A.1.3	Validation of numerical results	283
A.1.4	Discussion	286
A.1.5	Conclusion	287
B	Étalonnage des sondes en eau ECH2O	290
C	Étalonnage des tensiomètres	297
D	Détermination de la courbe de rétention en eau	298
E	Courbes de teneur en eau et de potentiel hydrique du sol	300
F	Résultats dans les modalités végétalisées A et B	303
G	Mesure de la surface foliaire	306

H	Mesure du volume de peuplement	308
I	Ratio d'ensoleillement des journées du mois de juillet 2020	310
J	Autres résultats pour des données obtenues sur des périodes de plusieurs jours ensoleillés pendant la campagne 2020	312
K	Les UDF utilisés	315

Table des figures

Figure 1	Bilan thermique du corps humain	29
Figure 2	Ilot de Chaleur Urbain	31
Figure 3	Formation de l'ICU	33
Figure 4	Configurations de rues canyon	35
Figure 5	Photographie d'un canyon urbain	36
Figure 6	Différentes zones de la couche limite urbaine	41
Figure 7	Régimes d'écoulement dans une rue canyon	44
Figure 8	Types d'écoulement en fonction du rapport d'aspect	44
Figure 9	Bilan énergétique pour une zone urbaine	46
Figure 10	Bilan radiatif au-dessus d'une ville	51
Figure 11	Flux solaires à la surface des arbres	54
Figure 12	Coefficient cultural en fonction du quantième	56
Figure 13	Résultats issus de l'étude de Uehara et al. (2000)	59
Figure 14	Résultats issus de l'étude de Allegrini et al. (2013)	60
Figure 15	Configurations de rues canyon étudiées en CFD	68
Figure 16	Emplacement de la rue canyon	105
Figure 17	Vue d'ensemble de la rue canyon	106
Figure 18	Emplacement des arbres dans la rue	108
Figure 19	Quelques photographies des arbres	109
Figure 20	Pot de rempotage installé dans une fosse de plantation.	110
Figure 21	Modalités de taille des arbres	112
Figure 22	Positions des mâts pendant la campagne de 2020.	116

Figure 23	Emplacement des capteurs de vent	117
Figure 24	Emplacement des capteurs de température et d'humidité	119
Figure 25	Emplacement des fluxmètres	121
Figure 26	Emplacement des capteurs de rayonnement	123
Figure 27	Courbe de rétention en eau du sol	126
Figure 28	Emplacement des tensiomètres et des sondes ECH2O	127
Figure 29	Emplacement des thermocouples de feuille	129
Figure 30	Emplacement des capteurs de rayonnement PAR	131
Figure 31	Détermination du LAD	133
Figure 32	Calcul de la transpiration	136
Figure 33	Canyon street at 1/5 scale built at Institut Agro	150
Figure 34	Sketch of the street with the different modalities	153
Figure 35	Location of soil sensors	154
Figure 36	Calculation of the transpiration	158
Figure 37	Domains for the calculation of the energy balance	161
Figure 38	Daily evolution of the Richardson number	163
Figure 39	Daily evolution of the components of the radiation	166
Figure 40	Daily evolutions of global incident radiation	168
Figure 41	Daily evolution of wall heat fluxes	170
Figure 42	Daily evolution of surface temperatures	172
Figure 43	Transpiration of trees for the sunny day	174
Figure 44	Transpiration of trees for the cloudy day	174
Figure 45	Vertical distribution of air temperature	176
Figure 46	Horizontal distribution of air temperature	177
Figure 47	Daily evolution of air temperatures	178
Figure 48	Daily evolution of air relative humidities	181
Figure 49	Daily evolution of air absolute humidity	182
Figure 50	Daily evolutions of UTCI	184
Figure 51	Évolutions journalières du rayonnement solaire incident	197
Figure 52	Roses des vents pour les journées ensoleillées de juillet 2020	198
Figure 53	Évolutions journalières des températures d'air	201

Figure 54	Évolutions journalières des écarts de températures d'air	202
Figure 55	Définition du domaine de calcul	208
Figure 56	Étude de convergence en maillage	210
Figure 57	Maillage de la rue et du bâtiment Ouest.	211
Figure 58	Profil vertical du vent incident	214
Figure 59	Rayonnement solaire incident	218
Figure 60	Roses des vents pour les journées du 28, 29 et 30 juillet 2020 . . .	218
Figure 61	Dimensions du milieu poreux	219
Figure 62	Coefficient d'extinction dans la modalité A	224
Figure 63	Coefficient d'extinction dans la modalité B	224
Figure 64	Routine pour le bilan énergétique sur le couvert végétal.	225
Figure 65	Évaluation de la qualité du modèle sur les températures de parois	228
Figure 66	Évaluation de la qualité du modèle sur les températures d'air . . .	229
Figure 67	Évaluation de la qualité du modèle sur les humidités absolues . .	229
Figure 68	Évolutions journalières des termes du bilan énergétique	231
Figure 69	Évolution journalière des températures de	232
Figure 70	Évolution journalière de la transpiration simulée	232
Figure 71	Champs de rayonnement courtes longueurs d'onde	233
Figure 72	Champs de rayonnement grandes longueurs d'onde	234
Figure 73	Champs de températures d'air	235
Figure 74	Évolutions journalières du nombre de Richardson	236
Figure 75	Champs de vecteurs vitesse	236
Figure 76	Champs du module de la vitesse du vent	237
Figure 77	Profil du module de la vitesse du vent	238
Figure 78	Champs de températures de feuille	239
Figure 79	Champs de transpiration dans le houppier	239
Figure 80	Champs d'humidités absolues de l'air	239
Figure 81	Champs d'humidités relatives de l'air	240
Figure 82	Street canyon on 1/5 th scale	276
Figure 83	Sensors location	276
Figure 84	Wind rose for the day of September 11, 2019	280

Figure 85	Computational domain and its discretization around the street..	281
Figure 86	Daily evolutions of boundary conditions	284
Figure 87	Daily evolutions of air and surface temperatures.	285
Figure 88	The daily evolution of Richardson number for the simulated day.	286
Figure 89	Numerical results	288
Figure 90	Courbes d'étalonnage des sondes ECH2O.	294
Figure 91	Courbes d'étalonnage des sondes ECH2O.	295
Figure 92	Courbes d'étalonnage des sondes ECH2O.	296
Figure 93	Table de succion et des presse de Richards	298
Figure 94	Données de sol pour le pot E	301
Figure 95	Données de sol pour le pot H	302
Figure 96	Résultats pour les modalités A et B pour le 29/07/2020	304
Figure 97	Résultats pour les modalités A et B pour le 25/07/2020	305
Figure 98	Évolutions journalières des températures du mur Est	313
Figure 99	Évolutions journalières des températures du mur Ouest	313
Figure 100	Évolutions journalières des humidités relatives de l'air	314
Figure 101	Évolutions journalières des humidités absolues de l'air	314

Liste des tableaux

Table 1	Valeurs de α , d_0 et z_0 en fonction de la rugosité	43
Table 2	Propriétés thermiques de quelques matériaux	47
Table 3	Propriétés radiatives de quelques matériaux	50
Table 4	Synthèse de quelques études menées en soufflerie	61
Table 5	Synthèse de quelques études réalisées à échelle réduite	64
Table 6	Tableau de synthèse de quelques études CFD	71
Table 7	Modes de convection et régimes d'écoulement	97
Table 8	Caractéristiques des capteurs utilisés	114
Table 9	Surfaces foliaires des arbres utiles mesurées le 24/07/2020	132
Table 10	Détermination des dimensions du volume de peuplement	133
Table 11	Détermination du LAI et du LAD	134
Table 12	Main studies carried out on canyon streets	147
Table 13	Some studies carried out on vegetated canyon streets	148
Table 14	Characteristics of the sensors used for experiments.	155
Table 15	Average characteristics of the street trees.	164
Table 16	Daily integral of incident global radiation	168
Table 17	Accumulation of the different terms of the energy balance	186
Table 18	Accumulation of the net radiation	186
Table 19	Journées ensoleillées sélectionnées.	197
Table 20	Indicateurs statistiques sur les températures d'air	201
Table 21	Indicateurs statistiques sur les écarts de températures d'air.	201

Table 22	Principales informations sur le maillage.	210
Table 23	Propriétés thermiques et optiques des différents matériaux	213
Table 24	Facteurs de sous-relaxation utilisés.	216
Table 25	Propriétés thermiques équivalentes du milieu poreux	220
Table 26	Valeurs de la surface foliaire, du LAI et du LAD	221
Table 27	Propriétés du couvert végétal dans les modalités A et B.	223
Table 28	Indicateurs statistiques	230
Table 29	Characteristics of the sensors used for experiments.	278
Table 30	Thermal and radiative properties of the materials	282
Table 31	Calcul de l'humidité de la terre et du compost.	292
Table 32	Détermination de la densité de la terre et du compost.	292
Table 33	Proportions de masse de la terre et du compost	292
Table 34	Humidités du mélange terre/compost	292
Table 35	Quantité d'eau à apporter à chaque mesure	293
Table 36	Tensions mesurées en fonction de l'humidité volumique	293
Table 37	Dimensions pour volume de peuplement	309
Table 38	Ratios d'ensoleillement pour le mois de juillet 2020	311

Nomenclature

α	: coefficient de rugosité ou albédo	—
α^*, β^*	: constantes empiriques du modèle de conductance stomatique	—
β	: coefficient de dilatation thermique de l'air	K^{-1}
δ	: déclinaison du soleil	rad
$\Delta\Theta$: variation de la teneur en eau dans le sol	—
ΔA	: bilan net de vapeur d'eau apportée par advection	mm.jour^{-1}
Δr	: quantités d'eau perdues par évacuation/ruissellement	mm.jour^{-1}
ΔS	: variation du stock d'eau dans le sol	cm^3
ΔT	: écart de température	K
λ	: conductivité thermique de l'air	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
μ	: viscosité dynamique de l'air	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
μ_t	: viscosité dynamique turbulente	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
ν	: viscosité cinématique	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
ν_t	: viscosité cinématique turbulente	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
ω_s	: angle de coucher du soleil	rad
Ψ	: porosité	—
ρ	: masse volumique de l'air	kg.m^{-3}

θ	: angle polaire	rad
φ	: angle azimutal	rad
$\vec{\nabla}T$: gradient de température	K.m ⁻¹
\vec{V}	: vecteur vitesse du fluide	m.s ⁻¹
ξ	: facteur de sous-relation	—
a	: diffusivité thermique de l'air	m ² .s ⁻¹
$d\Omega'$: angle solide	sr
d_r	: inverse de la distance relative terre-soleil	—
ET_{ref}	: évapotranspiration de référence	mm.jour ⁻¹
ETR	: évapotranspiration réelle	mm.jour ⁻¹
F	: quantité de vapeur d'eau issue des processus de combustion	mm.jour ⁻¹
I	: quantité d'eau apportée par irrigation	mm.jour ⁻¹
J_m	: flux massique de l'espèce m	kg.m ⁻² .s ⁻¹
L	: luminance	W.K ⁻¹ .sr ⁻¹
m_m	: masse de l'espèce m	kg
P	: quantité totale des précipitations	mm.jour ⁻¹
P_v^{sat}	: pression de vapeur saturante	Pa
RH_{min}	: humidité relative minimale	%
S_m	: terme source (ou puits) de l'espèce m	kg.m ⁻³ .s ⁻¹
T	: température locale du fluide	K
T_0	: température du fluide dans le « free stream »	K
T_∞	: température du fluide loin de la paroi	K
T_w	: température de paroi	K

U_0	: vitesse du fluide dans le « free stream »	m.s^{-1}
u_2	: moyenne journalière de la vitesse à 2 m du sol	m.s^{-1}
u_i	: composante i du vecteur vitesse du fluide	m.s^{-1}
V_{soil}	: volume de sol utile dans le pot	cm^3
y_m	: fraction massique de l'espèce m	—
ΔQ_A	: flux de chaleur advectif	W.m^{-2}
ΔQ_S	: variation de la quantité de chaleur stockée	W.m^{-2}
Δ	: pente de la courbe de saturation de vapeur d'eau	$\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$
ϵ	: émissivité	—
η	: coefficient d'extinction	—
Γ_Φ	: constante de diffusion	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
γ	: constante psychrométrique	$\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$
κ	: constante de Von Karman ($\kappa = 0.41$)	—
λ_s	: conductivité thermique de la matrice solide	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
λ_{eff}	: conductivité effective du milieu poreux	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
λ_{max}	: longueur d'onde maximale	μm
ω_a	: humidité absolue de l'air	kg.kg^{-1}
ω_f	: humidité absolue de la feuille	kg.kg^{-1}
ϕ_{cond}	: densité de flux de chaleur conductif	W.m^{-2}
ϕ_{conv}	: densité de flux de chaleur convectif	W.m^{-2}
σ	: constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.669 \times 10^{-8}$)	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$
ϵ	: taux de dissipation de k	$\text{m}^2.\text{s}^{-3}$
\vec{r}	: vecteur de position	—

\vec{s}'	: vecteur de direction	—
B_0	: rayonnement PAR incident au-dessus du houppier	W.m^{-2}
B	: rayonnement PAR incident	W.m^{-2}
c_d	: coefficient de traînée	—
c_p	: capacité thermique massique de l'air	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
d_0	: hauteur de déplacement	m
D_m	: constante de diffusion ($D_m = 0.251 \times 10^4$)	$\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$
D	: déficit de pression de vapeur feuille-air	kPa
e_a	: moyenne journalière de la pression de vapeur d'eau	kPa
e_s	: moyenne journalière de la pression de saturation de l'eau	kPa
g_r	: conductance stomatique de référence	mm.s^{-1}
g_s	: conductance stomatique	mm.s^{-1}
G_{sc}	: constante solaire ($G_{sc} = 0.0820$)	$\text{MJ.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$
Gr	: nombre de Grashof	—
G	: densité de flux conductif du sol	$\text{MJ.m}^{-2}.\text{Jour}^{-1}$
g	: accélération de la gravité ($g = 9.81$)	m.s^{-2}
h_c	: coefficient de convection	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
$K \downarrow$: rayonnement solaire incident	W.m^{-2}
k_c	: coefficient cultural	—
k_L	: coefficient de paysage	—
k_{cb0}	: coefficient cultural sous conditions standard	—
k_{cb}	: coefficient cultural sous conditions courantes	—
$k_{density}$: coefficient de densité de plantation	—

k_{mc}	: coefficient du microclimat	—
k_{plant}	: coefficient de l'espèce de la plante	—
k	: énergie cinétique turbulente	$m^2.s^{-2}$
$L \downarrow$: rayonnement atmosphérique incident	$W.m^{-2}$
$L \uparrow$: rayonnement atmosphérique émis	$W.m^{-2}$
L_v	: chaleur latente de vaporisation de l'eau ($L_v = 2257 \times 10^3$)	$J.kg^{-1}$
LAD	: densité foliaire	$m^2.m^{-3}$
LAI	: indice foliaire foliaire	$m^2.m^{-3}$
M	: taux de transfert de chaleur par rayonnement (ou émittance)	$W.m^{-2}$
$P_{v,a}$: pression partielle de vapeur d'eau de l'air	Pa
Pr	: nombre de Prandtl	—
p	: pression partielle de l'air	Pa
Q^*	: rayonnement net absorbé	$W.m^{-2}$
Q_E	: flux de chaleur latente	$W.m^{-2}$
Q_F	: flux de chaleur d'origine anthropique	$W.m^{-2}$
Q_H	: flux de chaleur sensible	$W.m^{-2}$
Q_l	: flux volumique de chaleur latente	$W.m^{-3}$
Q_p	: rayonnement PAR incident	$\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
Q_s	: flux volumique de chaleur sensible	$W.m^{-3}$
Q	: quantité d'énergie stockée	J
r_a	: résistance aérodynamique	$s.m^{-1}$
R_g	: rayonnement global incident	$W.m^{-2}$
r_s	: résistance stomatique	$s.m^{-1}$

R_{g0}	: rayonnement global incident au-dessus du houppier	W.m^{-2}
R_{n-abs}	: rayonnement net absorbé par une cellule	W.m^{-3}
Re	: nombre de Reynolds	—
RH	: humidité relative	%
Ri	: nombre de Richardson	—
R	: constante des gaz parfaits ($R = 8.314$)	$\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
T_a	: température de l'air	K
T_f	: température de feuille	K
$u(z)$: vitesse longitudinale du vent à l'altitude z	m.s^{-1}
u_*	: vitesse de friction	m.s^{-1}
u_{ref}	: vitesse moyenne de l'air à la hauteur de référence	m.s^{-1}
z_0	: longueur de rugosité	m
z_{ref}	: hauteur de référence	m
z	: altitude	m

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte et enjeux scientifiques

Le changement climatique et ses conséquences sont parmi les plus grandes préoccupations mondiales de ce siècle. Des phénomènes météorologiques extrêmes (vagues de chaleur, fortes précipitations, sécheresses...) sont en effet de plus en plus fréquents. Les pics de chaleur à 50 °C enregistrés dans la Colombie-Britannique au Canada en juin 2021, les intempéries meurtrières survenues dans certains pays européens (Allemagne, Belgique, Autriche) en juillet 2021, l'incendie dans le Var (en France) provoqué par la sécheresse en août 2021 en sont des exemples concrets. Le changement climatique a également des conséquences sur la santé publique. Un rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a indiqué que le dérèglement climatique avait de multiples incidences sur la santé humaine car de nombreuses maladies sont hautement sensibles au changement des températures et du régime des précipitations.

En ville, un phénomène caractérisé par des températures d'air anormalement élevées dans les centres-villes et plus connu sous du phénomène de l'îlot de chaleur urbain (ICU) vient s'ajouter aux conséquences du dérèglement climatique. Ce phénomène de l'ICU est amplifié par l'urbanisation croissante et s'observe en particulier dans les centres-villes imperméabilisés où les façades des immeubles et les voies de circulation participent aux échanges radiatifs. L'effet de l'ICU se constate surtout en fin d'après-midi et pendant la nuit, lorsque les matériaux de construction et de revêtement de sol libèrent la chaleur qui a été accumulée pendant la journée. Les conséquences des îlots de chaleur urbains sur la santé humaine sont considérables. Ils ont en effet des impacts avérés sur la santé humaine soit directement (inconfort, faiblesse, troubles de conscience...) soit indirectement en fragilisant la santé des personnes souffrant de maladies chroniques (diabète, insuffisance respiratoire, maladie cardio-vasculaire, neurologie...) (ADEME, 2015). Les îlots de chaleur urbain ont des effets négatifs sur le confort thermique en ville et représentent donc un risque pour la santé publique. Combinés avec des épisodes caniculaires, les îlots de chaleur urbains peuvent augmenter les problèmes respiratoires et accroître donc la surmortalité. En effet, suite à l'épisode de canicule estivale de 2003, la surmortalité en France a été de 40% plus élevée dans les petites et moyennes villes, 80% plus élevée à Lyon 141% plus élevée à Paris que dans tout le reste de la France (Vandentorren et al.,

2004). Le changement climatique et ses conséquences amplifiées en milieu urbain affectent également le confort thermique des citoyens. Le confort thermique humain a des effets importants sur la santé et sur la productivité de l'Homme. Cela a été prouvé par de nombreux travaux de recherche dans ce domaine engagés durant les dernières décennies (Bassam, 2007). Comme nous pouvons le voir sur la FIGURE 1, la multiplicité des variables dont dépend le confort thermique humain fait qu'il est difficile de lui trouver une définition absolue. Givoni (1978) le définit cependant physiologiquement comme étant l'ensemble des conditions pour lesquelles les mécanismes de thermorégulation (sudation, vasodilatation, vasoconstriction) sont à un niveau d'activité minimale. Compte tenu des ser-

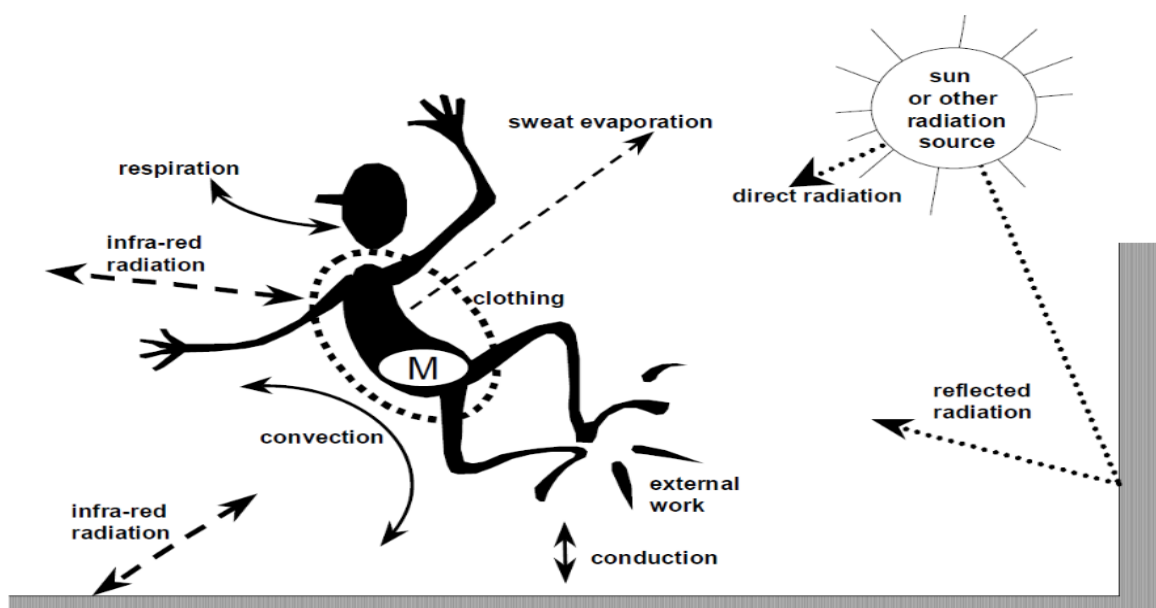


FIGURE 1 – Bilan thermique du corps humain (Havenith, 2005).

vices écosystémiques qu'ils procurent via leur transpiration et leur ombrage, les végétaux peuvent être une solution pour lutter contre le phénomène de l'îlot de chaleur urbain et, par conséquent, améliorer le confort thermique des habitants en ville. Le maintien des services écosystémiques climatiques que rendent les végétaux est cependant devenu un grand défi en milieu urbain en raison notamment de l'accroissement de la compétition pour les usages de l'eau (nécessaire à la transpiration des végétaux et à leur bon développement) et de la raréfaction de la ressource sous nos latitudes.

1.1.1 Croissance de l'urbanisation

La population mondiale a connu une très forte croissance depuis le début du 18^e siècle. Ce phénomène est en grande partie dû à la réduction des taux de mortalité grâce à l'amélioration des technologies médicales. Cette forte croissance du peuplement mondial s'accompagne aussi d'une forte croissance de l'urbanisation. Dans les pays développés, la croissance de l'urbanisation est souvent la conséquence d'un besoin de la population à habiter près de son lieu de travail ou des lieux de commerce. Dans les pays en développement, ce sont principalement la croissance de la démographie et l'exode rural qui contribuent à l'accroissement de l'urbanisation. [Kuddus and Rahman \(2015\)](#) définissent d'ailleurs l'urbanisation comme étant un processus de migration des populations des zones rurales vers les zones urbaines afin d'améliorer leurs conditions de vie. Au début du 20^e siècle, 15% de la population mondiale vivait dans des villes ([Susca et al., 2011](#)). En 2018, 55% de la population mondiale résidait dans des zones urbaines, et d'ici 2050, 68% de la population mondiale devrait être urbaine ([United Nations, 2018](#)). En Europe, le taux d'urbanisation était déjà de 74.5% en 2018 et une projection indique que ce taux atteindra 83.7% en 2050 ([United Nations, 2018](#)).

L'augmentation de la population urbaine entraîne l'expansion des villes et le remplacement de la végétation, du sol naturel et de la surface de l'eau par des surfaces imperméables telles que l'asphalte. L'impact de l'urbanisation sur l'environnement thermique urbain présente un intérêt particulier pour les scientifiques en raison, notamment, de son lien significatif avec les changements climatiques locaux ([Xiong et al., 2012](#)). Bien que ces derniers soient difficilement quantifiables, des études ont montré que les écarts de températures d'air dûs à l'urbanisation sont impactés par son intensification ([Bouyer, 2009](#); [Akbari, 1992](#)).

1.1.2 Phénomène d'îlot de chaleur urbain

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) se définit comme étant la différence de température de l'air entre le centre d'une ville et la zone rurale voisine, entre le coucher et lever du soleil. La dénomination "îlot de chaleur urbain" vient du fait que la représentation de l'évolution spatiale de la température d'air présente, comme le montre la FIGURE 2, un

pic de température semblable à celui d'un "îlot" au niveau des agglomérations (Bouyer, 2009). La surchauffe urbaine qui est un phénomène du microclimat local peut se définir de la même manière que le phénomène d'îlot de chaleur urbain, mais se produit à une échelle plus petite, à l'échelle d'une rue par exemple (ADEME, 2017). Le phénomène de

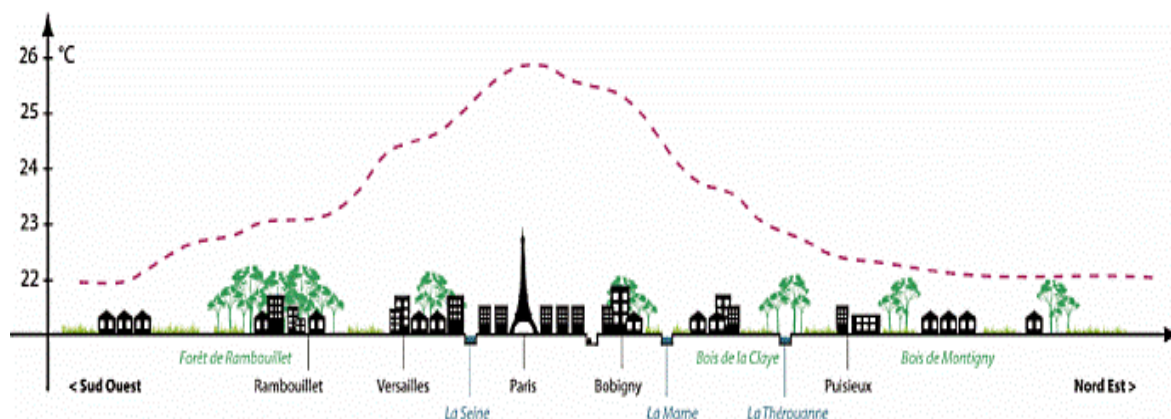


FIGURE 2 – Coupe schématique de visualisation des températures en 2008 pour une nuit de canicule, source : [notre-planete-info](http://notre-planete-info.fr).

l'ICU est considéré comme l'un des plus grands problèmes environnementaux du 21^e siècle causé par l'urbanisation et par l'industrialisation de notre société (Rizwan et al., 2008). Il a fait l'objet de plusieurs études au cours des dernières décennies. Des auteurs tels que Aboelata (2020); Arnfield (2003); Cantat (2004); Chen et al. (2006); Ridha (2017a); Rizwan et al. (2008); Santamouris et al. (2001); Weng et al. (2004); Yang et al. (2016) ont en effet mené des études approfondies sur les caractéristiques du phénomène de l'îlot de chaleur urbain et ont constaté que les effets de celui-ci en termes d'intensité (différence de températures d'air entre le centre de la ville et la zone rurale voisine) notamment sont étroitement liés aux propriétés thermiques et radiatives des surfaces en ville, à la faible couverture végétale, à la densité de la population, au dégagement de chaleur en ville... et varient donc d'un endroit à l'autre. L'intensité de l'ICU peut dépasser les 10 °C pour la ville d'Athènes (Santamouris et al., 2001) et les 11 °C pour la ville de Paris (Cantat, 2004).

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain est principalement causé par des paramètres inhérents au milieu urbain que sont la forme urbaine (paramètres morphologiques), l'oc-

cupation du sol (eau végétaux, ou revêtement minéral perméable ou imperméable) et la concentration d'activités humaines (paramètres anthropologiques). En effet, la réduction de la vitesse des vents liée à la rugosité urbaine, l'absorption et le stockage du rayonnement solaire pendant la journée liée à l'utilisation de matériaux de faibles albédos et à forte capacité thermique, la faible restitution de la chaleur vers l'atmosphère en raison d'un faible facteur de vue du ciel (phénomène de piégeage radiatif), la faible évapotranspiration liée au remplacement de la végétation, de l'eau et du sol naturel par des surfaces imperméables, les émissions de chaleur liées aux activités humaines... sont autant de facteurs qui justifient des températures d'air parfois anormalement élevées dans les centres-villes. Les grands bâtiments participent également au phénomène d'îlot de chaleur urbain car, si d'une part ils permettent de créer de l'ombrage et donc de réduire la part du rayonnement solaire qui arrive au sol pendant la journée, d'autre part, ils peuvent non seulement augmenter la superficie de surface absorbant le rayonnement solaire (lorsqu'ils sont construits avec des matériaux de faibles albédos), mais aussi réduire le facteur de vue du ciel pour les échanges de rayonnement grandes longueurs d'onde pendant la nuit.

Pour (Rizwan et al., 2008), l'îlot de chaleur urbain est la réponse mutuelle de plusieurs facteurs qui peuvent être répartis entre ceux qui sont contrôlables et ceux qui ne le sont pas (FIGURE 3). Ces auteurs considèrent aussi que les facteurs contrôlables et ceux qui sont incontrôlables peuvent être classés en trois classes : variables à effet temporaire (vitesse du vent, couverture nuageuse...), variables à effets permanents (végétation, matériau, facteur de vue du ciel...) et variables à effets cycliques comme le rayonnement solaire et la source de chaleur anthropique.

Pour réduire les effets des ICU, on peut donc agir sur un ensemble de leviers, tels que : favoriser la ventilation naturelle et limiter la climatisation électrique, préférer les matériaux de construction réfléchissants aux matériaux de construction absorbants de manière à augmenter l'albédo urbain, végétaliser ou reboiser les villes et leurs abords, mieux conserver et gérer l'eau pluviale (cette eau peut être rééaporée, l'évaporation étant un facteur de rafraîchissement), désimperméabiliser les sols etc.

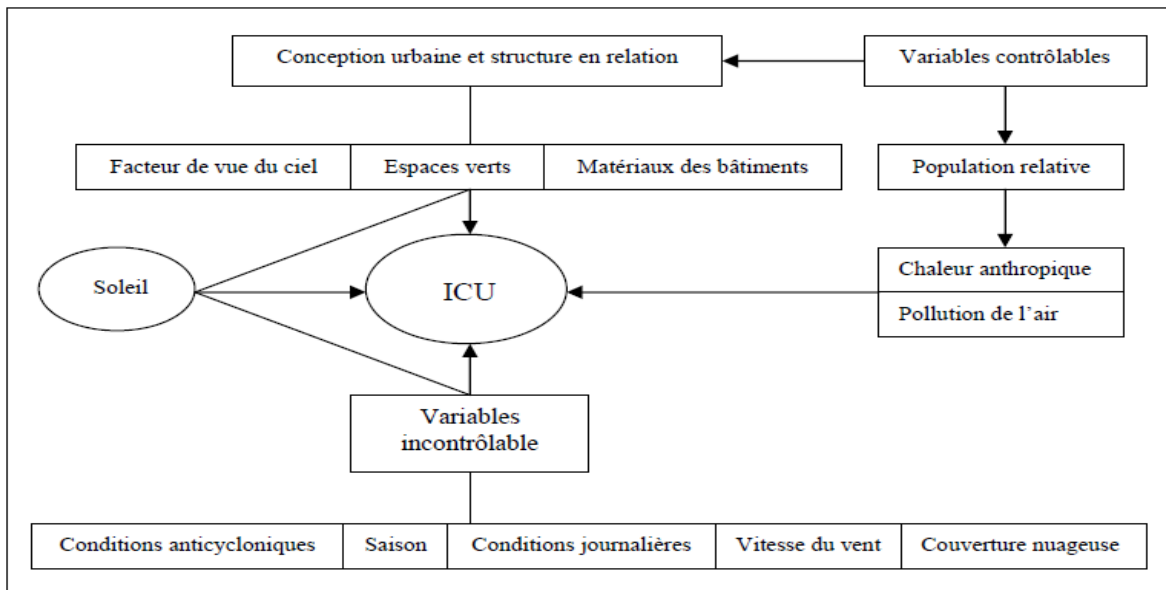


FIGURE 3 – Formation de l’îlot de chaleur urbain (Rizwan et al., 2008).

1.1.3 La végétation, un moyen de remédiation contre l’ICU

Les végétaux occupent une place de plus en plus importante dans les politiques d’aménagement des villes en raison des services écosystémiques climatiques qu’ils assurent. Outre leur valeur esthétique, leur fonction paysagère voire sociologique, l’utilisation des arbres permet de modifier le climat local et peut contribuer à améliorer les conditions de confort thermique (Bouyer, 2009). La végétation permet de rafraîchir l’air grâce à l’ombrage qu’elle peut créer et à la transpiration. Les effets de la végétation ne sont pas toujours identiques car ils dépendent du type de végétalisation utilisé, de la nature des végétaux (Colombert, 2008), et de l’environnement urbain dans lequel cette végétation est présente, ainsi que des conditions de satisfaction de leurs besoins en eau.

Deux grandes familles de végétation se retrouvent en milieu urbain : la végétation haute et la végétation basse. La végétation haute (arbre par exemple) permet de rafraîchir l’air à hauteur d’homme grâce à la transpiration du végétal et à l’évaporation du sol associé s’il n’est pas scellé d’une part, et grâce à l’ombrage d’autre part (atténuation du rayonnement direct et du rayonnement diffus). La végétation basse (pelouse par exemple) permet

elle aussi de rafraîchir l'air mais uniquement via le phénomène d'évapotranspiration puisqu'elle ne produit pas d'ombrage. Dans cette thèse, les arbres d'alignement de rue ont été choisis comme moyen de végétalisation pour pouvoir bénéficier des effets d'ombrage, et parce qu'ils sont mieux adaptés sur une rue en matière d'installation. En effet, dans les grandes villes, l'espace au sol étant déjà construit, il est difficile de créer de nouveaux grands parcs, alors que les arbres d'alignement, au contraire, ne demandent que peu d'espace au sol (pour contenir les fosses de plantation) et peuvent ainsi être installés au cœur des villes et au plus proche des habitations.

1.1.4 Typologie urbaine et rue canyon

Le monde urbain est constitué de plusieurs échelles spatiales : le bâtiment, la rue, l'îlot, le quartier, la ville, l'agglomération etc. Dans certains centres-villes, on rencontre surtout des rues canyon. En milieu péri-urbain, on rencontre également d'autres morphologies de base comme les cubes ou les pavés.

Une rue canyon, entre autres définitions, est une rue droite bordée en continu par de grands bâtiments de hauteurs similaires (FIGURE 5). Depuis les travaux pionniers de (Nakamura and Oke, 1988), les rues canyon sont une configuration emblématique de la recherche en microclimat urbain sur laquelle de nombreuses données sont disponibles. Elles sont des endroits idéaux pour observer différents phénomènes mis en jeu dans le phénomène d'îlot de chaleur urbain tels que l'effet d'abri du vent (lorsque le vent souffle perpendiculairement à la rue) et le piégeage radiatif (résultant de l'absorption et de la réflexion du rayonnement solaire pendant la journée, et de la rétention du rayonnement grandes longueurs d'onde pendant la nuit). Les rues canyon sont également considérées comme une géométrie de référence dans les outils de modélisation. Dans la littérature, trois configurations de rue canyon (schématisées sur la FIGURE 4) ont été étudiées : la rangée de rues qui correspond à la configuration la plus commune des centres-villes et qui a beaucoup été utilisée dans les études en soufflerie (Huang et al., 2016; Pavageau and Schatzmann, 1999; Salizzoni et al., 2009; Tan et al., 2018; Uehara et al., 2000), la rue isolée qui représente l'unité d'étude de base pour les études expérimentales (Athamena et al., 2018; Garcia Sagrado et al., 2002; Gromke et al., 2008; Idczak et al., 2007; Kastner-

(Klein et al., 2001; Perret et al., 2016) et qui peut également être présente en centre-ville (particulièrement sur les rues de boulevard bordées d'immeubles hauts et adjacentes à des îlots constitués de maisons de moindre hauteur) et la rue cavité qui constitue une simplification du tissu urbain souvent adoptée pour les études numériques (Kim and Baik, 2001; Kumar et al., 2009; Madalozzo et al., 2014; Moonen et al., 2011; Xiaomin et al., 2006; Zhang et al., 2011).

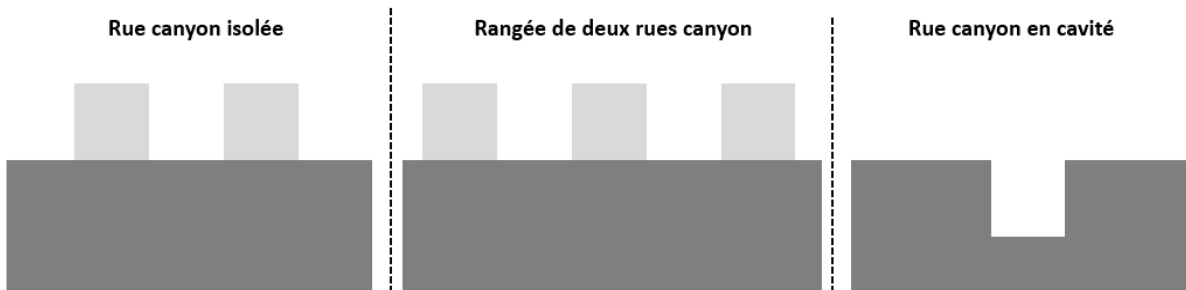


FIGURE 4 – Les différentes configurations de rues canyon.

Les rues canyon sont généralement définies par leur rapport d'aspect et l'orientation de leur axe principal. Le rapport d'aspect (RA) correspond au rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur de la rue (ou l'inverse selon les auteurs). Son expression mathématique est donnée par l'équation :

$$RA = \frac{H}{W} \quad (1)$$

où H est la hauteur des bâtiments en (m) et W la largeur des bâtiments en (m). Une rue canyon est appelée rue régulière lorsque la hauteur des bâtiments est égale à la largeur de la rue, avenue canyon lorsque sa largeur fait au moins deux fois la hauteur des bâtiments, et canyon profond lorsque la hauteur des bâtiments fait au moins deux fois sa largeur.

Dans le cadre du travail de thèse, nous avons choisi de centrer notre étude sur une rue canyon. Ce choix se justifie par le fait que, comme mentionné plus haut, les rues canyon sont représentatives des centres-villes et le phénomène de l'ICU est plus intense en centre-ville. Le choix de cette typologie de rue comme objet d'étude est également lié au fait que cette dernière a une géométrie relativement simple et que, par conséquent, la mise



FIGURE 5 – Photographie du canyon urbain (Rue de l’Argone à Strasbourg) issue de l’étude de (Najjar et al., 2005).

en place d’un modèle numérique sera plus simple. La rue canyon est par ailleurs une configuration emblématique qui a été largement étudiée dans la littérature et sur laquelle de nombreuses données sont disponibles. Ces études serviront à étayer nos recherches.

1.2 Questionnements scientifiques et hypothèses

Compte tenu du contexte exposé précédemment et des enjeux, nous nous proposons, dans cette thèse, d’apporter des réponses aux questionnements scientifiques suivants :

- Quel est l’impact du milieu urbain sur le microclimat ?
- Quel est l’impact des arbres en confort hydrique sur le microclimat urbain ?
- Est-il possible de mettre en place un outil numérique permettant de prédire les deux phénomènes évoqués précédemment ?

Pour apporter des éléments de réponse aux questionnements scientifiques qui font l’objet de cette thèse, un certain nombre d’hypothèses seront posées. Dans un premier temps,

nous supposons que les arbres contribuent au rafraîchissement de l'air via leur transpiration et à l'ombrage qu'ils procurent après avoir réfléchi et absorbé une partie du rayonnement solaire incident. Dans un second temps, nous supposons qu'il est possible de simuler les interactions entre les arbres et leur environnement local.

1.3 Organisation du document

Ce document se structure en plusieurs chapitres. Le **Chapitre 2** présente une description des mécanismes biophysiques en milieu urbain. Le **Chapitre 3** est consacré à la formalisation mathématique des différents phénomènes mis en jeu dans le cadre de cette thèse. Le sous-modèle radiatif et le sous-modèle de culture sont présentés dans ce chapitre. Le **Chapitre 4** aborde la description et l'instrumentation du dispositif expérimental. Le **Chapitre 5** s'intéresse à la présentation des résultats expérimentaux. Il est composé de deux grandes parties. La première partie est dédiée à la présentation des résultats pour des journées individuelles. La deuxième partie traite les données moyennées sur plusieurs journées. Le **Chapitre 6** présente la mise en oeuvre du modèle de climat distribué. Les résultats issus des simulations numériques sont également présentés dans ce chapitre. Ce document se termine par le **Chapitre 7** dans lequel sont présentées les principales conclusions et les différentes valorisations scientifiques des travaux de la thèse. Le prolongement des travaux de la thèse est également abordé dans ce dernier chapitre.

Chapitre 2

Description des mécanismes biophysiques en milieu urbain

2.1 Aéraulique

Le milieu urbain est le siège de nombreux phénomènes physiques. La circulation d'air, les transferts d'énergie et de masse y sont généralement complexes. Les processus climatiques et microclimatiques sont dus à des transferts d'énergie et de masse (Oke, 1988). Les rues, les bâtiments et les arbres constituent, parmi d'autres exemples, des éléments isolés du tissu urbain ayant un impact sur le mouvement du vent à proximité du sol. Dans cette partie du document, nous nous proposons de décrire l'écoulement du vent dans la couche limite urbaine avant de faire le focus sur la rue canyon.

2.1.1 Écoulement dans la couche limite urbaine

L'atmosphère terrestre est composée de plusieurs couches : la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère. On appelle couche limite atmosphérique (CLA), la partie de la troposphère en contact avec la surface terrestre, directement influencée par la présence de celle-ci. Son épaisseur peut aller de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres en fonction des conditions météorologiques, du type de sol etc. Son étude permet, entre autres, de faire des prévisions sur les températures et sur les vents. L'écoulement d'air dans la CLA peut aussi être modifié par des phénomènes thermiques liés notamment à l'ensoleillement (Bozonnet et al., 2011).

La couche limite urbaine (CLU) est un cas particulier de la couche limite atmosphérique quand l'air circule au-dessus d'une ville. Pour faciliter son analyse, la couche limite urbaine est subdivisée en zones dynamiques disparates qui comprennent (FIGURE 6) : la couche de canopée urbaine (UCL) qui s'étend jusqu'aux toits des bâtiments et qui est dominée par la production et le transport de l'énergie cinétique turbulente, la sous-couche de rugosité (RSL) d'une épaisseur généralement comprise entre et 2 et 5 fois la hauteur moyenne des bâtiments et dans laquelle les phénomènes de production et de dissipation de l'énergie cinétique turbulente sont en équilibre, la sous-couche inertielle (CFL) qui est une région horizontalement homogène située au-dessus de la hauteur des bâtiments et dans laquelle les flux verticaux (de chaleur sensible et de chaleur latente notamment) sont constants et la couche mélangée située au-dessus de la zone à flux constants et qui est dominée par la production de l'énergie cinétique turbulente (Fernando, 2010).

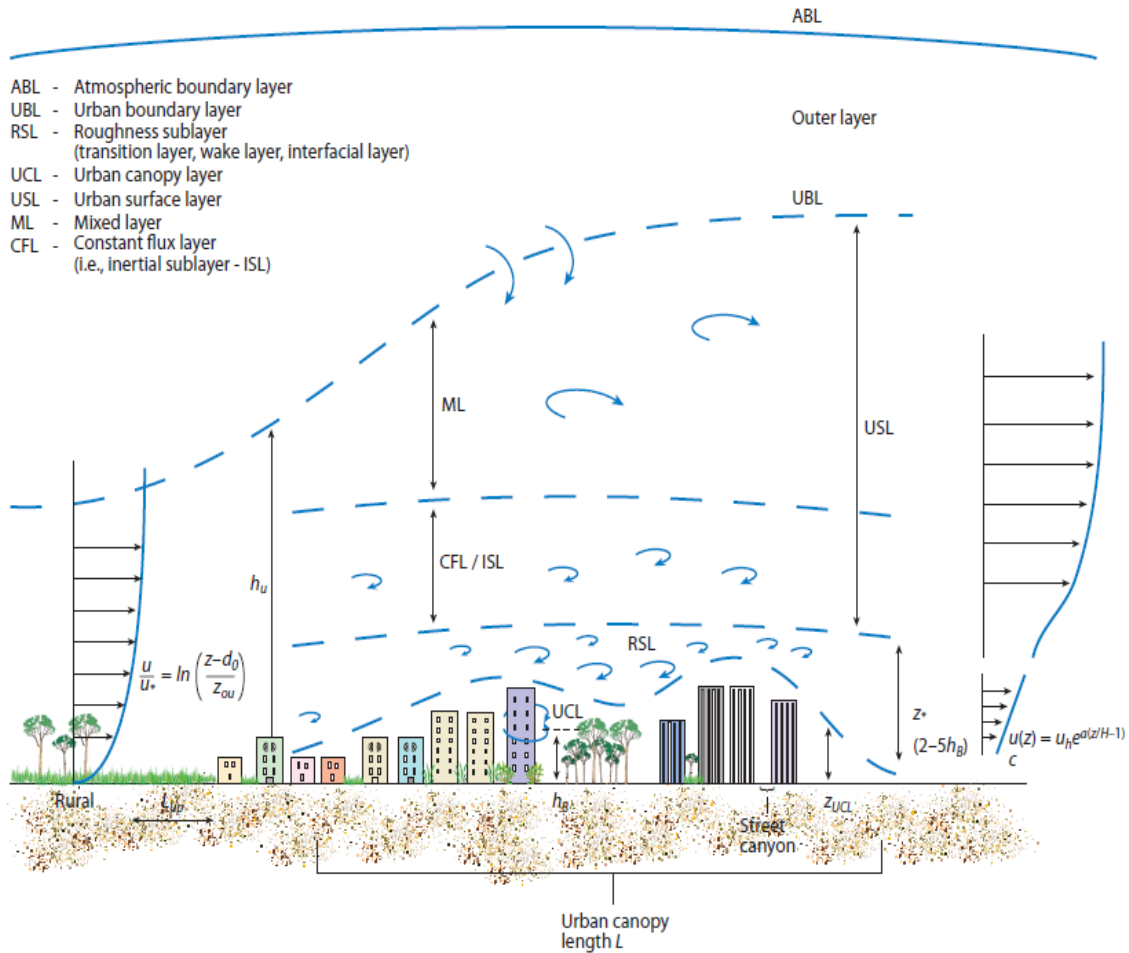


FIGURE 6 – Différentes zones de la couche limite urbaine (Fernando, 2010). La forme logarithmique typique de la vitesse incidente (d_0 et z_0 étant respectivement les hauteurs de déplacement et de rugosité) est présentée. Ici, a est un coefficient d'atténuation, u_h est la vitesse incidente à la hauteur moyenne de la canopée h_B . Le profil de vitesse dans la couche à flux constant est également logarithmique, et présente des similarités avec une couche limite de paroi rugueuse.

Un passage en revue de la littérature a permis de constater que le profil de vitesse moyenne longitudinale du vent a un impact sur la nature de l'écoulement (Blom, 1968; Seguin, 1973; Seguin and Gignoux, 1974). Il existe deux catégories de lois pour le profil

de vitesse moyenne : profil en loi puissance et profil en loi logarithmique. La première est empirique et, est assez utilisée en météorologie. Il existe plusieurs expressions disponibles dans la littérature pour cette loi. L'expression la plus utilisée en météorologie est :

$$\frac{u(z)}{u_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (2)$$

$u(z)$ est la vitesse longitudinale moyenne du vent à l'altitude z en (m.s^{-1}), z_{ref} est la hauteur de référence (qui est généralement égale à 10 m ou à 6 m) en (m), u_{ref} est la vitesse moyenne de l'air à la hauteur de référence en (m.s^{-1}). L'exposant α est un paramètre qui varie suivant la rugosité du terrain. Sa valeur est comprise entre 0.08 et 0.12 pour les surfaces légèrement rugueuses, entre 0.12 et 0.18 pour les surfaces modérément rugueuses, entre 0.18 et 0.24 pour les surfaces rugueuses et entre 0.24 et 0.4 pour les surfaces très rugueuses (Balczó, 2014; Guidelines VDI 3783, 2000).

La deuxième loi est théorique et suit un profil logarithmique, mais elle n'est valable que dans la sous-couche inertielle présentée plus haut. Le profil logarithmique a été largement utilisé dans la littérature, en particulier, pour les études numériques CFD (Baik et al., 2012, 2007; Kwak et al., 2013; Moonen et al., 2011). Il existe plusieurs expressions mathématiques pour cette loi. Une des expressions les plus utilisées est :

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z - d_0}{z_0} \right) \quad (3)$$

$u(z)$ est la vitesse longitudinale moyenne du vent à l'altitude z en (m.s^{-1}), u_* est la vitesse de friction en (m.s^{-1}), κ est la constante de Von Karman ($\kappa = 0.41$), d_0 est la hauteur de déplacement (décrivant le déplacement vers le haut de la couche limite en raison de la densité de la zone bâtie) en (m), z_0 est la longueur de rugosité (caractérisant la hauteur et la densité des obstacles en surface) en (m). Comme pour l'exposant α de la loi en puissance, les valeurs de d_0 et de z_0 varient également suivant la rugosité du terrain comme on peut le voir sur la TABLE 1.

	Lisse	Modérément rugueux	Rugueux	Très rugueux
z_0 [m]	$10^{-5} - 5.10^{-3}$	$5.10^{-3} - 10^{-5}$	0.1 – 0.5	0.5 - 2
α [-]	0.08 – 0.12	0.12 – 0.18	0.18 – 0.24	0.24 – 0.4
d_0 [m]	0	0	0.75h	0.75h

TABLE 1 – Valeurs de α , de d_0 et de z_0 en fonction de la rugosité du terrain (Balczó, 2014; Guidelines VDI 3783, 2000). h est la la hauteur moyenne des bâtiments.

2.1.2 Écoulement dans la rue canyon

La rue canyon est l'unité de base des structures urbaines (Idczak et al., 2007). Un examen approfondi et une bonne compréhension du climat dans une canyon peut permettre d'améliorer les aménagements (végétalisation notamment) pour améliorer le confort des habitants. La circulation d'air autour et dans une rue canyon est fortement influencée par la forme des toits des bâtiments (Allegrini, 2018), par le rapport d'aspect de la rue (Oke, 1988), par la répartition des bâtiments (Oke, 1988) et par l'orientation du vent par rapport à la rue (Eliasson, 1996). Les régimes d'écoulement dans les rues canyon urbaines peuvent être catégorisés en écoulement de rugosité isolée, en écoulement d'interférence de sillage et en écoulement rasant, selon le rapport d'aspect de la rue canyon et de l'uniformité de la hauteur des bâtiments (Oke, 1988). Les caractéristiques des trois différents régimes d'écoulement sont schématisées sur la FIGURE 7. Ces régimes d'écoulement sont déterminés par le degré d'interaction entre le tourbillon généré derrière le bâtiment au vent et le bâtiment sous le vent (Oke, 1988; Hunter et al., 1992; Hussain and Lee, 1980). La FIGURE 8 établit un lien entre le type d'écoulement à l'intérieur d'une rue canyon et son rapport d'aspect ainsi que le rapport entre la longueur et la hauteur des bâtiments. On peut y voir que l'écoulement est "rasant" pour des rues canyon de rapport d'aspect égal à 1 (comme c'est le cas avec notre rue canyon qui sera présentée dans dans le **Chapitre 4**).

Un autre facteur qui influence l'écoulement dans la rue canyon est le rapport des forces d'inerties et des des forces de viscosité, qui est caractérisé par nombre de Reynolds. Le nombre de Reynolds est en effet un nombre sans dimension qui permet de comparer les

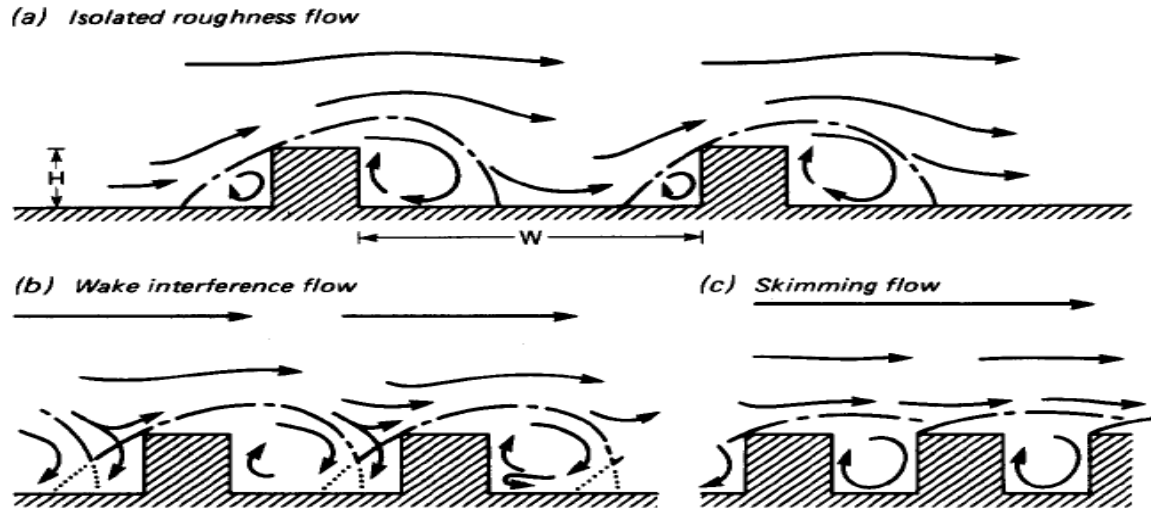


FIGURE 7 – Régimes d'écoulement dans une rue canyon (Oke, 1988).

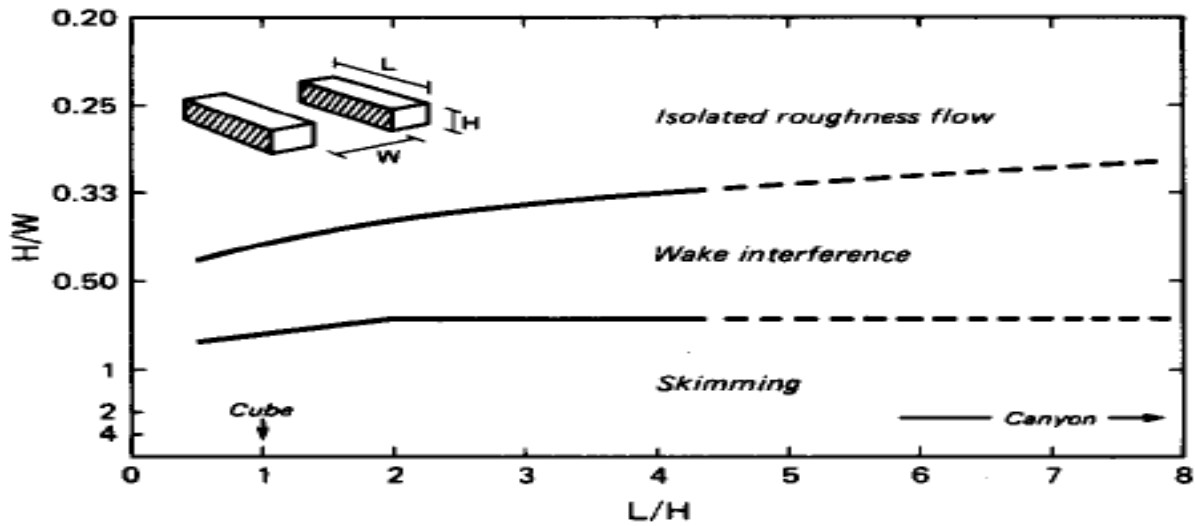


FIGURE 8 – Régimes d'écoulement dans une rue canyon en fonction de son rapport d'aspect et de son rapport de longueur (Oke, 1988).

forces d'inertie aux forces de viscosité. Il est mathématiquement défini par l'équation (68) qui est présentée dans le **Chapitre 3**. On dit qu'un écoulement est laminaire si la valeur du nombre de Reynolds est inférieure à une certaine valeur critique. Cette valeur critique

dépend du type d'écoulement. Elle vaut par exemple 2000 pour les écoulements dans une conduite cylindrique rectiligne et 11000 pour les écoulements autour d'obstacles à arêtes vives (Snyder, 1972). Au-delà de cette valeur seuil, l'écoulement devient turbulent.

2.2 Échanges énergétiques

Le bilan énergétique sur une surface urbaine s'écrit (Oke, 1988) :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S (+\Delta Q_A) \quad (4)$$

où Q^* est le rayonnement net, Q_F le flux de chaleur artificiel (d'origine anthropique), Q_H le flux de chaleur sensible, Q_E le flux de chaleur latente, ΔQ_S la variation de la quantité de chaleur stockée par la zone urbaine, ΔQ_A est le flux de chaleur advectif. Tous les termes sont exprimés en ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Le flux de chaleur advectif est dû au gradient spatial longitudinal de température, d'humidité et de vent. Ce flux de chaleur est considéré comme négligeable pour les sites ayant une forme horizontale étendue et relativement homogène (Roberts et al., 2003) et est donc souvent négligé pour les études sur les milieux urbains. L'intensification de l'urbanisation modifie le bilan énergétique sur une ville (Escourrou, 1991). L'impact de l'urbanisation sur les différents termes du bilan d'énergie est discuté dans les paragraphes qui suivent.

Comme on peut le voir sur la FIGURE 9, le bilan énergétique est réalisé à l'échelle du quartier, mais le principe et les types de flux impliqués restent les mêmes à l'échelle de la rue. Comme pour tout autre système, les matériaux dans les rues canyon échangent de l'énergie. En l'absence de transferts latents, il existe trois modes de transfert de l'énergie : la conduction, la convection et le rayonnement.

2.2.1 Conduction

La conduction thermique (ou diffusion thermique) est un mode de transfert de chaleur (sans transport de matière) provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu, ou entre deux milieux en contact. La loi de Fourier indique que la densité de flux de chaleur par conduction est proportionnelle au gradient de température

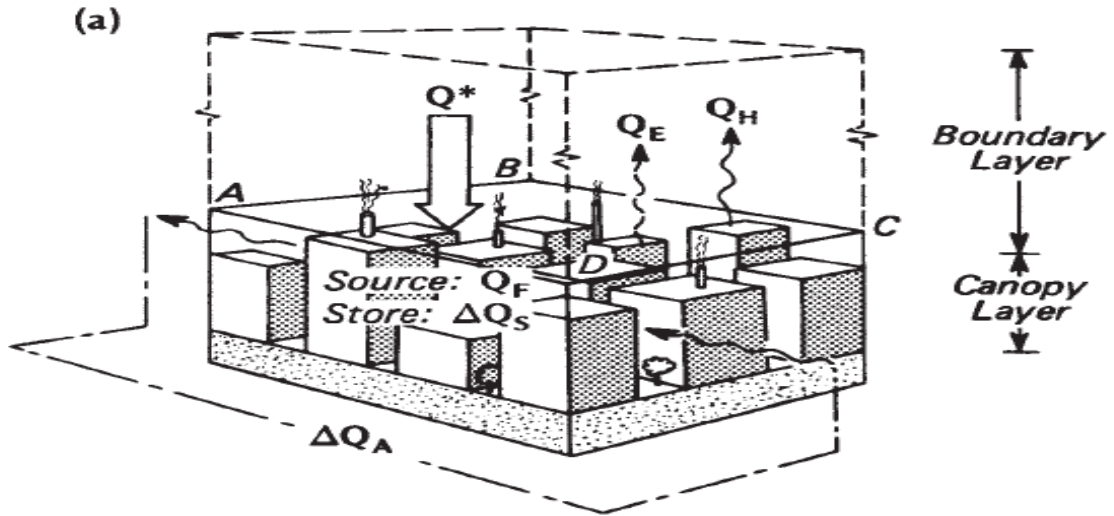


FIGURE 9 – Description du bilan énergétique pour une zone urbaine (Oke, 1988). Q^* est le rayonnement net, Q_F est le flux de chaleur artificiel (d'origine anthropique), Q_H est le flux de chaleur sensible, Q_E est le flux de chaleur latente, ΔQ_S est la variation de la quantité de chaleur stockée par la zone urbaine, ΔQ_A est le flux de chaleur advectif.

et s'écrit :

$$\vec{\phi}_{cond} = -\lambda \vec{\nabla} T \quad (5)$$

$\vec{\phi}_{cond}$ est le flux de chaleur conductif en (W.m^{-2}), λ est la conductivité thermique du matériau et s'exprime en ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), $\vec{\nabla} T$ est le gradient de température en (K.m^{-1}).

Une autre propriété physique qui est importante dans la compréhension du phénomène de l'îlot urbain est la chaleur spécifique (ou capacité thermique massique). Cette propriété traduit la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur. En effet, la quantité d'énergie (ou de chaleur) stockée par un corps est proportionnelle au produit de la masse de ce corps par la différence de température de celui-ci entre son état initial et son état final en vertu de la relation :

$$Q = mc_p \Delta T \quad (6)$$

où Q est la quantité de d'énergie (ou de chaleur) stockée en (J), m est la masse du corps en (kg), c_p est la capacité thermique massique du matériau et s'exprime en ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$),

ΔT est l'écart de température du matériau entre son état final et son état initial en (K).

Dans une rue canyon, les transferts de chaleur par conduction ont principalement lieu dans le sol, dans les murs et dans les toits. L'énergie stockée par les matériaux est restituée vers le milieu ambiant pendant la nuit sous forme de rayonnement infrarouge. Les matériaux de construction sont donc un facteur aggravant le phénomène de l'îlot de chaleur urbain. Dans la TABLE 2, on peut constater que les matériaux qui se rencontrent le plus souvent en milieu urbain (asphalte, béton) ont des conductivités thermiques et capacités thermiques massiques plus importantes que celles des matériaux rencontrés en milieu rural (sol sec, sable).

	Asphalte	Béton	Sol sec	Sable
Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	0.74	1.69	0.04	0.07
Chaleur spécifique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	1420	2070	1150	610

TABLE 2 – Propriétés thermiques de quelques matériaux ([Asaeda et al., 1996](#)).

2.2.2 Convection

La convection thermique est un mode de transfert de chaleur qui implique un déplacement de matière dans le milieu. La loi de Newton indique que pour un écoulement à une température T_∞ autour d'une surface de température T_w , l'expression de la densité de flux de chaleur convectif est donnée par la relation :

$$\phi_{conv} = h_c (T_w - T_\infty) \quad (7)$$

ϕ_{conv} est la densité de flux de chaleur convectif en (W.m^{-2}), h_c est le coefficient de convection et s'exprime en ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), T_w est la température de la paroi en (K), T_∞ est la température de l'écoulement loin de la paroi en (K).

Le coefficient d'échange convectif dépend non seulement de la vitesse d'écoulement du fluide, mais aussi de certaines propriétés physiques du fluide telles que la conductivité thermique, la masse volumique, la viscosité cinématique (ou dynamique) etc. Il dépend aussi des caractéristiques de la paroi (ses dimensions, sa nature, sa forme...). Pour évaluer

sa valeur, on fait souvent appel au nombre de Nusselt qui est un nombre sans dimension caractérisant l'importance de la convection par rapport à la conduction. L'expression du nombre de Nusselt fait intervenir d'autres nombres adimensionnels comme le nombre de Prandtl, le nombre de Grashof et le nombre de Reynolds et dépend de la nature de l'écoulement et du régime de convection (voir **Chapitre 3** pour plus de détails sur les différentes expressions possibles pour le nombre de Nusselt). Pour déterminer le régime de convection d'un écoulement, on peut également utiliser le nombre de Richardson qui est présenté dans le **Chapitre 5**, dans la section 5.1.2.3.

2.2.3 Rayonnement

Le rayonnement thermique représente, avec la conduction et la convection, l'un des modes de propagation de l'énergie thermique. Le rayonnement est un mode de propagation de l'énergie impliquant une onde ou une particule. Il se distingue des deux autres modes de propagation de l'énergie thermique par le fait qu'il ne nécessite pas la présence d'un milieu matériel intermédiaire. La quantité d'énergie émise par un corps par rayonnement peut être déterminée grâce à la loi de Stefan-Boltzmann. Celle-ci stipule en effet que le taux de transfert de chaleur par rayonnement (M) d'un corps à son environnement est proportionnel à la puissance quatrième de sa température absolue (T) et peut être exprimé grâce à la relation :

$$M = \epsilon\sigma T^4 \quad (8)$$

M est le taux de transfert de chaleur par rayonnement (ou émittance) en W.m^{-2} , ϵ est l'émissivité du corps (compris entre 0 et 1 : 0 pour les corps parfaitement réfléchissants, 1 pour les corps noirs), $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ est la constante de Stefan-Boltzmann.

L'émissivité d'un corps se définit comme étant la capacité de ce corps à émettre de la chaleur de manière radiative. Elle correspond au flux radiatif de rayonnement thermique émis par un élément de surface à température donnée, rapportée à la valeur de référence qu'est le flux émis par un corps noir à cette même température. En fonction du spectre dans lequel il est émis, un rayonnement peut être qualifié de courtes longueurs d'onde ou de grandes longueurs d'onde (voir **Chapitre 3**). La loi de déplacement de Wien

indique qu'une augmentation de la température d'un corps produit un déplacement du rayonnement qu'il émet vers les courtes longueurs d'onde selon la relation :

$$\lambda_{max}T = 2898 \text{ } \mu\text{m.K} \quad (9)$$

λ_{max} est la longueur d'onde maximale en (μm), T est la température du corps en (K).

Le rayonnement solaire, source d'énergie piégée par la géométrie urbaine, est une composante essentielle du microclimat urbain. Il se définit comme étant l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Une grande partie du rayonnement solaire est émise dans des longueurs d'onde comprises entre 0.25 et 2.5 μm . C'est pour cette raison qu'il est parfois qualifié de «rayonnement de courtes longueurs d'onde». Si on considère un objet à la surface de la terre (un bâtiment par exemple), le rayonnement solaire incident, aussi appelé le rayonnement global, peut avoir suivi différents cheminements avant de parvenir à la surface de l'objet concerné : d'abord, il y a une première composante appelée «rayonnement direct» qui représente le rayonnement qui provient directement du soleil, en ligne droite ; ensuite, il y a une partie du rayonnement provenant de toutes les directions de l'hémisphère céleste qui est diffusée au sein de l'atmosphère (par les molécules de gaz ou par les aérosols) et qui finit par atteindre l'objet placé à la surface du sol ([Kastendeuch et al., 2006](#)). Le rayonnement solaire incident est parfois appelé "rayonnement global" et se mesure à l'aide d'un pyranomètre ou d'un bilanmètre. Il représente la somme du rayonnement direct projeté sur la verticale de la surface considérée et du rayonnement diffus. Les parts relatives des rayonnements direct et diffus dans le rayonnement global dépendent de l'ensoleillement de la journée. Pour une journée ensoleillée par exemple, on estime que le rayonnement global est constitué de 90% de rayonnement direct et de seulement 10% de rayonnement diffus. En journée nuageuse, le rayonnement global se compose essentiellement d'un rayonnement diffus.

Le pouvoir réfléchissant d'une surface se mesure par son albédo qui désigne le rapport du rayonnement réfléchi par une surface naturelle au rayonnement incident de courte longueur d'onde. Sa valeur s'exprime soit en pourcentage du rayonnement réfléchi par rapport à une quantité réfléchie, soit par une valeur comprise entre 0 et 1, qui correspond à la fraction du rayonnement réfléchi. Sa valeur vaut 1 pour une surface parfaitement

réfléchissante comme un miroir par exemple et 0 pour un absorbeur parfait comme un corps noir par exemple.

La TABLE 3 permet de voir que les matériaux rencontrés en milieu urbain comme le goudron ont, dans la plupart des cas, des coefficients d'absorption plus importants (et donc des albédos plus faibles) que les matériaux rencontrés en milieu naturel (herbe verte, herbe haute, feuille de chêne...). Les matériaux utilisés en milieu urbain sont généralement opaques au rayonnement solaire, et ont donc une transmission nulle. Le milieu urbain absorbe donc plus de chaleur que ne le fait un milieu naturel. Cette différence de comportement vis-à-vis du rayonnement solaire pendant le jour est une des causes du phénomène de l'îlot de chaleur urbain.

	Coefficient d'absorption (m^{-1})	Albédo
Goudron	0.93	0.07
Sol nu	0.75	0.25
Sol sec	0.82	0.18
Sable humide	0.91	0.09
Herbe verte humide	0.67	0.33
Herbe haute et sèche	0.87 - 0.89	0.11 - 0.13
Feuille de chêne	0.71 - 0.78	0.22 - 0.29

TABLE 3 – Propriétés radiatives de quelques matériaux (Mazria, 1981).

Pendant la journée, les surfaces urbaines sont soumises, au niveau du sol, à un rayonnement solaire direct moins important que les surfaces rurales en raison de l'ombrage provoqué par les bâtiments. Les surfaces urbaines sont en revanche plus soumises à des rayonnements solaires réfléchis et infrarouges que les surfaces en milieu rural en raison du phénomène de piégeage radiatif. Le piégeage radiatif consiste en l'absorption progressive des flux radiatifs issus des réflexions multiples sur les parois des bâtiments et sur le sol qui ne sont pas systématiquement redirigées vers le ciel (Bouyer, 2009). Le bilan radiatif au-dessus d'une ville varie en fonction du moment de la journée. En effet, le rayonnement

solaire global n'intervient dans le bilan radiatif que pendant la journée. Pendant la nuit, le rayonnement net est simplement la différence entre le rayonnement atmosphérique incident et le rayonnement grandes longueurs d'onde émis par le milieu considéré.

Le milieu urbain est également le siège d'échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde. En effet, le rayonnement émis par l'atmosphère, le sol et les plantes modifie également le bilan radiatif dans une ville. Le bilan radiatif d'une surface exprime la quantité de rayonnement absorbée par cette surface et la quantité de rayonnement émise vers l'atmosphère (FIGURE 10). Il s'écrit (Colombert, 2008) :

$$Q^* = L \downarrow - L \uparrow + (1 - \alpha) K \downarrow \quad (10)$$

où Q^* est le rayonnement net en ($W.m^{-2}$), $L \downarrow$ le rayonnement atmosphérique incident en ($W.m^{-2}$), $L \uparrow$ le rayonnement de grande longueur d'onde émis par le milieu considéré en ($W.m^{-2}$), $K \downarrow$ le rayonnement solaire global incident sur une surface horizontale en ($W.m^{-2}$), α est l'albédo de la surface.

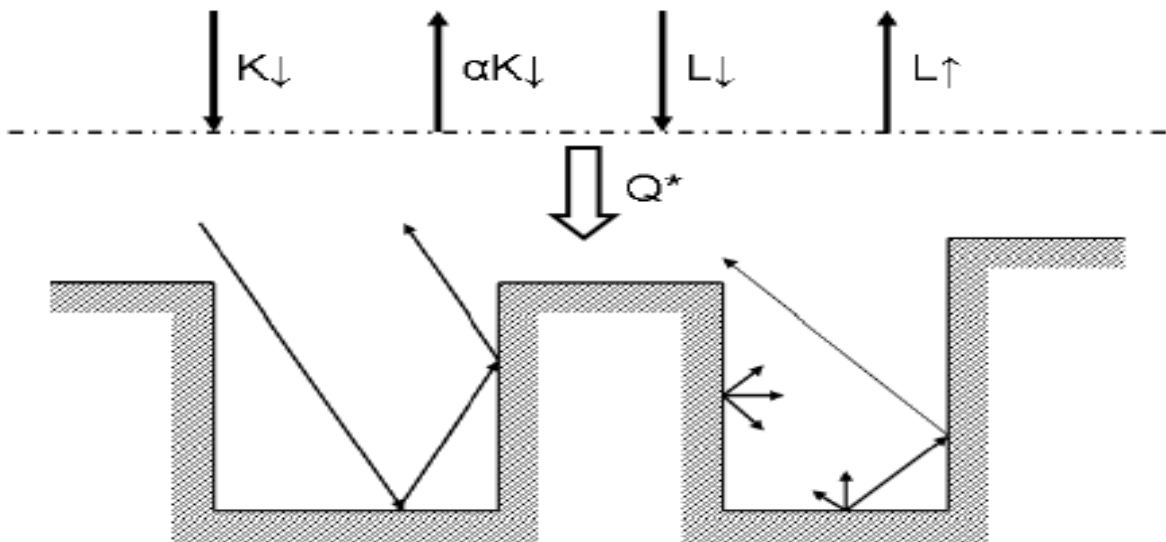


FIGURE 10 – Bilan radiatif au-dessus d'une ville (Colombert, 2008).

Pour évaluer l'impact de la géométrie urbaine sur le microclimat (température, phéno-

mène de l'ICU), on utilise le plus souvent le facteur de vue (ou facteur de forme) qui est défini comme étant l'ouverture du ciel à partir du sol. Il permet d'avoir une estimation de la part de rayonnement qui entre dans un endroit (dans la rue pour notre cas).

2.3 Impact du végétal sur le bilan énergétique

Le végétal est très largement plébiscité et bénéficie d'une image positive dans la société. Ses bienfaits sur l'environnement ne font plus aucun doute. La végétation en milieu urbain offre des bienfaits aussi variés qu'utiles également appelés services écosystémiques (Mehdi et al., 2017). Certains de ces services ont fait l'objet de plusieurs études dans la littérature. C'est le cas par exemple de l'impact du végétal sur la pollution atmosphérique (Currie and Bass, 2008; Mestayer and Brunet, 2015; Nowak et al., 1998; Zhang et al., 2021) et sur les nuisances urbaines. Un des plus grands avantages du végétal, c'est qu'il s'adapte aux saisons et n'apporte donc pas les mêmes bénéfices toute l'année. En été, il apporte un rafraîchissement par évapotranspiration et par ombrage. Mais en hiver, on n'a pas besoin de rafraîchissement dans les pays tempérés (on a d'ailleurs besoin de chauffage) or, le végétal ne transpire pas, et les arbres à feuilles caduques perdent leurs feuilles, ce qui limite l'ombrage. Le végétal est une solution qui s'adapte donc aux saisons contrairement aux autres solutions (murs réfléchissants par exemple) qui apportent le même bénéfice toute l'année (alors que les besoins ne sont pas les mêmes). La végétalisation des villes elle, est présentée comme une stratégie d'adaptation au changement climatique aux bénéfices multiples pour l'environnement et la société (Musy, 2014). Enfin, elle contribue à la limitation de l'effet de serre en piégeant le dioxyde de carbone.

2.3.1 Convection

La végétalisation limite les échanges convectifs entre les parois solides et l'air environnant en diminuant la vitesse du vent. Les végétaux sont des milieux poreux et laissent donc passer le vent (Gromke et al., 2015). Les plantes sont donc des ralentisseurs de vent et peuvent aussi créer des zones de turbulence. Les propriétés de l'écoulement d'un vent au sein et au-dessus des couverts végétaux diffèrent significativement des caractéristiques d'un écoulement de couche limite sur une surface rugueuse. Les spécificités de la turbulence autour des végétaux sont le résultat d'une instabilité de type couche de mélange

liée à l'inflexion du profil moyen du vent au niveau de leur sommet (Raupach et al., 1996).

Les végétaux peuvent contribuer soit au rafraîchissement, soit au réchauffement de l'air. Cela peut être intéressant ou handicapant en fonction de la saison dans laquelle on se trouve. En période estivale, le vent peut contribuer à rafraîchir la surface des bâtiments et à évacuer de la chaleur dans les villes et donc à la réduction du phénomène de l'îlot de chaleur urbain.

2.3.2 Rayonnement

Les végétaux interceptent le rayonnement solaire. Comme on peut le voir sur la FIGURE 11, la végétation haute permet de réduire la quantité de rayonnement incident qui atteint les surfaces, en particulier les surfaces minérales, qu'elle surplombe. Une partie du rayonnement solaire arrivant sur le couvert végétal est réfléchi de manière diffuse, du fait de l'orientation multiple des feuilles (Bouyer, 2009). L'autre partie pénètre dans le couvert et une partie y est absorbée. La fraction restante traverse le couvert. Le rayonnement intercepté est en grande partie absorbé et réfléchi par le feuillage des arbres. Ainsi, les surfaces à l'ombre se réchauffent moins que celles qui sont en plein soleil.

Pendant la journée, les végétaux permettent aussi de limiter le piégeage radiatif dans la rue en interceptant une partie du rayonnement réfléchi par les murs et par le sol (rayonnement courtes longueurs d'onde). Pendant la nuit en revanche, les arbres peuvent piéger le rayonnement grandes longueurs d'onde en réduisant le facteur de vue du ciel et empêcher ainsi l'évacuation de la chaleur.

2.3.3 Evapotranspiration

On appelle évapotranspiration, le phénomène combiné de perte en eau par la transpiration du couvert végétal (à travers les stomates) et par évaporation directe de l'eau du sol et des surfaces d'eau libre. D'un point de vue hydrologique, les plantes se comportent comme des pompes qui tirent l'eau du sol et la remontent vers l'atmosphère. Chez les végétaux, la transpiration a plusieurs rôles : elle est le moteur de la circulation de la sève brute dans le xylème, elle favorise le rafraîchissement des plantes et elle permet le

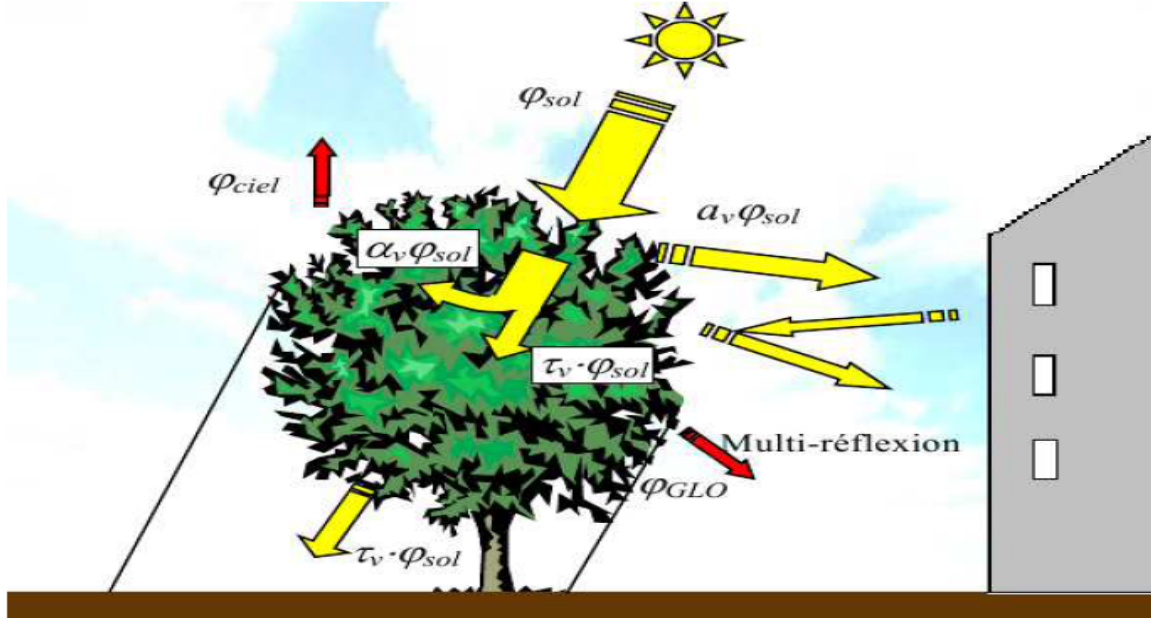


FIGURE 11 – Flux solaires à la surface des arbres (Robitu, 2005).

transfert de nombreux composés, notamment des sels minéraux, vers les organes où la plante en a besoin, principalement dans les feuilles qui sont le siège de la photosynthèse. La transpiration des végétaux consomme de l'énergie et prend des calories à l'air à proximité, contribuant à le rafraîchir.

En milieu urbain, l'évapotranspiration est modifiée par rapport à un milieu rural du fait qu'il y a moins de végétation et que les sols sont très imperméabilisés. L'imperméabilité des sols urbains est due à la minéralisation de l'espace et à l'évacuation des eaux de pluies par les réseaux. Cela diminue la quantité d'eau à évaporer. Il est complexe d'estimer avec précision la quantité d'eau transpirée par une plante en raison des nombreux paramètres dont dépend le processus de transpiration. La transpiration est contrôlée par des régulations physiologiques qui permettent aux plantes de s'adapter aux conditions environnementales. Les stomates ont en effet, tendance à s'ouvrir ou à se fermer en réponse aux conditions environnementales comme la lumière ou l'obscurité, le chaud ou le froid, la disponibilité en eau ou le manque d'eau. Comme pour l'évaporation, la transpiration

est principalement influencée par le déficit de pression de vapeur d'eau, la température, le vent, le rayonnement solaire et l'eau disponible dans le sol.

Il existe trois types d'évapotranspiration : l'évapotranspiration potentielle (ET_{ref} ou ETP), l'évapotranspiration maximale (ETM) et l'évapotranspiration réelle (ETR). L'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à la demande climatique de rafraîchissement pour équilibrer le bilan d'énergie sur une surface végétale. L'évapotranspiration de référence (ET_{ref}) est l'évaporation d'une surface végétale de référence bien alimentée en eau. La surface de référence ainsi considérée ne doit être atteinte d'aucune maladie ; elle doit être d'une grande superficie, elle doit être dans des conditions de sol optimales et, elle doit enfin posséder un rendement maximal pour les conditions climatiques existantes. Concrètement, la surface de référence correspond à un gazon bien alimenté en eau. En pratique, on considère souvent que l' ETP et l' ET_{ref} sont similaires. Cette évapotranspiration est directement calculable à partir des variables climatiques grâce à la formule de Penman-Monteith (voir section 5.1.2.3).

L'évapotranspiration de référence augmente avec le rayonnement net et le déficit de pression de vapeur. Le modèle de Penman-Monteith est très utilisé et est présenté par la FAO comme le modèle offrant "les meilleurs résultats et le minimum d'erreurs". La couverture végétale utilisée pour ce modèle est considérée comme un ensemble homogène et l'évapotranspiration est supposée se faire de manière verticale.

L'évapotranspiration maximale prend en compte la spécificité de l'espèce végétale utilisée. Elle est une correction de l'évapotranspiration de référence et se calcule mathématiquement comme suit :

$$ETM = (k_e + k_{cb}) ET_{ref} = k_c ET_{ref} \quad (11)$$

k_c (somme du coefficient d'évaporation directe (k_e) et du coefficient cultural de base (k_{cb})) est appelé le coefficient cultural. Ce coefficient rend compte des effets des différences du couvert végétal par rapport à une surface de référence telle que précédemment définie. Sa valeur dépend de plusieurs paramètres et notamment du type de culture et du stade de développement.

Le coefficient culturel k_c d'une culture donnée (autre que l'herbe) s'exprime par le rapport entre l' ETM de cette culture en conditions de confort hydrique et l' ET_{ref} . La (FAO56, 2006) fournit des valeurs tabulées des coefficients cultureux pour une large gamme de cultures agricoles et à différents stades de croissance.

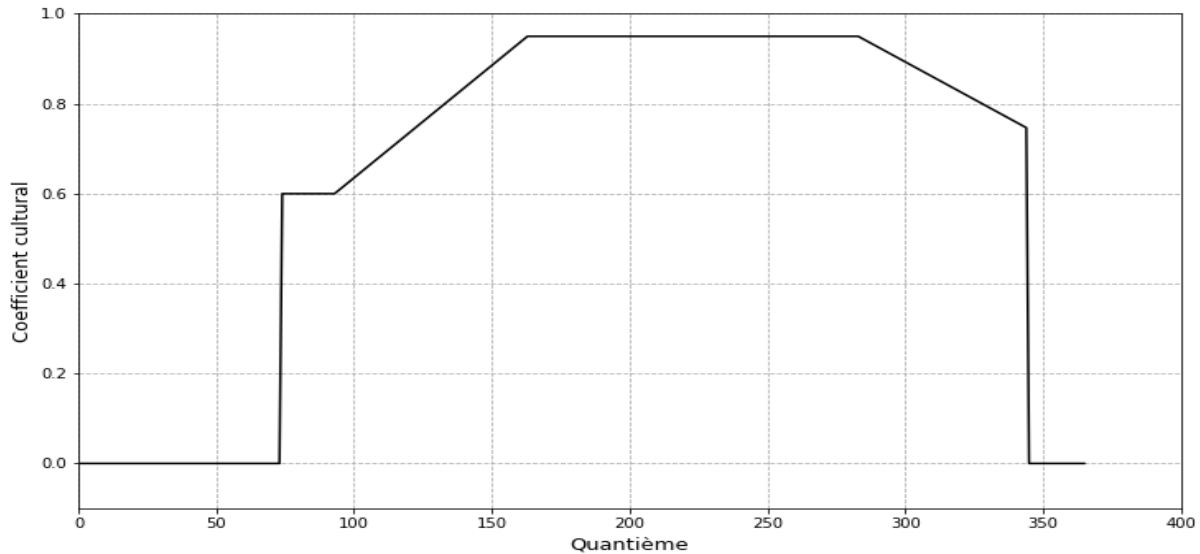


FIGURE 12 – Evolution du coefficient culturel en fonction du quantième (ou jour de l'année) pour des arbres fruitiers à feuillage caduc (FAO56, 2006).

Comme nous le verrons dans la section 5.1.2.3, une approche différente de celle de la FAO a été proposée par l'université de Californie pour une estimation des besoins en irrigation des plantations paysagères. Il s'agit de l'approche WUCOLS (Water Use Classification of Landscape Species). En effet, la méthodologie de la FAO est conçue pour la production alimentaire, avec l'intention de maximiser le rendement. Dans le cadre de la végétalisation urbaine, les espèces végétales peuvent être différentes, et elles ne sont pas cultivées avec le même objectif. Dans l'approche WUCOLS, le coefficient de culture k_c est remplacé par un coefficient de paysage k_L , prenant en compte trois facteurs à travers des coefficients spécifiques : le coefficient d'espèce végétale (k_{plant}), le coefficient de microclimat (k_{mc}), et le coefficient de densité de plantation ($k_{densité}$).

Dans cette thèse, la plante utilisée est le pommier d'ornement " *Malus coccinella*". Nous

ne disposons pas encore des valeurs du coefficient cultural issues de la littérature pour cette plante spécifique. Sur la FIGURE 12, nous avons l'évolution du coefficient cultural en fonction du nombre de jours calendaires (ou quantième) pour des arbres fruitiers à feuillage caduc de type pommier, poirier ou cerisier. Les données sont issues du rapport (FAO56, 2006).

L'évapotranspiration réelle (ETR) est la perte d'eau effective subie par un couvert végétal. Elle tient compte aussi de la variation de la disponibilité en eau dans le sol. Elle se détermine grâce à la formule suivante :

$$ETR = (k_{cb} + k_e) k_s ET_{ref} = k_c k_s ET_{ref} \quad (12)$$

où k_s est un coefficient de satisfaction qui vaut 1 pour un sol en confort hydrique et est compris entre 0 et 1 pour un sol en stress hydrique. Selon les formulations (FAO56, 2006) le k_s peut venir en facteur de l'ensemble du coefficient cultural k_c (comme le montre eq. (12)) ou du k_{cb} uniquement.

2.4 Impact du végétal sur le bilan hydrique du sol

Le bilan hydrique est une conséquence directe du principe de conservation de la masse. Il permet, sur une période donnée, de comptabiliser les apports en eau ainsi que les réserves pouvant y exister. Il existe plusieurs manières de formuler le bilan hydrique. Une de ces formulations est par exemple celle qui a été faite par (Itier et al., 1996) : la différence entre la somme des apports en eau et des pertes en eau d'un volume de sol pendant une période donnée est égale à la variation de la quantité d'eau stockée dans ce volume durant cette même période. La formulation la plus générale est :

$$P + I = Q + ETR + \Delta R_{sol} + D \quad (13)$$

P représente l'ensemble des précipitations, I est l'irrigation, Q est le ruissellement net (qui peut être positif ou négatif selon la topographie du sol et selon le bilan de ruissellement amont et aval), et ETR est l'évapotranspiration réelle. ΔR_{sol} désigne la variation des réserves d'eau dans le sol, et D représente le drainage. La transpiration est fortement liée à la disponibilité de l'eau dans le sol. Elle diminue avec la disponibilité de l'eau dans le sol, et lorsque, la disponibilité de l'eau devient trop faible, les stomates se referment.

2.5 État de l’art et verrous scientifiques

Pour étudier les services climatiques rendus par les arbres dans une rue canyon, nous allons passer en revue les connaissances déjà acquises sur ce sujet. Les rues canyon ont été étudiées dans la littérature selon trois principales approches : in situ en milieu extérieur, d’autres en soufflerie et maintenant de plus en plus par des modèles numériques.

2.5.1 Études expérimentales en soufflerie

Une soufflerie est une installation d’essais (un modèle de dimensions réduites) généralement utilisée en aérodynamique pour étudier les effets d’un écoulement d’air sur un corps. Une synthèse de quelques études expérimentales menées en soufflerie sur des rues canyon est présentée dans la TABLE 4. On peut remarquer que la plupart des études ont été réalisées sur des rues canyon régulières (rues dont le rapport d’aspect vaut 1). On peut également constater que les études en soufflerie ont davantage porté sur des rangées de rues (Huang et al., 2016; Kellnerová et al., 2012; Llaguno-Munitxa et al., 2017; Pavageau and Schatzmann, 1999; Tan et al., 2018; Uehara et al., 2000) et sur des rues isolées (Allegrini, 2018; Blackman et al., 2015; Garcia Sagrado et al., 2002; Huang et al., 2016; Kastner-Klein et al., 2004, 2001; Perret et al., 2016; Savory et al., 2013) que sur des rues en cavité (Allegrini et al., 2014, 2013; Stabile et al., 2015). De la TABLE 4, il ressort également que le facteur d’échelle géométrique (compris entre 1/78 et 1/400) est beaucoup plus réduit que celui des études en milieu extérieur (généralement compris entre 1/10 et 1/2), ce qui rend plus complexe l’extrapolation des résultats à l’échelle réelle, en particulier pour ce qui est de l’importance relative des phénomènes thermiques et des phénomènes d’inertie.

L’aéraulique et le transport de polluants semblent être les principaux phénomènes physiques mis en évidence dans les études en soufflerie (Blackman et al., 2015; Garcia Sagrado et al., 2002; Gromke et al., 2008; Huang et al., 2016; Kastner-Klein et al., 2001; Llaguno-Munitxa et al., 2017; Pavageau and Schatzmann, 1999; Perret et al., 2016; Salizzoni et al., 2009; Savory et al., 2013; Stabile et al., 2015; Tan et al., 2018). D’autres auteurs tels que Allegrini et al. (2013, 2014); Allegrini (2018); Kastner-Klein et al. (2004); Kellnerová et al. (2012); Uehara et al. (2000) se sont également intéressés aux phénomènes de transferts

thermiques. L'étude de [Gromke et al. \(2008\)](#) est, à notre connaissance, la seule étude qui a inclus l'impact (purement aéraulique) du végétal.

Sur les études aérauliques incluant la thermique, [Uehara et al. \(2000\)](#) ont mené une étude en soufflerie afin de comprendre comment la stratification thermique affecte l'écoulement dans et au-dessus de rangées de rues canyon urbaines. La LDV (Vélocimétrie Laser Doppler) est le moyen de mesure utilisé. Plusieurs cas ont été étudiés selon les valeurs du nombre de Richardson global BRN (Bulk Richardson Number). Tel qu'il est défini par les auteurs, ce nombre de Richardson global est l'opposé du nombre de Richardson classique (qui sera défini plus loin). Quelques résultats issus de cette étude sont présentés sur la FIGURE 13. Il a été constaté qu'il se forme un tourbillon au centre de la rue, et que, plus l'écoulement est thermiquement instable, plus le vortex est fort.

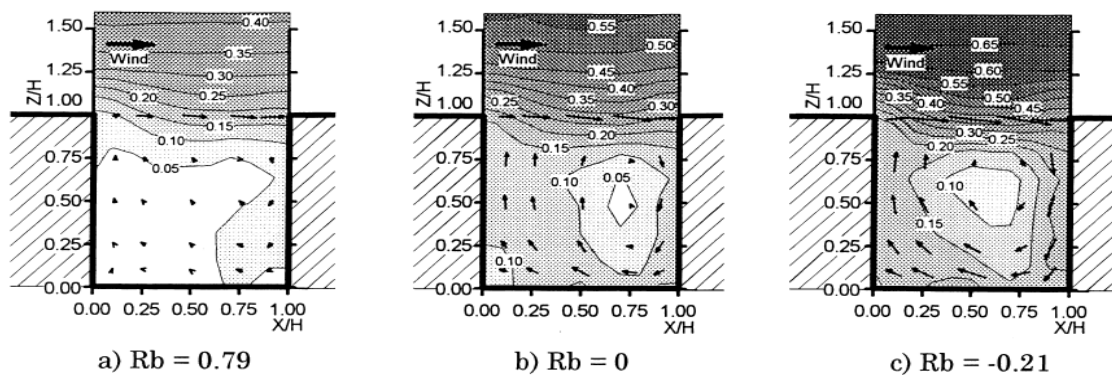


FIGURE 13 – Contours de la vitesse normalisée et champ de vecteurs vitesse à l'intérieur de la rue pour différentes valeurs du nombre de Richardson global ([Uehara et al., 2000](#)).

Des mesures en soufflerie d'écoulements flottants dans des rues canyons ont été réalisées par [Allegrini et al. \(2013\)](#). Un exemple de résultats présentés sur la FIGURE 14 montre la formation d'un vortex principal au centre de la rue lorsque toutes les parois sont isothermes. Ce vortex principal est renforcé par le chauffage du sol et du mur sous le vent. Pour le chauffage de la paroi au vent, un second tourbillon contra-rotatif se forme en raison de la flottabilité et la direction de l'écoulement près de la paroi au vent passe d'un mouvement descendant à un mouvement ascendant.

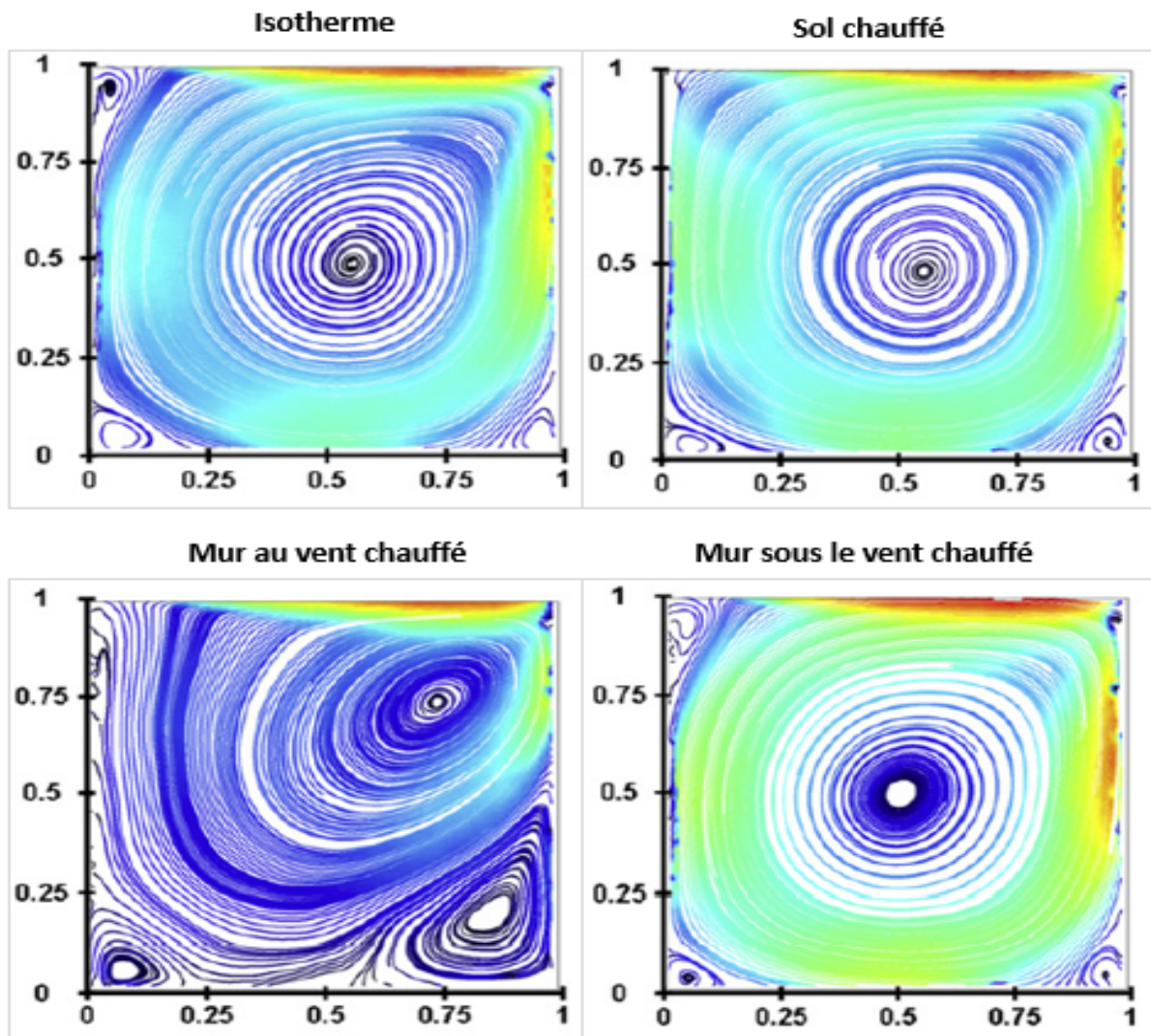


FIGURE 14 – Lignes de courant pour différentes configurations de parois chauffées. Les graphes sont issus de l'étude de [Allegrini et al. \(2013\)](#) pour un nombre de Reynolds de 30700. Les couleurs sont liées au module de la vitesse de l'air qui varie de 0.05 m.s^{-1} (pour la couleur bleue) à 0.5 m.s^{-1} (pour la couleur rouge).

Références	Type de rue	Hauteur des bâtiments (m)	Échelle	Rapport d'aspect	Phénomènes physiques étudiés
Pavageau and Schatzmann (1999)	Rangée de rues	0.6	1/167	1	Aéraulique, Transport de polluants
Uehara et al. (2000)	Rangée de rues	0.1	1/100	1	Aéraulique, Thermique
Kastner-Klein et al. (2001)	Rue isolée	0.12	1/84	1	Aéraulique, Transport de polluants
Garcia Sagrado et al. (2002)	Rue isolée	0.03	1/333	1	Aéraulique, Transport de polluants
Kastner-Klein et al. (2004)	Rue isolée	0.12	1/84	1	Aéraulique, Thermique
Gromke et al. (2008)	Rue isolée	-	-	1	Aéraulique, Transport de polluants, Végétal
Salizzoni et al. (2009)	Rangée de rues	0.06	1/167	1	Aéraulique, Transport de polluants
Kellnerová et al. (2012)	Rangée de rues	0.17	1/78	0.68	Aéraulique, Thermique
Savory et al. (2013)	Rue isolée	-	-	1	Aéraulique
Allegrini et al. (2013)	Rue en cavité	0.2	1/50	1	Aéraulique, Thermique
Allegrini et al. (2014)	Rue en cavité	0.2	1/50	1	Aéraulique, Thermique
Blackman et al. (2015)	Rue isolée	0.026	1/400	1.4	Aéraulique
Stabile et al. (2015)	Rue en cavité	0.04	1/250	1	Aéraulique, Transport de polluants
Huang et al. (2016)	isolée et rangées	0.16	1/62	1	Aéraulique, Transport de polluants
Perret et al. (2016)	Rue isolée	0.05	1/200	0.7	Aéraulique
Llaguno-Munitxa et al. (2017)	Rangée de rues	0.076	3/400	1	Aéraulique
Tan et al. (2018)	Rangée de rues	0.05	1/200	1	Aéraulique, Transport de polluants
Allegrini (2018)	Rue isolée	0.1	1/100	1	Aéraulique, Thermique

TABLE 4 – Synthèse de quelques études sur une rue canyon menées en soufflerie. Les échelles sont calculées par rapport à une hauteur de référence de 10 mètres.

2.5.2 Études expérimentales en milieu extérieur

Malgré la difficulté de leur réalisation, en raison notamment de leur coût élevé, plusieurs études expérimentales en milieu extérieur sur des rues canyon ont également vu le jour durant les dernières décennies. Les études expérimentales en milieu extérieur ont l'avantage de pouvoir fournir des résultats expérimentaux avec moins d'hypothèses. Outre le coût financier, la difficulté de leur réalisation réside également dans le fait qu'il est parfois difficile de contrôler certaines variables, climatiques notamment. Une bibliographie plus aboutie sur les études réalisées sur les rues canyon en milieu extérieur, avec ou sans végétation, est présentée dans la section 5.1.1.

2.5.2.1 Échelle réduite

Les études expérimentales en échelle réduite en milieu extérieur ont l'avantage de permettre la reproduction exacte des phénomènes physiques à étudier. L'inconvénient de ce type d'étude est le coût de la mise en place du dispositif expérimental et les difficultés de transposition des résultats obtenus à l'échelle réelle. Une synthèse de quelques études sur les rues canyon en milieu extérieur à échelle réduite est présentée dans la TABLE 5.

Dans la TABLE 5, on peut constater que les échelles d'études en milieu extérieur sont comprises entre 1/10 et 1/2. On peut également y voir, sur la base du rapport d'aspect, que les études de [Blackman et al. \(2015\)](#); [Perret et al. \(2016\)](#) ont porté sur des rues larges (rapport d'aspect inférieur à 1), celles de [Doya et al. \(2012\)](#); [Wang et al. \(2017\)](#) sur des rues régulières (rapport d'aspect égal à 1) et celles de ([Athamena et al., 2018](#); [Idczak et al., 2007](#)) sur des rues étroites (rapport d'aspect supérieur à 1) . Dans la TABLE 5, seuls [Doya et al. \(2012\)](#) ont pris en compte l'impact du végétal sur le microclimat. Les solutions de végétalisation utilisées sont des toitures et des façades végétalisées. Cette étude est importante puisqu'elle tient compte des conditions météorologiques réelles du fait qu'elle intègre notamment le rayonnement. L'impact de la disponibilité de l'eau sur le microclimat n'a pas été étudié. De plus, à notre connaissance, aucune étude à échelle réduite en milieu extérieur n'a été menée avec une configuration comportant des arbres d'alignement.

Afin d'examiner les conditions microclimatiques dans une rue canyon urbaine, [Idczak et al. \(2007\)](#) ont engagé une campagne expérimentale in situ. L'étude de terrain a été réalisée sur un site expérimental situé dans la zone industrielle de Guerville (48°56'N, 1°44'W), en France, à environ 40 km à l'ouest de Paris. À 100 m autour du site, le terrain était plat, sans végétation ni bâtiment. La température a été mesurée à l'aide de 63 thermocouples placés à différents niveaux sur les parois du canyon entre les conteneurs et les panneaux de ciment doublés (deux conteneurs de ciment superposés). La température de l'air, la pression atmosphérique et l'humidité relative ont été mesurées par des capteurs localisés dans le centre de la rue. Pour des vents forts, il a été constaté que la direction de l'écoulement de l'air dans le canyon dépend de la direction du vent incident, mais est généralement de 0 ou 180° (la rue est orienté Sud-Ouest Nord-Est, les mesures d'angles se font par rapport à l'axe du canyon). Tous les résultats indiquent l'apparition d'une circulation tourbillonnaire dans le sens du vent à l'intérieur de la rue canyon pour des vents dont l'angle d'incidence varie de $\pm 30^\circ$ autour de l'axe perpendiculaire à la rue.

Les transferts thermiques et le stockage de chaleur dans une rue canyon ont été étudiés par [Wang et al. \(2017\)](#) en utilisant des anémomètres ultrasoniques, des capteurs de température et d'humidité, des radiomètres et une caméra infrarouge. Les expériences ont été réalisées pendant l'été 2015 à Guangzhou, en Chine. Deux modèles ont été utilisés : un modèle vide (les bâtiments sont vides à l'intérieur et leurs murs ont une épaisseur de 1.5 cm) et un modèle avec du sable (les bâtiments sont remplis de sable à l'intérieur pour augmenter la capacité thermique). La rue canyon est orientée Nord-Sud, et a un rapport d'aspect de 1. Les auteurs ont principalement étudié la répartition des champs de vitesse, de température d'air et certaines caractéristiques du rayonnement dans la ville. Le focus était surtout mis sur la capacité thermique de stockage des bâtiments. Les mesures effectuées ont montré que, pendant le jour, les températures des parois et de l'air du modèle vide atteignent leurs valeurs maximales plus tôt et, ces valeurs sont plus élevées que celles obtenues avec les bâtiments remplis de sable.

Références	Lieu de réalisation	Hauteur maquette (<i>m</i>)	Échelle	Rapport d'aspect	Orientation de la rue	Période de réalisation
Idczak et al. (2007)	Guerville, France	5.20	1/2	2.17	SW - NE	07/07/2004 - 20/10/2004
Doya et al. (2012)	La Rochelle, France	1.24	1/8	1.10	S - N	07/07/2004 - 20/10/2004
Blackman et al. (2015)	Nantes, France	5.20	1/2	0.70	SW - NE	2 ans (2011 - 2012)
Perret et al. (2016)	Nantes, France	5.20	1/2	0.70	SW - NE	2 ans (2011 - 2012)
Wang et al. (2017)	Guangzhou, Chine	1.20	1/8	1.00	SE - NW	Août 2015
Athamena et al. (2018)	Nantes, France	5.20	1/2	1.44	SW - NE	03/2010 - 06/2012

TABLE 5 – Synthèse de quelques études expérimentales réalisées en milieu extérieur à échelle réduite. Les échelles sont calculées par rapport à une hauteur de référence de 10 mètres. Les rues n'ont pas été végétalisées à l'exception de celle dans l'étude de ([Doya et al., 2012](#)).

2.5.2.2 Échelle réelle

La TABLE 12 et la TABLE 13 présente aussi des études réalisées sur des rues canyon en échelle réelle. Nakamura and Oke (1988) ont mesuré des vitesses de vent et des températures dans un canyon urbain à Kyoto au Japon. Ils ont ainsi pu établir, une relation entre la vitesse moyenne de l'air juste au-dessus du toit du bâtiment et la vitesse moyenne de l'écoulement dans la rue canyon. La vitesse moyenne du vent au-dessus du toit a été mesurée à une hauteur de $1.2H$ avec H , la hauteur du bâtiment. Pour les mesures de température, ils ont constaté que la différence entre les températures de l'air au-dessus et dans la rue était inférieure à $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ils ont également remarqué que la distribution spatiale de la température de l'air à l'intérieur de la rue était fortement influencée par le fait que le mur Nord et le sol étaient plus soumis au rayonnement solaire que le mur Sud. Une campagne de mesures en climatologie urbaine a été réalisée durant l'été 2002 à Strasbourg dans le cadre du projet RECLUS par Najjar et al. (2005) dans le but de documenter les différents processus physiques qui interviennent dans l'instauration du microclimat à l'intérieur d'une rue canyon urbaine. La campagne a permis de constituer une base de mesures détaillée des termes des bilans radiatifs et d'énergie dans le canyon urbain et sur différents fragments urbains, grâce notamment à des acquisitions par télédétection. Rotach et al. (2005) ont présenté les premiers résultats du projet BUBBLE (Basel Urban Boundary Layer Experiment). Ce projet a été réalisé à Bâle en Suisse et, avait pour principaux objectifs de fournir des données sur le long terme pour identifier les conditions météorologiques déterminant le processus de dispersion des polluants en milieu urbain, étudier les hétérogénéités spatiales des différentes entités, produire des résultats météorologiques pour un certain nombre de sujet de recherche en milieu urbain, et combiner des observations à grande échelle avec celles de modélisation numérique et physique afin d'utiliser de manière optimale les avantages de ces trois approches dans l'étude de l'atmosphère. Louka et al. (2002) ont mené une campagne de mesure expérimentale dans la rue de Strasbourg à Nantes en juin 1999. L'étude avait pour objectif de mieux comprendre les effets thermiques sur le vent et sur les champs de concentration du monoxyde de carbone (CO) dans une rue canyon. Il a été constaté que l'effet général des murs chauffés sur la dynamique de l'écoulement était négligeable.

2.5.3 Études numériques

Il existe deux approches de modélisation numérique : une modélisation basée sur la résolution de variables moyennées dans l'espace (modèles globaux) et une modélisation permettant d'obtenir une solution approximative d'un problème de dynamique des fluides et/ou de transferts thermiques (modèles CFD).

2.5.3.1 Modèles globaux

Les modèles globaux sont très répandus dans le milieu académique. Souvent couplés avec des modèles CFD, les modèles globaux ont beaucoup été utilisés durant ces deux dernières décennies pour étudier le microclimat urbain. [Harman et al. \(2004\)](#) ont en effet développé un modèle pour l'étude du flux vertical d'un scalaire, tel que la chaleur, à partir d'une rue canyon urbaine qui tient compte des variations du flux et de la turbulence avec la géométrie du canyon. Le modèle donne l'ordre de grandeur et la dépendance géométrique du flux de chaque paroi (murs et sol) de la rue canyon. Il a été vérifié que les résultats du modèle étaient bien en accord avec des résultats qui ont été obtenus en soufflerie. Un modèle hygrothermique de murs végétalisés et un modèle de transfert de masse dans une rue canyon ont été proposés et mis en œuvre dans un programme de simulation de bâtiment (TRNSYS) par [Djedjig et al. \(2016\)](#). L'étude était basée sur une approche nodale avec un modèle qui fait appel à des résistances thermiques. L'intégration d'un modèle de murs végétalisés dans le code TRNSYS leur a permis d'accéder aux effets thermohydrauliques dans les bâtiments à performance énergétique. Le modèle a été développé dans le but de surmonter les limitations de certains modèles dont ceux décrits précédemment. Son intégration permet de concevoir des bâtiments énergétiquement passifs dans un contexte urbain. Le modèle ne s'applique cependant qu'à des rues canyon dont la configuration est simple. Les résultats numériques ont montré que l'installation de murs végétalisés sur les façades permet de réduire de 37% la charge de refroidissement à proximité des bâtiments dont le rapport d'aspect est égal à 1 et de 33% pour des bâtiments isolés. Pendant sa thèse, [Djedjig \(2013\)](#) a développé un modèle de couplage des transferts d'énergie et de masse pour des toitures végétalisées. Le comportement thermique des couches de toitures végétalisées est modélisé et couplé au bilan hydrique du substrat qui est déterminé en tenant compte de l'évapotranspiration. Le modèle développé a été validé avec des don-

nées expérimentales issues des toitures végétalisées à l'échelle 1/5 situées à l'université de La Rochelle. Une comparaison entre les résultats numériques du modèle et les résultats expérimentaux a permis de démontrer la précision du modèle pour prédire la température du substrat et les variations de contenu d'eau. [Djedjig et al. \(2015b\)](#) ont intégré dans le programme de simulation (TRNSYS), un nouveau modèle de transfert de chaleur et d'humidité pour les enveloppes vertes (afin d'en étudier les performances dynamiques) couplé à un code de construction multizone. Leurs résultats ont mis en évidence les avantages thermiques en été et en hiver. Leur analyse des différents mécanismes de transfert montre que l'ombrage engendré par le feuillage réduit les variations de température de surface tandis que l'évapotranspiration assure le refroidissement passif lorsque la disponibilité en eau est suffisante. [\(Redon, 2017\)](#) a également mis au point, dans le cadre de sa thèse, une paramétrisation spécifique pour modéliser les aspects radiatifs, thermiques, énergétiques et aérauliques liés à la présence de la végétation en milieu urbain. Pour cela, une canopée arborée a été intégrée au modèle TEB (Town Energy Budget) pour pouvoir modéliser l'environnement urbain et l'ensemble des processus physiques associés.

2.5.3.2 Modèles de climat distribué (CFD)

Une revue de la littérature non exhaustive des études CFD sur les processus d'écoulement dans les rues canyon durant ces dernières années a été faite par plusieurs auteurs tels que [Buccolieri et al. \(2018\)](#); [Ai and Mak \(2017\)](#); [Toparlak et al. \(2017\)](#); [Sabatino et al. \(2013\)](#). Les études CFD ont largement été utilisées dans la littérature pour étudier des phénomènes physiques à l'échelle de la rue. Elles ont principalement porté sur des rues en cavité avec différents profils pour la vitesse en entrée du domaine de calcul. La hauteur du domaine de calcul au-dessus de la rue canyon est choisie de façon qu'elle soit proportionnelle à la hauteur des bâtiments. On constate également dans la table de synthèse (TABLE 6) que l'aéraulique, la thermique et le transport de polluant sont les principaux phénomènes physiques étudiés. Le végétal et le rayonnement n'ont été pris en compte que dans très peu d'études numériques CFD ([Bouyer, 2009](#); [Gromke et al., 2008, 2015](#)). Les études ont porté sur une large gamme de rapport d'aspect avec des domaines de calcul variant avec la hauteur des bâtiments. Les six configurations qui ont principalement été considérées dans les études CFD sont présentées sur la FIGURE 15. Comme nous pouvons

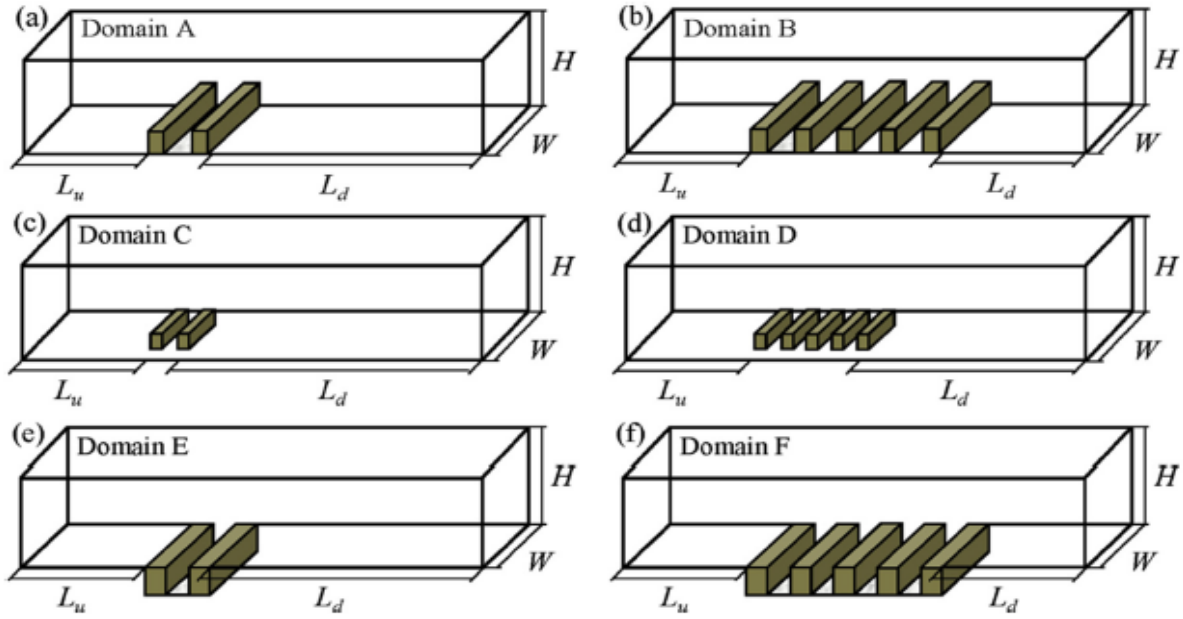


FIGURE 15 – Configurations de rues canyon étudiées en CFD (Ai and Mak, 2017).

le voir dans la TABLE 6, les configurations en rue isolée (A), en cavité (isolée E ou en rangée F), et dans une moindre mesure en rangées de rues (B) sont les plus étudiées en modélisation numérique CFD. Ai and Mak (2017) ont étudié l'influence de différentes configurations, notamment les configurations en rue isolée (A), en rue cavité (isolée E ou en rangée F) et en rangée de rues (B) sur la prédiction par la CFD des champs d'écoulement isothermes à l'intérieur d'une rue canyon. Des comparaisons entre les résultats obtenus par la CFD et ceux obtenus expérimentalement en tunnel à eau par des mesures LDV ont été faites sur la configuration B uniquement (rangée de rue). Ils ont constaté que le champ de vitesse expérimental de la rue centrale en configuration de rangée de rue (domaine B) était bien représenté en CFD par le domaine B (domaine identique), et par les domaines en cavité (rue isolée de type T - domaine E ou rangée de T - domaine F) avec un vortex central qui tourne dans le sens du vent incident, mais que le domaine de rue canyon isolée (domaine A) induisait un champ de vitesse différent (vortex tournant dans le sens contraire au vent incident) du fait du décollement important observé numériquement sur le bâtiment amont. Il n'a pas été réalisé de validation expérimentale sur la

rue isolée afin de vérifier si la CFD prédisait correctement le décollement pour ce domaine.

[Garcia Sagrado et al. \(2002\)](#) ont étudié la dispersion de polluant dans une rue canyon par une approche expérimentale en soufflerie et par une approche CFD. Pour une rue isolée dont les deux bâtiments ont une même hauteur, les auteurs ont obtenu des résultats expérimentaux et numériques concordants avec un vortex qui tourne dans le sens contraire au vent. Cela peut s'expliquer en partie par le fait que la largeur de la soufflerie utilisée pour faire les expériences est faible (même type d'effet pour une simulation numérique en 2D) et par le fait que la couche limite d'entrée est de faible épaisseur. [Cheng et al. \(2009\)](#) ont comparé les performances de ventilation de rues canyon pour différents rapports d'aspect et en considérant différentes valeurs du nombre de Richardson. La turbulence a été modélisée par une approche RANS (Reynolds Average Navier Stokes) avec un modèle de turbulence $k - \varepsilon$ RNG dans un premier temps et une approche LES dans un deuxième temps. Les résultats obtenus ont été validés par les mesures de [Li et al. \(2008b\)](#) et de [Uehara et al. \(2000\)](#). L'influence des caractéristiques géométriques et de la direction du vent sur un canyon urbain a été étudiée par [Battista et al. \(2015\)](#) par la méthode des éléments finis. L'étude avait porté sur un domaine de calcul tridimensionnel afin de pouvoir prendre en compte les trois composantes du vent et la variation de paramètres géométrique comme le rapport d'aspect. Les résultats obtenus indiquent que les valeurs de la vitesse de l'air dans le canyon urbain sont indépendantes de la longueur de celui-ci. L'étude a également montré que quand la direction du vent change, les valeurs de la vitesse de l'air augmentent de 0 à 2.5 m.s^{-1} malgré le fait que la valeur de la vitesse de l'air à l'entrée du domaine de calcul soit maintenue à 2 m.s^{-1} .

Sur la thermique, [Tan et al. \(2015\)](#) ont étudié l'impact de la variation diurne de la température de surface sur le régime d'écoulement et le transport de polluant dans une rue canyon sur la base d'un modèle bidimensionnel de rue canyon sous différentes conditions de stratification thermique. Les résultats obtenus concordent avec ceux obtenus par [Uehara et al. \(2000\)](#). Malgré les limites de leur étude notamment à cause de la géométrie bidimensionnelle et des hypothèses de températures de parois prescrites, la méthode de modélisation proposée peut améliorer la précision des prédictions et servir de référence pour des études numériques. Le refroidissement par transpiration végétale a été étudié

par [Gromke et al. \(2015\)](#) par une approche CFD en 3D pour une rue canyon de type boulevard (rue bordée de bâtiments élevés, au sein d'un voisinage constitué de bâtiments de moindre hauteur, ce qui constitue une configuration intermédiaire entre la rue isolée et la rangée de rues) dans le centre-ville d'Arnhem, aux Pays-Bas. L'outil de simulation numérique utilisé est ANSYS FLUENT Le modèle de turbulence a également été adapté pour prendre en compte la présence de la végétation. Les résultats obtenus montrent que la végétation permet de réduire (de jusqu'à 2.0 °C) la température de l'air pendant les journées chaudes en été.

Dans sa thèse [Bouyer \(2009\)](#) a étudié l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments en utilisant un outil de simulation microclimatique reposant sur le couplage d'un modèle thermo-radiatif (SOLENE) et d'un code de calcul de mécanique des fluides numérique utilisé en 3D (ANSYS FLUENT). Un modèle de sol et un modèle thermique de bâtiment ont été développés dans un premier temps. Le modèle thermique de bâtiment permet de calculer les consommations énergétiques d'un bâtiment interagissant avec son environnement. Les deux modèles ont ensuite été intégrés dans SOLENE microclimat. Enfin, un couplage entre SOLENE et ANSYS FLUENT a été réalisé dans le but de combiner les avantages des approches de modélisation. Le modèle de turbulence $k - \varepsilon$ utilisé en CFD a été adapté pour prendre en compte la présence de la végétation, qui a pour effet d'augmenter le niveau de turbulence de l'écoulement, et de générer des structures dissipatives de petite taille. Les simulations numériques qui ont ainsi été réalisées ont permis, entre autres, d'étudier l'impact de deux modes d'aménagement urbain : un aménagement avec des surfaces urbaines très minéralisées et un aménagement où les surfaces non bâties sont végétalisées au maximum. Le premier aménagement est censé favoriser le développement du phénomène de l'ICU tandis que le second est censé réduire ce phénomène. Deux types d'arbre avec des feuillages à section ovoïde ont été utilisés. Une double rangée avec des arbres de 15 m de hauteur plantés le long des voies piétonnes a été considérée. Des arbres de 12 m de hauteur ont été plantés dans l'espace intermédiaire. La comparaison des deux types d'aménagement grâce à une simulation numérique a permis de constater que la végétation permet une économie d'énergie sur le refroidissement des bâtiments.

Références	Type de rue	Rapport d'aspect	Hauteur du domaine	Profil de vitesse	Modèle de turbulence	Phénomènes physiques étudiés
Kim and Baik (2001)	Cavité	0.6 - 3.5	0.1 - 5.7H	Puissance	RANS Std $k\epsilon$	Aéraulique, Thermique
Liu et al. (2004)	Cavité	0.5 - 2.0	1.0H	Uniforme	LES	Aéraulique, Transport de polluants
Xiaomin et al. (2006)	Cavité	0.17 - 3.5	7.0H	Uniforme	RANS Std $k\epsilon$	Aéraulique, Transport de polluants
Baik et al. (2007)	Cavité	1.0	2.0H	Logarithme	RANS RNG $k\epsilon$	Aéraulique, Transport de polluants, Thermique
Li et al. (2008a)	Isolée	1.0 - 5.0	1.0H	Uniforme	LES	Aéraulique, Transport de polluants
Bouyer (2009)	îlot	-	-	Puissance	RANS Std $k\epsilon$	Aéraulique, Thermique, Rayonnement, Végétal
Kumar et al. (2009)	Cavité	1.0	5.0H	Uniforme	RANS Std $k\epsilon$	Aéraulique, Transport de polluants
Hu et al. (2009)	Isolée	1.0	1.2H	Uniforme	LES	Aéraulique, Transport de polluants, Thermique
Moonen et al. (2011)	Cavité	1.0	8.0H	Logarithme	RANS, LES	Aéraulique
Zhang et al. (2011)	Cavité	1.0	1.0H	Uniforme	LES	Aéraulique, Transport de polluants
Baik et al. (2012)	Cavité	1.0	2.0H	Logarithme	RANS RNG $k\epsilon$	Aéraulique, Transport de polluants, Thermique
Kwak et al. (2013)	Cavité	1.0 - 2.0	2.0 - 2.5H	Logarithme	RANS RNG $k\epsilon$	Aéraulique, Transport de polluants
Allegrini et al. (2014)	Cavité	1.0	4.275H	Expérience	RANS Std $k\epsilon$	Aéraulique, Thermique
Madalozzo et al. (2014)	Cavité	0.5 - 2.0	2.0 - 2.5H	Puissance	RANS	Aéraulique, Transport de polluants, Thermique
Battista et al. (2015)	Isolée	0.5 - 4.0	5.0H	Uniforme	RANS Std $k\epsilon$	Aéraulique
Ai and Mak (2017)	Isolée	0.5 - 2.0	4.0H	Uniforme	RANS RNG $k\epsilon$	Aéraulique
Gromke et al. (2015)	-	-	-	-	RANS Std $k\epsilon$	Aéraulique, Thermique, Rayonnement, Végétal

TABLE 6 – Tableau de synthèse de quelques études CFD, adapté et enrichi de [Ai and Mak \(2017\)](#).

2.5.4 Conclusion de l'état de l'art

Un passage en revue de la littérature sur des études relatives au sujet de thèse a permis de constater que de nombreuses études portant sur les rues canyon ont été réalisées essentiellement en soufflerie, dans le but de comprendre les phénomènes aérauliques et le transport de polluant pour différentes configurations. Des études en milieu extérieur à échelle réelle et à échelle réduite ont également été menées afin d'obtenir des résultats plus proches de la réalité du terrain que ceux obtenus en soufflerie. Les études en milieu extérieur ont principalement porté sur les phénomènes aérauliques et thermiques dans les rues canyon urbaines et sur des mesures de pollution. De nombreuses études numériques (CFD et modèles globaux) s'intéressant aux conditions climatiques dans les rues canyon ont également été publiées durant ces dernières décennies. Le rayonnement et le végétal sont, cependant, rarement pris en compte dans les études CFD.

L'état de l'art a aussi permis de mettre en évidence le fait que toutes les études numériques qui ont été réalisées n'ont pas été validées par des expérimentations. Celles qui ont été validées, ne l'ont été que sur certaines grandeurs (vitesse ou température par exemple). L'étude bibliographique a également montré que l'impact du végétal sur le microclimat en milieu urbain commence à faire l'objet d'études (Bouyer, 2009; Djedjig, 2013; Djedjig et al., 2016; Gromke et al., 2015). Cependant, le statut hydrique du sol n'a renseigné dans ces études; ce qui ne permet pas de savoir si les végétaux étaient en situation de confort hydrique.

2.6 Objectifs de la thèse

Compte tenu des questionnements scientifiques évoqués plus haut et des lacunes scientifiques identifiées dans l'état de l'art, cette thèse se propose comme principal objectif d'aider à mieux comprendre et quantifier les services écosystémiques climatiques rendus en milieu urbain par des arbres en situation de confort hydrique. Deux approches seront menées en parallèle : une approche expérimentale en milieu extérieur en échelle réduite et une approche numérique. Dans la première, les expérimentations seront réalisées sur une rue canyon à l'échelle 1/5^e construite sur le site de l'institut Agro, à Angers. Dans l'approche numérique, un modèle consistant à estimer la transpiration des arbres à partir

de la connaissance des caractéristiques de climat local et d'un modèle de résistance stomatique suivant une approche de type bilan réalisé dans chaque maille sera couplé avec un modèle de climat distribué faisant appel à un logiciel de type CFD (Computational Fluid Dynamics). Les travaux de cette thèse pourront conduire au développement d'un outil numérique pour les gestionnaires d'espaces verts afin de leur permettre de mieux anticiper le verdissement des villes de demain.

Chapitre 3

Formalisation mathématique des phénomènes biophysiques mis en jeu en vue d'une intégration dans un modèle de climat distribué

3.1 Équations de base du modèle de climat distribué

La dynamique des fluides est régie au plan macroscopique par les équations de Navier-Stokes. Les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires issues des principes de conservation habituels de la mécanique : la conservation de la masse, la conservation de la quantité de mouvement et la conservation de l'énergie.

Une équation de transport est une équation régissant le comportement d'une quantité (Φ) dépendant du temps (t) et d'une autre variable (qui peut être une position, une vitesse, un couple position vitesse...). Les équations de transport issues des principes de conservation sont généralement constituées d'un terme temporel ($\frac{\partial \Phi}{\partial t}$), d'un terme d'advection ($\vec{\nabla} \Phi \vec{V}$), d'un terme de diffusion ($\vec{\nabla} \cdot (\Gamma_{\Phi} \vec{\nabla} \Phi)$) et de termes sources (S_{Φ}) comme le montre l'équation ci-dessous :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \vec{\nabla} \Phi \vec{V} = \vec{\nabla} \cdot (\Gamma_{\Phi} \vec{\nabla} \Phi) + S_{\Phi} \quad (14)$$

3.1.1 Équation de conservation de la masse

L'équation de conservation de la masse, également appelée équation de continuité, est l'une des équations fondamentales en mécanique des fluides. Elle traduit le fait que chaque constituant contenu dans un volume de contrôle est conservé lorsque l'on suit ce volume de contrôle dans son mouvement. En l'absence de source ou puits de matière et en faisant l'hypothèse que la frontière qui délimite le volume de contrôle est imperméable, l'équation de conservation de la masse pour un fluide pur s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (15)$$

Pour un fluide incompressible comme ce sera le cas pour les simulations numériques qui seront réalisées dans le cadre de cette thèse, l'équation de continuité peut être réécrite sous la forme :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (16)$$

En régime stationnaire, l'équation précédente devient tout simplement :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (17)$$

u_i est le vecteur vitesse du fluide en (m.s^{-1}), ρ est la masse volumique du fluide en (kg.m^{-3}), i est le numéro de la coordonnée spatiale.

3.1.2 Équation de conservation de la quantité de mouvement

Aussi connue sous le nom de l'équation de Navier-Stokes, ou de la deuxième loi de Newton, ou encore de la relation fondamentale de la dynamique, l'équation de conservation de la quantité de mouvement est une loi de physique mettant en relation la masse d'un objet et l'accélération qu'il reçoit lorsque des forces extérieures lui sont appliquées. Pour un écoulement incompressible, l'équation de conservation de la quantité de mouvement peut s'écrire sous la forme :

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + S_i \quad (18)$$

ρ est la masse volumique du fluide en (kg.m^{-3}), u_i est la composante i du vecteur vitesse en (m.s^{-1}), f_i est la composante i de la force volumique en (N.m^{-3}), p est la pression partielle du fluide en (N.m^{-2}), μ est la viscosité dynamique du fluide en (Pa.s), S_i est un terme source (ou puits) en (N.m^{-3}). Les expressions du terme source (ou puits) (S_i) seront données plus loin dans ce document.

3.1.3 Équation de conservation de l'énergie

Également connue sous l'appellation du premier principe de la thermodynamique, la conservation de l'énergie est un principe physique selon lequel l'énergie totale d'un système isolé est conservée au cours du temps. Le premier principe de la thermodynamique stipule que la dérivée temporelle de l'énergie totale d'un système (E) est égale à la somme de la puissance des forces extérieures au système (P_e) et de la puissance calorifique reçue ou produite par unité de volume (P_c). Ce principe se traduit mathématiquement par :

$$\frac{dE}{dt} = P_e + P_c \quad (19)$$

Pour un fluide en mouvement avec une production et une dissipation de chaleur, l'équation de conservation de l'énergie s'écrit :

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_h + \phi \quad (20)$$

ρ est la masse volumique du fluide en (kg.m^{-3}), c_p est la capacité thermique massique du fluide en ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), T est la température du fluide en (K), \vec{V} est le vecteur vitesse des particules fluides en (m.s^{-1}), λ est la conductivité thermique du fluide en ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), S_h est la source (ou puits) de chaleur en (W.m^{-3}), ϕ est la dissipation visqueuse en (W.m^{-3}).

En négligeant la dissipation de chaleur ϕ (parce que nous travaillons avec un fluide faiblement visqueux), la forme finale de l'équation de conservation de l'énergie en forme indicelle devient :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[a \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + \frac{S_h}{\rho c_p} \quad (21)$$

$a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ est la diffusivité thermique du fluide en ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$). Dans le membre de gauche de l'équation (21), le premier terme représente la variation temporelle de l'énergie totale du système ; le second terme représente la variation convective de l'énergie interne. Dans le membre de droite de l'équation (21), le premier terme représente la variation de l'énergie interne due à la conduction ; le second terme représente la production interne de chaleur.

3.2 Equation de conservation d'espèces

L'air est un mélange gazeux constitué de 78% de diazote (N_2), de 21% dioxygène (O_2), mais également d'autres gaz comme le dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau. Les plantes transpirant (donc dégageant de la vapeur d'eau), absorbant du dioxyde de carbone (CO_2) et rejetant du dioxygène (O_2) pendant le jour, ces espèces chimiques sont donc présentes en quantité variable selon l'endroit considéré dans un milieu végétalisé, mais se diffusent à travers l'air, ce qui réduit les gradients provoqués par le végétal (Morille, 2012).

Dans les simulations numériques qui seront réalisées dans le cadre de cette thèse, le fluide sera considéré comme un mélange d'air et de vapeur d'eau. La résolution de l'équation de conservation d'espèces (ou équation de convection-diffusion) permet de déterminer la fraction massique d'un constituant. La fraction massique de l'autre constituant est déduite de la première du fait que la somme des fractions massiques vaut 1. L'équation

de conservation d'espèce (transfert de masse) s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial(\rho \cdot y_m)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot y_m u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial J_m}{\partial x_j} + S_m \quad (22)$$

ρ est la masse volumique du fluide en ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), y_m est la fraction massique de l'espèce m (sans dimension), u_i est le vecteur vitesse des particules fluides en ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), J_m est le flux massique en ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), S_m est un terme source (ou puits) en ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$).

La fraction massique de l'espèce m (y_m) est définie par :

$$y_m = \frac{m_m}{\sum m_k} \quad (23)$$

avec m_m la masse de l'espèce m en kg.

Le flux massique de l'espèce m (J_m) se détermine grâce à la loi de Fick :

$$J_m = -\rho \cdot D_m \cdot \nabla y_m \quad (24)$$

où D_m est le coefficient de diffusion de l'espèce m dans l'air. Le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air est de $0.251 \times 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

3.3 Loi d'état

Un problème de mécanique des fluides et de transferts thermiques est généralement caractérisé par la connaissance de variables qui sont des fonctions des coordonnées d'espace et du temps. Ces variables sont au nombre de 6 : la température, les trois composantes du vecteur vitesse, la pression et la masse volumique du fluide. Les équations issues des principes de conservations sont au nombre de 5 : l'équation de conservation de la masse, les trois équations de la conservation de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie. Le nombre de variables à résoudre est supérieur au nombre d'équations. Le système n'est donc pas fermé ; une loi d'état permet de le fermer. Une loi d'état est une relation entre différentes variables d'état d'un système qui permet de déterminer son état. On distingue deux types de lois d'état couramment utilisées : la loi des gaz parfaits et l'approximation de Boussinesq. L'approximation de Boussinesq ne pouvant pas être utilisée pour résoudre

des équations de transport avec plusieurs espèces, nous avons retenu la loi des gaz parfaits pour les variations de la masse volumique de l'air. La loi des gaz parfait est une relation liant la masse, la pression, la masse volumique et la température du fluide. Elle est une bonne approximation des gaz réels à basse pression et à haute température et s'écrit :

$$pV = nRT \quad (25)$$

p est la pression partielle du fluide en (N.m^{-2}), V est le volume de l'élément fluide en (m^3), n est le nombre de moles contenues dans l'élément fluide en (mol), $R = 8.314$ est la constante universelle des gaz parfaits en ($\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$), T est la température du fluide en (K).

3.4 Sous modèle radiatif

Tous les corps matériels libèrent en permanence de l'énergie sous une forme non matérielle qu'on appelle 'rayonnement'. Le rayonnement thermique est un phénomène physique d'origine électromagnétique émis par la matière en relation avec son niveau de température dans une gamme de longueur d'onde allant de 0.1 à 100 μm , et qui correspond aux domaines de l'ultraviolet, du visible et de l'infrarouge (Morille, 2012). Le rayonnement est constitué de photons caractérisés par leur direction de propagation Ω et par leur fréquence ν . La résolution de l'équation de transferts radiatifs (ETR) permet d'étudier l'énergie liée au rayonnement dans chaque élément du système.

3.4.1 Équation de transferts radiatifs (ETR)

Le flux d'énergie radiative dans la direction (\vec{s}) par unité de longueur ($d\lambda$) autour de la longueur d'onde (λ) par unité de surface perpendiculaire à \vec{s} ($dS.\cos\theta$) et par unité d'angle solide ($d\Omega'$) autour de \vec{s} est représenté par la luminance (L_λ) et se détermine grâce à la formule :

$$L_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = \frac{dq}{dS.\cos\theta.d\lambda.d\Omega'} \quad (26)$$

L'angle solide ($d\Omega'$) s'exprime en coordonnées sphériques en fonction de l'angle polaire (θ) et de l'angle azimutal (φ) en vertu de la relation :

$$d\Omega' = \sin\theta d\theta d\varphi \quad (27)$$

Les relations qui permettent la transformation des coordonnées sphériques en coordonnées cartésiennes pour un rayonnement dans la direction (\vec{s}) seront données plus loin.

La luminance totale $L(\vec{r}, \vec{s})$ dans chaque direction \vec{s} à la position \vec{r} est calculée en utilisant la formule :

$$L(\vec{r}, \vec{s}) = \sum_k L_{\lambda_k}(\vec{r}, \vec{s}) \quad (28)$$

où la somme est calculée sur les bandes de longueur d'onde (qui sont au nombre de 2 pour notre cas).

L'équation de transferts radiatifs est une traduction de la conservation de la luminance découlant d'un bilan réalisé sur un élément de volume. Elle est basée sur la variation totale de la luminance traversant un milieu semi-transparent et s'écrit :

$$\frac{dL(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)L(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} L(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (29)$$

où \vec{r} est le vecteur de position, \vec{s} est le vecteur de direction, \vec{s}' est le vecteur directionnel de diffusion, s est la longueur du chemin optique en (m), a est le coefficient d'absorption en (m^{-1}), n est l'indice de réfraction, σ_s est le coefficient de diffusion, σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($5.669 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$), I est l'intensité du rayonnement (ou luminance) qui dépend de la position (\vec{r}) et de la direction (\vec{s}), T est la température locale, Φ est la fonction de phase (fonction qui définit la répartition angulaire du rayonnement diffus), Ω' est l'angle solide. Dans l'équation (29), le premier terme du membre de gauche représente la variation de luminance au passage de la couche d'épaisseur ds du milieu semi-transparent ; le second terme du membre de gauche représente l'absorption et la diffusion de la luminance par la matière contenue dans l'élément de volume considéré ; le premier terme du membre de droite représente l'émission de la luminance par l'élément de volume considéré ; le second terme du membre de droite représente la diffusion de la luminance dans la direction s du rayonnement arrivant de toutes les directions.

Les matériaux de construction (comme le verre par exemple) ayant généralement des propriétés optiques différentes selon la longueur d'onde (λ) du rayonnement incident, il convient de distinguer deux types de rayonnement dans l'approche de modélisation nu-

mérique : le rayonnement courtes longueurs d'onde et le rayonnement grandes longueurs d'onde. Le premier est un rayonnement pour lequel les longueurs d'onde sont inférieures ou égales à 3 μm . Le second correspond au rayonnement dont les longueurs d'onde sont comprises entre 3 et 100 μm . La méthode qui a été retenue pour la résolution numérique de l'équation de transferts radiatifs dans le cadre de cette thèse (méthode aux ordonnées discrètes) permet de tenir compte du caractère bi-bande du rayonnement. La méthode aux ordonnées discrètes est présentée dans la section 3.4.3.

En transferts radiatifs, on distingue deux types de parois : les parois opaques et les parois semi-transparentes. Lorsqu'un rayonnement arrive sur une paroi opaque, une partie est absorbée et l'autre est réfléchi. La paroi opaque émet du rayonnement (rayonnement grandes longueurs d'onde) du fait de l'augmentation de sa température grâce au rayonnement qu'elle absorbe. Un milieu semi-transparent est un milieu au travers duquel une partie du rayonnement incident est interceptée, pour être absorbée et/ou diffusée. A la différence d'une paroi opaque, une paroi semi-transparente permet, non seulement d'absorber, de réfléchir et d'émettre du rayonnement, mais aussi d'en transmettre une partie de manière directe et/ou diffuse. L'étude de la transmission du rayonnement n'est pas nécessaire pour une paroi opaque, mais est indispensable pour les milieux semi-transparentes. Les milieux opaques et les milieux semi-transparentes se distinguent également par leurs propriétés optiques. Les propriétés optiques d'un corps réel se définissent généralement par rapport à celles d'un objet idéal plus connu sous l'appellation de "corps noir" dont le spectre électromagnétique ne dépend que de sa température. Un corps noir est un objet idéal qui absorberait toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit sans en réfléchir ou en transmettre. Un tel objet matériel n'existe pas, mais sert de référence pour des calculs en transferts radiatifs.

La quantité d'énergie émise ou absorbée par une paroi dépend de son émissivité. Un corps noir se caractérise aussi par le fait, qu'à l'équilibre thermique, l'absorptivité est égale à l'émissivité ($\alpha = \varepsilon$) (Loi de Kirchhoff). L'émissivité (ε) se définit comme étant la capacité d'un matériau à émettre de la chaleur de manière radiative. Elle correspond au flux radiatif de rayonnement thermique émis par un élément de surface à température donnée, rapportée à la valeur de référence qu'est le flux émis par un corps noir à cette

même température. Quant à l'absorptivité (α), elle correspond au flux radiatif absorbé par un élément de surface à température donnée, rapporté au flux incident.

3.4.2 Couplage entre l'ETR et l'équation de conservation de l'énergie

La variation de l'énergie d'un élément de volume est la somme de la variation due à la conduction et à la convection, de la production d'une source interne de chaleur, de la variation d'énergie due à l'effet de compressibilité et de l'énergie de dissipation visqueuse auxquelles s'ajoute la contribution par rayonnement à travers la matière translucide de cet élément de volume (Morille, 2012). Le stockage de l'énergie rayonnante sous forme de photons dans l'élément de volume est cependant généralement négligé devant le stockage de l'énergie interne. Le rayonnement n'entraîne donc pas de modification sur le terme transitoire de l'équation d'énergie (Siegel and Howell, 2002). Si l'on définit le vecteur flux radiatif (\vec{q}_s) comme suit :

$$\vec{q}_s = \int_0^\infty \int_0^{4\pi} L_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s} \cdot \vec{n} d\Omega' d\lambda \quad (30)$$

Avec L_λ la luminance monochromatique, \vec{s} un vecteur unitaire dans la direction de propagation du rayonnement et Ω' un angle solide, la contribution nette du rayonnement par unité de volume sur le bilan énergétique peut être exprimée par la divergence du vecteur flux radiatif total \vec{q}_s (Bouhoun Ali, 2016). Ainsi, l'équation de conservation de l'énergie (équation (21)) devient :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[a \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + \frac{S_h}{\rho c_p} - \frac{div(\vec{q}_s)}{\rho c_p} \quad (31)$$

3.4.3 Méthode des ordonnées discrètes (DO)

L'équation de transferts radiatifs (équation (29)) possède un terme intégral qui ne peut pas être résolu par les méthodes de discrétisation classiques utilisées pour résoudre les équations de transport. La résolution numérique de l'équation de transferts radiatifs nécessite donc l'usage d'une technique numérique particulière. Il existe plusieurs modèles numériques pour résoudre l'ETR (modèle DTRM, modèle DO, modèle S2S...).

Dans la version actuelle du logiciel ANSYS FLUENT, le modèle de rayonnement dit des Ordonnées Discrètes est le seul qui permet d'étudier séparément les influences des rayonnements solaire (rayonnement courtes longueurs d'onde) et atmosphérique (rayonnement grandes longueurs d'onde). Ce modèle est basé sur l'hypothèse que toute intégration faite sur l'espace des angles solides est remplacée par une quadrature angulaire numérique représentée par un nombre fini de directions orientées selon les vecteurs unitaires (ou ordonnées discrètes) sur lesquelles l'équation de transferts radiatifs est résolue. Le modèle DO suppose aussi que la résolution spatiale de l'ETR pour une direction donnée est faite sur un maillage par une méthode dite de volumes finis qui présente l'avantage d'être similaire à celle utilisée pour résoudre les équations de l'écoulement fluide et de l'énergie.

Le modèle DO est réputé pour être le plus complet des modèles radiatifs et présente l'avantage d'être celui pour lequel le plus grand nombre d'études d'ordre général sont disponibles ([Cha and Song, 2000](#); [Granate et al., 2016](#)). Dans les logiciels de CFD comme celui que nous utiliserons (ANSYS FLUENT), le choix de la méthode des ordonnées discrètes pour la résolution de l'ETR nécessite la définition de paramètres d'entrée pour la discrétisation angulaire. Des détails sur le choix de ces paramètres d'entrée seront apportés dans le chapitre consacré aux simulations numériques.

3.5 Choix du modèle de turbulence

La turbulence est un mode d'écoulement d'un fluide visqueux où des mécanismes internes d'échange d'énergie induisent la création et le maintien de toute une hiérarchie de mouvements chaotiques répartis continûment sur une large gamme d'échelles. Les écoulements turbulents se caractérisent par une apparence très désordonnée, un comportement difficilement prévisible et l'existence de nombreuses échelles spatiales et temporelles.

La turbulence peut être modélisée par différentes approches, plus ou moins complexes, avec des coûts informatiques plus ou moins élevés, en fonction de l'exactitude et de la précision des résultats voulus et des configurations d'écoulement étudiés (avec ou sans vortex par exemple). Parmi les principales approches utilisées pour modéliser la turbulence, on

peut citer :

- La simulation numérique directe (ou Direct Numerical Simulation, DNS) qui résout toutes les échelles de l'écoulement et ne pose aucune hypothèse sur la modélisation de l'écoulement autre que celle des lois de comportement du fluide. Cette méthode a la réputation d'être très fidèle et très précise, mais impose l'utilisation d'un maillage très fin pour pouvoir capter toutes les échelles de la solution.
- La simulation des grandes échelles (ou Large Eddy Simulation, LES) qui consiste à séparer les grandes structures, qui sont simulées directement, des petites échelles qui sont modélisées. Cette approche permet de travailler avec un maillage plus grossier que celui nécessaire pour la DNS.
- La modélisation statistique (RANS, Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) qui consiste à décomposer les variables de l'écoulement en une partie moyenne et une partie fluctuante avant de les injecter dans les équations de Navier-Stokes. Dans cette approche, seules les grandeurs moyennes sont résolues.

Etant donné le coût de calcul très élevé et, par conséquent, des ressources informatiques importantes que nécessite sa mise en œuvre, la DNS est restreinte à des écoulements à faibles nombre de Reynolds et à des géométries simples. La LES constitue un outil performant pour étudier la physique de la turbulence ainsi que les modèles censés en étudier les effets. Elle est actuellement plus proche du domaine de la recherche que celui de l'ingénierie car elle est encore limitée à des écoulements simples à nombres de Reynolds modérés, et sa mise en œuvre nécessite des ressources informatiques assez conséquentes. L'approche de modélisation RANS (qui est celle que nous utiliserons dans notre modélisation) est la plus répandue dans les études CFD, notamment en raison de son faible coût numérique.

3.5.1 Equations de fermeture

Dans l'approche statistique RANS, les variables des équations de conservation sont décomposées en composantes moyennes (moyenne d'ensemble ou moyenne temporelle) et fluctuantes. Pour les composantes de vitesse :

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (32)$$

où \bar{u}_i et u'_i sont les composantes moyenne et fluctuante de la vitesse. Pour la pression et les autres quantités scalaires, la décomposition se fait également comme suit :

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (33)$$

où ϕ désigne un scalaire tel que la pression, l'énergie ou la concentration d'une espèce.

En décomposant chaque grandeur en la somme de sa moyenne et de sa partie fluctuante, les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement moyennées deviennent respectivement :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (34)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \bar{f} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (35)$$

Dans les nouvelles équations, on peut remarquer l'apparition de termes supplémentaires, $\overline{u'_i u'_j}$, qui représentent les effets de la turbulence. Ces termes supplémentaires sont aussi appelés "contraintes de Reynolds" et doivent être modélisés afin de fermer le système d'équations.

Le modèle de fermeture $k-\varepsilon$ standard a été largement utilisé dans les études CFD pour sa facilité de mise en œuvre (Kichah et al., 2012). Il s'agit d'un modèle semi-empirique à deux équations qui permet la description générale de la turbulence au moyen de deux équations de transport : une pour l'énergie cinétique turbulente (k) et l'autre pour la dissipation (ε). Ce modèle a été utilisé, avec des résultats satisfaisants, dans de nombreuses études CFD (Bouhoun Ali, 2016; Bournet et al., 2007; Fatnassi et al., 2006; Kichah et al., 2012; Morille, 2012; Piscia et al., 2012; Wang et al., 2013). Dans nos simulations numériques, nous retiendrons la variante *RNG* du modèle de turbulence $k-\varepsilon$ pour des raisons que nous expliciterons dans le **Chapitre 6**. Les termes de l'énergie cinétique turbulente et de la dissipation s'écrivent respectivement :

$$k = \frac{1}{2} \overline{(u'_i u'_i)} \quad (36)$$

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_j}{\partial x_i}} \quad (37)$$

Les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente et la dissipation s'écrivent alors :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + \sigma_k^{-1} \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial x_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (38)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + \sigma_\varepsilon^{-1} \nu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - c_1 \frac{\nu_t \varepsilon}{k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (39)$$

avec :

$$\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (40)$$

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (41)$$

où ν_t est la viscosité cinématique turbulente. Les constantes empiriques sont : $c_\mu = 0.09$, $c_1 = 1.44$, $c_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

3.5.2 Lois de paroi

La plupart des modèles de turbulence proposés dans les logiciels CFD, notamment ceux issus des modèles RANS et LES, ne sont valables qu'au cœur de l'écoulement (i.e. dans l'écoulement loin des parois). Ceci est lié au fait que le maillage est généralement assez grossier dans les zones proches parois alors que les écoulements y possèdent des gradients plus importants. Il faut donc trouver des approches pour rendre ces modèles applicables le long des parois. Initialement développé pour la résolution des écoulements totalement turbulents, le modèle $k - \varepsilon$ standard est incapable, et c'est sa principale limitation, de fournir des résultats corrects proche des parois. Cela se constate notamment par les valeurs non nulles que prennent les variables de turbulence à la paroi ; ce qui ne représente aucunement une réalité physique ([Amrom, 2018](#)). La faiblesse de ce modèle auprès des parois solides tient au fait qu'il est basé sur une hypothèse selon laquelle la turbulence serait isotrope alors que la présence d'une paroi solide rend la turbulence anisotrope ([Frazza, 2015](#)). C'est pour cette raison que l'utilisation de ce modèle est souvent associée à l'usage d'une loi de paroi. Les lois de paroi sont un ensemble de formules semi-empiriques qui ont pour objectif de relier la solution obtenue aux mailles proches de la paroi à leurs valeurs correspondantes sur la paroi elle-même.

Un concept de vitesse normalisée (u^+) et de distance normalisée (y^+) à la paroi a été inventé pour distinguer les différentes zones qui existent à proximité de la paroi. La vitesse normalisée et la distance normalisée se calculent comme suit :

$$u^+ = \frac{u}{u^*} \quad (42)$$

$$y^+ = \frac{\rho u^* y}{\mu} \quad (43)$$

L'expression de u^* est donnée par l'équation :

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (44)$$

τ_w est la contrainte de cisaillement à la surface de la paroi solide et se détermine grâce à l'équation :

$$\tau_w = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (45)$$

Beaucoup d'expériences ont montré l'existence de trois zones dans la région proche de la paroi (Cousteix, 1989; Fernholz and Finley, 1996) :

- **La zone sous-couche visqueuse** qui correspond à la zone la plus proche de la paroi (valeurs de y^+ comprises entre 0 et 5). Dans cette zone, les effets de la turbulence sont négligeables devant ceux de la viscosité moléculaire.
- **La zone logarithmique** qui tire son nom du profil de vitesse dans cette zone. Les valeurs de y^+ dans cette zone sont comprises entre 30 et 100. Les effets de viscosité moléculaire y sont considérés négligeables devant ceux de la turbulence.
- **La zone tampon** qui est une zone intermédiaire entre les deux précédentes (valeurs de y^+ comprises entre 5 et 30). Les effets turbulents y sont considérés comme étant du même ordre de grandeur que les effets visqueux.

Dans la sous-couche visqueuse, le profil de vitesse est directement proportionnel à la distance à la paroi et s'écrit donc comme suit :

$$u^+ = y^+ \quad (46)$$

Dans la zone logarithmique (sous-couche turbulente), la loi qui régit le profil de vitesse s'écrit :

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (47)$$

κ et B étant des constantes obtenues expérimentalement.

3.6 Sous-modèle de culture et couplage avec les équations de conservation de quantité de mouvement, de l'énergie et de vapeur d'eau

L'impact du végétal sur le microclimat se fait de deux manières : le premier impact est mécanique car le végétal induit une perte de charge qui influe sur l'équation de conservation de la quantité de mouvement, le second est écophysologique et se traduit par l'ajout de termes source ou puits (qui se déterminent grâce à un bilan énergétique sur le végétal) dans les équations de conservation de l'énergie et de la masse de vapeur d'eau.

3.6.1 Effet mécanique des arbres

Pour intégrer l'impact du végétal sur l'équation de conservation de la quantité de mouvement, on utilise traditionnellement un modèle assimilant les arbres à un milieu poreux (Darcy, 1856). Un milieu poreux est un matériau constitué d'une matrice solide supposée rigide et parcourue par un réseau de pores inter-connectés. Il se caractérise par sa porosité (Ψ) qui est définie comme étant le rapport du volume occupé par les pores par le volume total occupé par le milieu.

Du point de vue aéraulique, le logiciel CFD que nous utilisons calcule une vitesse superficielle basée sur le débit volumique de l'écoulement. Dans les équations de conservation, la vitesse superficielle est reliée à la vitesse physique grâce à la relation :

$$\vec{v}_{\text{superficielle}} = \Psi \vec{v}_{\text{physique}} \quad (48)$$

où Ψ est la porosité du milieu.

Du point de vue transferts thermiques, le logiciel ANSYS FLUENT résout l'équation classique de transport d'énergie dans la zone poreuse en modifiant uniquement le flux

de conduction et les termes transitoires. Dans le milieu poreux, le flux conductif fait intervenir une conductivité effective et le terme transitoire inclut l'inertie thermique de la matrice solide sur le milieu. La conductivité thermique effective dans le milieu poreux, λ_{eff} , est calculée par ANSYS FLUENT comme étant la moyenne volumique de la conductivité thermique du fluide et de la conductivité thermique du solide :

$$\lambda_{\text{eff}} = \Psi\lambda + (1 - \Psi)\lambda_s \quad (49)$$

où Ψ est la porosité du milieu (sans dimension), λ est la conductivité du fluide, λ_s est la conductivité thermique de la matrice solide du milieu poreux. Toutes les conductivités thermiques sont exprimées dans la même unité ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Quant à la perte de charge induite par le végétal, elle se formalise par l'ajout d'un terme source dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement. Comme le montre l'équation ci-dessous (aussi appelé équation de Darcy-Forchheimer), ce terme source est composé de deux termes : un terme de perte visqueuse (le premier terme du côté droit de l'équation), et un terme de perte inertielle (le deuxième terme du côté droit de l'équation).

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{K} u_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |u| u_i \right) \quad (50)$$

où S_i est le terme source dans la composante i en (N.m^{-3}), μ est la viscosité dynamique du fluide en (Pa.s), K est la perméabilité (sans unité), u_i est la composante i du vecteur vitesse en (m.s^{-1}), C_2 est le facteur de résistance inertielle (sans unité), ρ est la masse volumique du fluide en (kg.m^{-3}), $|u|$ est le module de la vitesse en (m.s^{-1}). La perméabilité est l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression.

Dans l'équation (50), le terme linéaire de la vitesse (terme de Darcy) est négligeable devant le terme quadratique de la vitesse. La formulation généralement utilisée pour modéliser l'impact aérodynamique des arbres ne prend en compte que le terme inertielle de l'équation (50) et s'écrit [Boulard and Wang \(2002\)](#) :

$$S_i = -LAD \cdot c_d \cdot |u|^2 \quad (51)$$

LAD est la densité foliaire en ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$), c_d est le coefficient de trainée (sans unité), $|u|$ est la vitesse du fluide en ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Le logiciel ANSYS FLUENT permet également de modéliser l'impact aérodynamique du végétal comme une loi en puissance du module de la vitesse du fluide comme l'indique l'équation suivante :

$$S_i = -C_0 |u_i|^{C_1} = -C_0 |u_i|^{(C_1-1)} u_i \quad (52)$$

Une analogie entre les équations (51) et (52) permet de déduire que :

$$C_0 = LAD \cdot c_d \quad (53)$$

et

$$C_1 = 2 \quad (54)$$

L'équation de conservation de la quantité de mouvement deviendra donc :

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - C_0 |u|^{(C_1-1)} u_i \quad (55)$$

Le choix des valeurs du LAD et du c_d (et donc du coefficient C_0) fera l'objet d'un développement dans le **Chapitre 6**.

3.6.2 Effet éco-physiologique des arbres

Comme pour tout rayonnement électromagnétique reçu par un système donné, le rayonnement solaire reçu par un couvert végétal subit trois phénomènes : une partie est réfléchie ou diffusée, une autre partie est transmise avec réfraction et une dernière est absorbée. La partie du rayonnement absorbée par le couvert végétal induit une variation de la température des feuilles (et donc un flux de chaleur sensible) et de la transpiration (et donc un flux de chaleur latente) (Boulard and Wang, 2002). Ces phénomènes sont pris en compte dans le logiciel de CFD via un bilan de masse (vapeur d'eau) et de chaleur sur les feuilles par le biais d'une routine spécifique (Morille, 2012). A l'équilibre, le bilan d'énergie sur le couvert végétal se traduit par l'équation :

$$R_{n-abs} = Q_s + Q_l \quad (56)$$

R_{n-abs} est le rayonnement net absorbé par une cellule du couvert végétal en ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$), Q_s est le flux volumique de chaleur sensible en ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$), Q_l est le flux volumique de chaleur latente en ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$).

3.6.2.1 Source de chaleur sensible

La chaleur sensible est celle qui modifie la température d'un corps. Pour un couvert végétal, la chaleur sensible dépend de la différence de température entre la feuille et l'air extérieur, mais aussi d'un coefficient d'échange qui dépend de la résistance aérodynamique de la feuille. Pour tenir compte des échanges thermiques entre le couvert végétal et l'air extérieur dans les études CFD, [Stanghellini \(1987\)](#) propose le sous-modèle suivant :

$$Q_s = 2LAD \cdot \rho \cdot c_p \frac{(T_f - T_a)}{r_a} \quad (57)$$

qui peut s'écrire aussi sous la forme :

$$Q_s = 2LAD \cdot h_c (T_f - T_a) \quad (58)$$

LAD est la densité de surface foliaire en ($\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$, m^2 de feuille par m^3 de volume occupé par le feuillage), ρ est la masse volumique de l'air en ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), c_p est la capacité calorifique de l'air en ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), T_f est la température de feuille en (K), T_a est la température de l'air au voisinage de la feuille en (K), r_a est la résistance aérodynamique de feuille en ($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$), h_c est le coefficient d'échange convectif de chaleur sensible en ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$).

3.6.2.2 Source de chaleur latente (transpiration)

Pour estimer la transpiration des plantes, deux méthodes sont généralement utilisées : la méthode dite "directe" et la méthode de Penman-Monteith ([Morille, 2012](#)). La première relie la transpiration au déficit de pression de vapeur de la feuille. Elle a été utilisée dans de nombreuses études CFD car elle nécessite moins de paramètres et est, par conséquent, la plus simple à mettre en œuvre. La seconde, très utilisée dans les travaux expérimentaux, commence à être utilisée dans les études CFD malgré la complexité de sa mise en œuvre en raison du nombre important de paramètres dont elle dépend. Le modèle de Penman-Monteith (PM) est issu d'un bilan d'énergie (via la température de feuille

présentée dans l'équation (60)) au niveau du couvert végétal hypostomatique (i.e. les stomates sont situés uniquement sur la face inférieure des feuilles comme c'est le cas pour nos pommiers d'ornement) et est, par conséquent, considéré comme le modèle le plus complet (Stanghellini, 1987). Dans notre étude, nous utiliserons l'approche PM s'appuie sur le modèle dit "big leaf" et consiste à modéliser une grande feuille virtuelle possédant les propriétés moyennes des feuilles du couvert végétal (Bouhoun Ali, 2016).

Méthode de Penman-Monteith

La formule utilisée par Penman-Monteith, issue du bilan d'énergie à l'équilibre de cette grande feuille, pour estimer la transpiration des plantes s'écrit :

$$Q_l = L_v \cdot LAD \cdot \rho \frac{(\omega_f - \omega_a)}{r_a + r_s} \quad (59)$$

L_v est la chaleur latente de vaporisation de l'eau en (kJ.kg⁻¹), LAD est la densité de surface foliaire en (m².m⁻³), ρ est la masse volumique de l'air en kg.m⁻³, ω_f est l'humidité absolue de l'air à l'intérieur de la feuille considéré comme saturé en vapeur d'eau en (kg.kg⁻¹) et dépend de la température de feuille (T_f), ω_a est l'humidité absolue de l'air au voisinage de la feuille en (kg.kg⁻¹), r_a est la résistance aérodynamique de feuille en (s.m⁻¹), r_s est la résistance stomatique de feuille en (s.m⁻¹). La température de feuille (T_f) est la sortie du sous-modèle de culture. Elle est déduite du bilan énergétique présenté dans l'équation (56) comme l'indique l'équation suivante :

$$T_f = T_a + \frac{r_a}{2LAD \cdot \rho \cdot c_p} (R_{n-abs} - Q_l) \quad (60)$$

Le calcul de la température de feuille permet de mettre à jour le flux de chaleur sensible (Q_s) et le flux de chaleur latente (Q_l) grâce à un processus itératif.

Résistance stomatique en confort hydrique

L'adaptation des plantes aux variations du microclimat et à la disponibilité en eau du substrat s'effectue via la régulation de l'ouverture des stomates qui peut être appréhendée par la résistance stomatique (Bouhoun Ali, 2016). Les stomates sont des pores dans

l'épiderme des feuilles, qui se ferment généralement dans l'obscurité et qui s'ouvrent à la lumière. Les stomates permettent les échanges gazeux en dioxyde de carbone, dioxygène, et vapeur d'eau qui sont nécessaires à la transpiration. La résistance stomatique est une variable importante pour évaluer la réponse physiologique de la plante à l'environnement physique et biologique qui l'entoure (Irmak and Mutiibwa, 2009). La modélisation et la simulation numérique de la transpiration des plantes a suscité un intérêt croissant durant les dernières décennies, principalement pour évaluer les besoins en eau des plantes et ajuster l'irrigation (Avisar et al., 1985). La résistance stomatique des plantes est un des paramètres clés pour le contrôle de la transpiration et, sa réponse aux différentes variables climatiques doit donc être décrite le plus précisément possible. Choudhury and Idso (1985) pensent aussi qu'un modèle réaliste de la transformation du rayonnement absorbé par un couvert végétal en flux de chaleur sensible et latente doit intégrer correctement le contrôle des flux de chaleur latente par la résistance stomatique des feuilles constituant le couvert.

Les principaux facteurs qui influencent la résistance stomatique sont (Damour, 2008) : le rayonnement global, la température de l'air, le déficit de pression de vapeur air-air, le potentiel hydrique du sol et la concentration de dioxyde de carbone. Pour modéliser l'évolution de la résistance stomatique en fonction des principaux facteurs climatiques et/ou hydrique, un modèle multiplicatif de résistance stomatique basé sur l'hypothèse que chaque variable climatique ou hydrique participe de manière indépendante à l'établissement du niveau d'ouverture des stomates a été proposé et utilisé dans la littérature (Jarvis, 1976). Boulard et al. (1991) ont montré cependant que l'hypothèse de (Jarvis, 1976) selon laquelle il n'y a pas d'interaction entre les différents facteurs n'est pas valable pour aux moins trois facteurs climatiques : le rayonnement, la température de l'air et le déficit de pression de la vapeur saturante. Dans le cadre de leurs essais, sans enrichissement en dioxyde de carbone (CO_2) et avec une alimentation hydrique optimale, Boulard et al. (1991) ont constaté qu'il n'y a presque pas de variation en fonction des facteurs CO_2 et Ψ (le potentiel hydrique du sol). Ils n'ont donc considéré que les trois fonctions suivantes : $f_1(R_g)$, $f_2(T)$ et $f_3(D)$ où R_g est le rayonnement global incident, T est soit la température de l'air, soit la température de feuille, D est le déficit de pression de vapeur feuille-air. Parmi les nombreux modèles de conductance stomatique (ou de résistance stomatique, la résistance étant l'inverse de la conductance) proposés dans la littérature

(Damour et al., 2010), notre attention s'est particulièrement portée sur celui qui a été développé par Thorpe et al. (1980) et qui a la particularité d'avoir été établi pour des pommiers (Golden Delicious). Ce modèle s'écrit :

$$g_s = g_r \frac{1 - \alpha^* D}{1 + \beta^* / Q_p} \quad (61)$$

où g_s est la conductance stomatique en (mm.s^{-1}), g_r est la conductance stomatique de référence en (mm.s^{-1}), D est le déficit de pression de vapeur feuille-air en kPa, Q_p est le rayonnement PAR exprimé en $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, α^* et β^* sont des coefficients empiriques. les valeurs de α^* sont comprises entre 0.20 et 0.30 kPa^{-1} , celles de β^* sont comprises entre 59 et 79 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Le déficit de pression de vapeur feuille-air se détermine comme suit :

$$D = P_{v,f}^{sat} - P_{v,a} \quad (62)$$

où $P_{v,f}^{sat}$ est la pression de la vapeur saturante à la température de la feuille en (Pa) et peut être calculée à partir de la température de feuille (T_f) grâce à la formule :

$$P_v^{sat}(T_f) = 6.11 \times 10^2 \cdot \exp\left(\frac{17.25 \times T_f}{237.8 + T_f}\right) \quad (63)$$

$P_{v,a}$ est la pression partielle de vapeur d'eau de l'air en (Pa) et peut être calculée à partir de l'humidité relative de l'air en pourcentage (RH) et de la pression de vapeur saturante à la température de l'air ($P_v^{sat}(T_a)$) en utilisant l'expression suivante :

$$P_{v,a} = \frac{RH}{100} P_v^{sat}(T_a) \quad (64)$$

En tenant compte des équations (63) et (64), l'équation (62) peut se réécrire sous la forme :

$$D = 6.11 \times 10^2 \cdot \exp\left(\frac{17.25 \times T_f}{237.8 + T_f}\right) \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (65)$$

Résistance aérodynamique

Il a été vu dans la section 3.6.2.1 que le flux de chaleur sensible pouvait être exprimé de deux manières. Une analogie entre l'équation (57) et l'équation (58) permet d'en déduire

l'expression de la résistance aérodynamique (r_a). Celle-ci peut s'écrire en effet comme suit :

$$r_a = \frac{\rho c_p}{h_c} \quad (66)$$

où r_a est la résistance aérodynamique en (s.m^{-1}), ρ est la masse volumique de l'air en kg.m^{-3} , c_p est la capacité thermique massique de l'air en ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), h_c est le coefficient d'échange convectif en ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).

Pour modéliser la résistance aérodynamique, il est donc nécessaire d'évaluer la valeur du coefficient d'échange convectif (h_c). Celui-ci peut être exprimé en fonction du nombre de Nusselt (Nu) comme le montre l'équation :

$$h_c = \frac{Nu.\lambda}{d} \quad (67)$$

h_c est le coefficient d'échange convectif en ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), Nu est le nombre de Nusselt (sans unité), λ est la conductivité thermique de l'air en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, d est une dimension caractéristique en (m).

L'expression du nombre de Nusselt (Nu) dépend à la fois du régime d'écoulement et du mode de convection. Pour caractériser un écoulement (TABLE 7), on se base généralement sur deux nombres adimensionnels : le nombre de Reynolds (Re) et le Grashof (Gr) définis respectivement par les équations (68) et (69).

$$Re = \frac{ud}{\nu} \quad (68)$$

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T d^3}{\nu^2} \quad (69)$$

u est la vitesse de l'air en (m.s^{-1}), d est une dimension caractéristique en (m), ν est la viscosité cinématique de l'air en ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$), g est l'accélération de la gravité en (m.s^{-2}), β est le coefficient d'expansion thermique en (K^{-1}), ΔT est la différence de température entre la température du fluide loin de la plaque et la température de la plaque en (K).

Mode de convection	Écoulement laminaire	Écoulement turbulent
Convection libre ($Re^2 < Gr$)	$104 < Gr < 109$	$109 < Gr < 1012$
Convection mixte ($Re^2 = Gr$)	$103 < Gr < 109$	$109 < Gr < 1012$
Convection forcée ($Re^2 > Gr$)	$Re < 3105$	$Re > 5105$

TABLE 7 – Modes de convection et régimes d’écoulement (Bouhoun Ali, 2016).

L’écoulement le long de la couche limite des feuilles est largement considéré comme laminaire, même si l’écoulement est turbulent un peu plus loin de la feuille (Bouhoun Ali, 2016). L’expression du nombre de Nusselt peut alors s’écrire en fonction du mode de convection. La feuille est assimilée à une plaque plane horizontale (Monteith and Unsworth, 2013; Morille et al., 2013; Roy et al., 2002). Ainsi, les expressions du nombre de Nusselt pour une convection libre, pour une convection mixte et pour une convection forcée sont respectivement :

$$Nu = 0.59(Pr.Gr)^{0.25} \quad (70)$$

$$Nu = 0.68(Re^{1.5} + Pr^{0.75})^{0.33} \quad (71)$$

$$Nu = 0.67Re^{0.5}Pr^{0.33} \quad (72)$$

avec Pr le nombre de Prandtl qui vaut 0.71 pour l’air.

3.7 Discrétisation des équations de transport

Une discrétisation consiste à remplacer un problème de dimension infinie par un problème de dimension finie afin de permettre sa résolution par un ordinateur. La discrétisation d’un problème continu engendre systématiquement une erreur sur sa solution, d’où l’importance du choix de la méthode de discrétisation des équations de transport.

3.7.1 Discrétisation temporelle

Pour prendre en compte le caractère instationnaire des phénomènes physiques que nous étudions, il est nécessaire de faire une hypothèse sur l’évolution temporelle des différentes variables entre les instants t et $t + \Delta t$, avec Δt le pas de temps. La méthode d’Euler est

souvent utilisée pour la discrétisation temporelle des équations de Navier-Stokes incompressibles. Il s'agit d'une méthode basée sur le développement de Taylor à l'ordre 1 du terme temporel comme le montrent les équations (73) et (74) qui représentent les deux schémas possibles. Le schéma d'ordre 1 est moins précis que le schéma d'ordre 2, mais il permet d'atteindre plus rapidement la convergence ; ce qui représente un grand avantage pour la résolution de problèmes instationnaires.

$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial t}\right)^0 = \frac{\Phi^1 - \Phi^0}{\Delta t} \quad (73)$$

$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial t}\right)^1 = \frac{\Phi^1 - \Phi^0}{\Delta t} \quad (74)$$

avec : $\left(\frac{\partial\Phi}{\partial t}\right)^0$ la dérivée de la variable Φ à l'instant t ; $\left(\frac{\partial\Phi}{\partial t}\right)^1$ la dérivée de la variable Φ à l'instant $t + \Delta t$; Φ^0 la valeur de la variable Φ à l'instant t ; Φ^1 la valeur de la variable Φ à l'instant $t + \Delta t$ et Δt le pas de temps.

Les équations (73) et (74) correspondent respectivement à des schémas d'Euler explicite et implicite. Ces deux schémas ont été testés par Patankar (1980) et ont conduit à la conclusion que le schéma implicite était plus stable que celui explicite. Les tests réalisés par Patankar (1980) lui ont aussi permis de constater que la stabilité du schéma d'Euler implicite était indépendante de la taille des éléments de discrétisation (spatiale et/ou temporelle), alors que celle du schéma d'Euler explicite n'était atteinte que si le pas de discrétisation temporelle (Δt) vérifiait la condition suivante :

$$\Delta t < \frac{\rho\Delta x^2\Delta y^2}{2\Gamma_\Phi} \quad (75)$$

Δx et Δy sont les pas de discrétisation spatiaux, ρ est la masse volumique du fluide et Γ_Φ est la constante de diffusion. Comme cela était le cas dans beaucoup d'études CFD (Bouhoun Ali, 2016; Bournet et al., 2007; Morille, 2012), nous utiliserons le schéma d'Euler implicite du premier ordre pour la discrétisation du terme temporelle des équations qui seront résolues.

3.7.2 Discrétisation spatiale par la méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est une méthode numérique de plus en plus populaire pour la résolution numérique des équations différentielles. Elle consiste à intégrer sur des volumes élémentaires aussi appelés «volumes de contrôle» les équations de conservation écrites sous forme intégrale. Dans la littérature, cette méthode est présentée de plusieurs manières, mais l'idée reste la même : garantir la conservation des grandeurs macroscopiques. Des auteurs comme [Roache \(1972\)](#) présentent la méthode des volumes finis en termes de loi de conservation : le taux d'augmentation de la quantité Φ à l'intérieur d'un volume de contrôle est égal au flux à travers les faces auquel on ajoute la production et on retranche la dissipation à l'intérieur du volume de contrôle ([Smaoui, 1996](#)). Le principe de la méthode des volumes finis est présenté dans le manuscrit de thèse de ([Bouhoun Ali, 2016](#)). La méthode des volumes finis est la méthode de discrétisation spatiale la plus utilisée en mécanique des fluides.

Par rapport à la classique méthode des différences finies, la méthode des volumes finis présente, entre autres, les avantages suivants ([Qian et al., 2011](#)) :

- Une discrétisation spatiale totalement flexible c'est-à-dire un maillage qui puisse s'adapter à des frontières de forme irrégulière afin de réduire les erreurs géométriques, et donc, d'être raffiné localement pour optimiser la résolution dans les régions présentant un intérêt particulier ou dans les régions à forts gradients.
- Des équations présentées sous forme intégrale, ce qui est souvent la façon dont elles sont issues des lois physiques fondamentales.
- Il n'est pas nécessaire que les variables dépendantes soient différentiables partout, ce qui signifie qu'un nombre plus grand de problèmes peut être résolu.
- La méthode des volumes finis conserve naturellement les variables puisque, si deux cellules voisines partagent une interface commune, le flux total d'une quantité conservée sortant d'une cellule sera le même que celui entrant dans l'autre cellule.

Comparée à la méthode des éléments finis, la méthode des volumes finis permet d'obtenir des résultats de bonne qualité pour un temps de calcul deux fois moins long et pour un espace de stockage dix fois moins important ([Molina-Aiz et al., 2010](#)), ce qui représente

un très grand avantage. Cette méthode permet aussi de travailler avec des mailles de forme quelconque, et donc de traiter des problèmes dont la géométrie est complexe. Ces différentes raisons justifient l'utilisation de la méthode des volumes finis dans la plupart des logiciels CFD.

3.8 Synthèse du système d'équations

Bien qu'elles soient valables pour étudier des écoulements turbulents, les équations de base de la dynamique des fluides ne permettent pas de tenir compte des fluctuations turbulentes. Des modifications doivent donc être apportées aux équations de base si l'on veut prendre en compte le caractère turbulent de l'écoulement. La prise en compte de la turbulence et de l'ajout des termes puits/source dans les équations de conservation permet d'obtenir le système d'équations suivant :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (76)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \bar{f} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial^2 x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (77)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \overline{u_i T} \right) + \frac{S_h}{\rho c_p} \quad (78)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{y}_m)}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{y}_w \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \cdot D_w \frac{\partial \bar{y}_w}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j y_m} \right) + S_m \quad (79)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \sigma_k^{-1} \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (80)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((v + \sigma_\varepsilon^{-1} \nu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - c_1 \frac{\nu_t \varepsilon}{k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (81)$$

Les équations (36) et (37) décrites dans la section 3.5.1 font également partie de ce système d'équations.

La plupart des phénomènes présentés dans ce chapitre (écoulement de l'air, transport et diffusion d'espèces, transferts thermiques, rayonnement...) étant bien connus dans la littérature ou bien représentés dans le logiciel de simulation ANSYS FLUENT, nous

ne les avons décrits qu'assez brièvement. Le sous-modèle radiatif et le sous-modèle de culture qui constituent une originalité de ce travail de thèse sont en revanche présentés de manière plus approfondie dans le **Chapitre 6**.

Chapitre 4

Dispositif expérimental et instrumentation

4.1 Objectifs du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental consiste en une rue canyon en milieu extérieur à échelle réduite. Son objectif est de fournir des données permettant de comprendre et de quantifier les mécanismes biophysiques mis en jeu à l'intérieur de la rue, mais aussi d'alimenter et de valider le modèle numérique qui a été mis en œuvre. Les mesures climatiques réalisées dans les différentes modalités ont aussi permis une évaluation du confort thermique sur la base d'indices de confort humain disponibles dans la littérature.

4.2 Présentation de la rue canyon

L'installation expérimentale est composée d'une rue canyon à l'échelle $(1/5)^e$, construite sur le site de l'Institut Agro, à Angers ($47^{\circ}28'N$, $0^{\circ}33'E$). Elle est située dans un environnement assez construit, avec notamment la présence de serres expérimentales à l'Est, les champs de l'INRAE et une haie d'arbres à l'Ouest (FIGURE 16). La construction de la rue canyon a été initiée en 2017 dans le cadre du travail de [Thomasset \(2017\)](#). La première phase de sa construction s'est déroulée entre juillet 2017 et janvier 2019.

4.2.1 Caractéristiques de la rue canyon

La rue canyon est une maquette à l'échelle $1/5^e$, orientée Nord-Sud. Elle mesure 15.6 m de longueur et 2 m de largeur. Les bâtiments qui la composent ont une hauteur de 2 m et une largeur de 2 m. La rue peut donc être qualifiée de régulière puisque son rapport d'aspect (ratio entre la hauteur des bâtiments et la largeur de la rue) vaut 1. Le choix de bâtiments à section carrée (FIGURE 17) se justifie par le fait que cette configuration se retrouve en milieu urbain. Les murs des bâtiments donnant sur l'intérieur de la rue sont en béton et ont une épaisseur de 0.1 m. Les murs des bâtiments donnant à l'extérieur de la rue ainsi que les toits sont en ossature bois. Un pare-pluie et un bardage métallique assurent la protection de ces derniers contre les intempéries.

Le sol en dessous de la rue canyon est constitué d'une couche de bitume de 0.04 m d'épaisseur, d'une couche de grave d'une épaisseur de 0.25 m et d'une couche de sol brun au-delà de 0.25 m de profondeur. Ces valeurs sont conformes à l'agencement des voiries



FIGURE 16 – Emplacement de la rue canyon sur le site de l’Institut Agro, à Angers (Source : Google Maps).

traditionnelles. Au total, 9 fosses de plantation ont été creusées à l’intérieur de la rue, dont 8 pour accueillir des arbres. La neuvième fosse n’a été creusée que pour reproduire des conditions de sol identiques dans la zone non-végétalisée. Les dimensions intérieures des fosses sont : 1.1 m pour la longueur, 0.8 m pour la largeur, et 0.6 m pour la profondeur. La partie supérieure de chaque fosse est fermée par une plaque de polycarbonate cellulaire recouverte d’un papier bitumineux.

Une deuxième tranche de travaux a été réalisée entre novembre 2019 et février 2020. En effet, les murs en béton ont été isolés du côté intérieur avec du polystyrène expansé d’une épaisseur de 0.12 m pour limiter les échanges de chaleur entre la rue et l’intérieur des bâtiments. Les entrées des bâtiments ont été fermées par des plaques en polycarbonate pour limiter les échanges convectifs entre l’extérieur et l’intérieur des bâtiments.

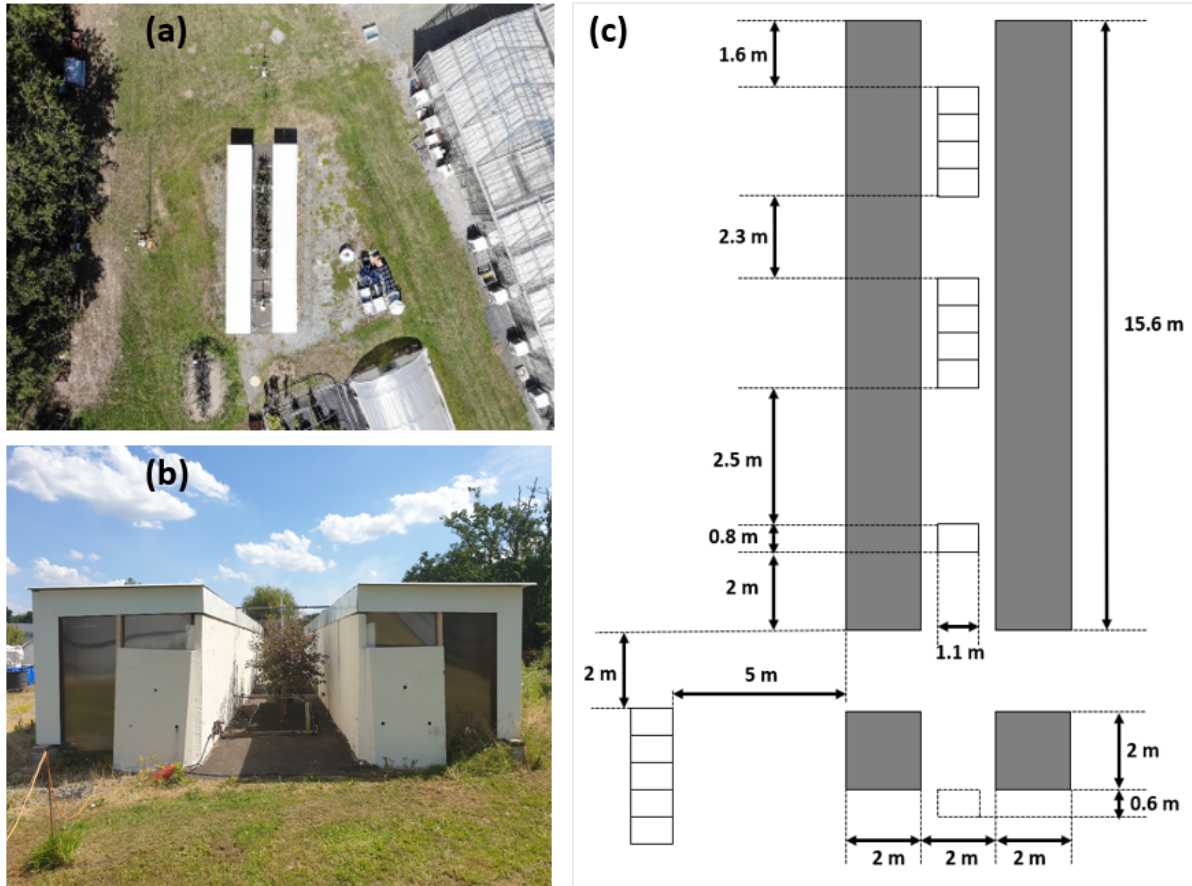


FIGURE 17 – Vue d’ensemble de la rue canyon : (a) : vue de dessus (source : INRAE, unité de recherche OPAALE), (b) : vue de face, (c) : schéma de la rue avec les différentes dimensions.

4.2.2 Arbres

Il existe plusieurs types de végétation en milieu urbain : les arbres, les buissons, les pelouses, les parcs etc. Dans notre expérimentation, nous avons choisi d’utiliser des arbres d’alignement du fait, d’une part, que leur installation nécessite moins d’espace par rapport à celle d’un parc urbain ou d’une pelouse, et d’autre part, pour pouvoir bénéficier des effets d’ombrage apportés par la végétation haute.

Comme nous pouvons le voir sur la FIGURE 18, la rue est divisée en trois modalités organisées du Nord au Sud : une modalité végétalisée au Nord de la rue, une modalité végétalisée au milieu de la rue et une modalité sans arbre au Sud qui sert de témoin. Dans chaque modalité végétalisée, il y a une série de 5 arbres mais seuls les trois arbres centraux sont étudiés, les deux autres arbres étant sujets à des effets de bords. Le choix des 5 arbres par modalité végétalisée est justifié par le fait que nous souhaitons caractériser les arbres en tant que tels, et qu'il importe donc de disposer d'échantillons de 3 arbres au minimum bénéficiant de conditions similaires pour envisager des traitements statistiques. La nécessité d'avoir une rangée de 5 arbres par modalité et le fait que seulement quatre fosses aient été creusées pour chaque modalité avait conduit à ajouter 2 arbres, placés sur le bitume dans des pots de 20 cm de hauteur, en dehors des fosses. Ces arbres constituaient des arbres "bordure", non instrumentés. Pour limiter leur impact sur l'aéroulque de la rue, ils ont été placés dans des pots de 20 cm de haut et 40 cm de diamètre.

Pour étudier l'impact de l'environnement urbain (représenté ici par la rue canyon) sur le fonctionnement physiologique des arbres, 5 arbres supplémentaires en confort hydrique ont été placés à l'extérieur de la rue canyon. Ils ont été disposés au Sud-Ouest de la rue pour ne pas être impactés par les phénomènes d'ombrage de la rue. Les 5 arbres à l'extérieur de la rue ont été rempotés dans des pots identiques à ceux dans lesquels ont été rempotés les arbres à l'intérieur de la rue. Ces pots, comme ceux utilisés à l'intérieur de la rue, sont déposés dans des bacs, mais avec de la terre butée autour. La fermeture de chaque fosse est identique à celle des fosses en rue.

Pour répondre aux objectifs de la thèse, l'espèce d'arbre qu'il fallait retenir devait avoir un développement relativement limité à l'âge adulte (3 ou 4 m) pour s'adapter à l'échelle réduite de la rue, avoir une transpiration assez importante, fournir une densité d'ombrage importante, présenter un développement relativement homogène entre sujets, pouvoir réagir face aux agresseurs extérieurs. C'est pour satisfaire à ce cahier des charges que le pommier d'ornement *Malus coccinella*® 'Courtarrow' (FIGURE 19) a été choisi après discussion avec des spécialistes de l'arboriculture et des échanges avec les pépinières Briant Jeunes plants qui nous ont gracieusement fourni les plantes. Les *Malus coccinella*® ne sont généralement pas utilisés comme arbres d'alignement, en revanche le genre "malus"

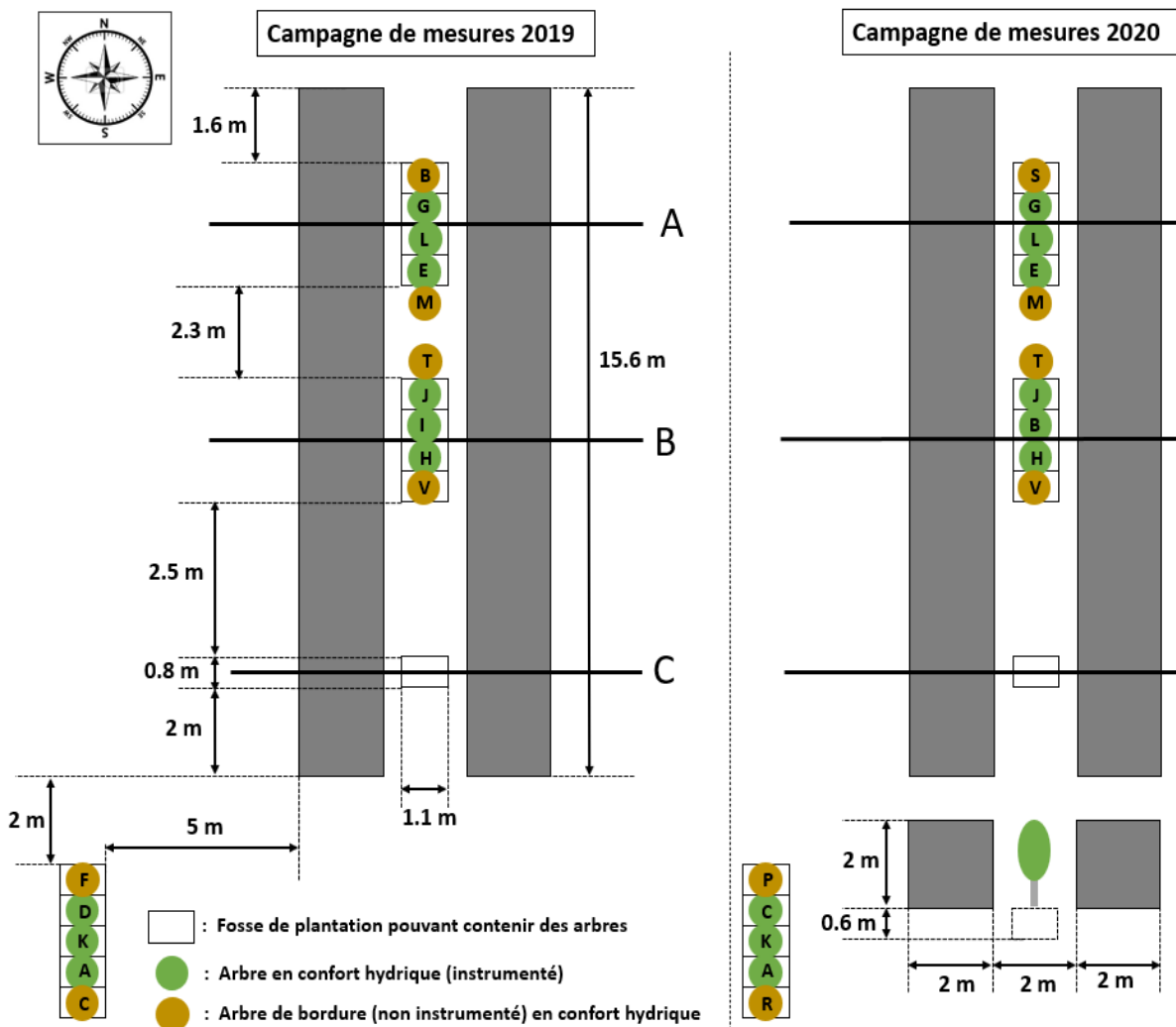


FIGURE 18 – Emplacement des arbres dans la rue pour les campagnes de mesure 2019 et 2020. Les traits horizontaux nommés A, B, C, D sont les 4 plans équipés de capteurs microclimatiques qui traversent perpendiculairement chacune des modalités.

est assez commun en ville (jardin, squares...).

Les arbres utilisés pour l'étude sont des sujets bouturés, élevés en pépinière (Briant Jeunes Plants) dans des pots de 1 litre. Un lot le plus homogène possible (même hauteur de sion,

même diamètre à la base) a été sélectionné pour les besoins de notre expérimentation. Les arbres ont été acquis par l'unité EPHor en décembre 2017, à l'âge de 18 mois environ, puis, ils ont été rempotés au printemps 2018 dans des pots de 6 L avec un mélange terre végétale/compost dans des proportions volumiques 60/40%. Le choix de ce ratio volumique et en particulier de la proportion de compost dans le mélange repose sur les pratiques courantes des aménageurs d'espaces verts (Bacholle et al., 2006). D'un point de vue plus scientifique, ce ratio donne des garanties de la qualité agronomique durable des sols urbains supports d'arbres de plantation. L'unité EPHor a travaillé pendant plusieurs années sur l'effet de différentes doses de composts dans les sols sur les propriétés structurales du sol (Cannavo et al., 2014, 2018; Vidal-Beaudet et al., 2012) en montrant qu'une proportion de 40% de compost en volume était le meilleur compromis entre la qualité agronomique du sol et la croissance des arbres.



FIGURE 19 – Quelques photographies des arbres au cours du temps (S. Mballo).

Les arbres ont ensuite été rempotés dans des pots de capacité volumique égale à 80 L en fin mars 2019 (cf section 4.2.3). L'espace dans les fosses autour des pots a été isolé pour limiter les échanges thermiques. La solution d'un remplissage de cet espace avec

des chips de polystyrène a été retenue pour les campagnes de mesures 2019 et 2020 (FIGURE 20). Les chips limitent en effet les mouvements d'air. Elles n'ont en revanche pas la même inertie que la terre. Ce choix résulte donc d'un compromis pour faciliter l'accès aux arbres et éventuellement les enlever sans trop de difficultés en cas de besoin. Les parties supérieures des fosses ont été fermées avec des planches de polycarbonate et un revêtement imperméable bitumineux pour empêcher l'infiltration des eaux de pluie et reproduire les caractéristiques optiques du reste de la rue. Un système de drainage avec des bacs disposés en fond de fosse et accessibles via des petites trappes découpées dans les plaques couvrant les pots a également été mis en place pour extraire et mesurer l'excédent d'eau. Un géotextile a été placé au fond des pots pour éviter que les racines ne colonisent le tuyau d'évacuation.

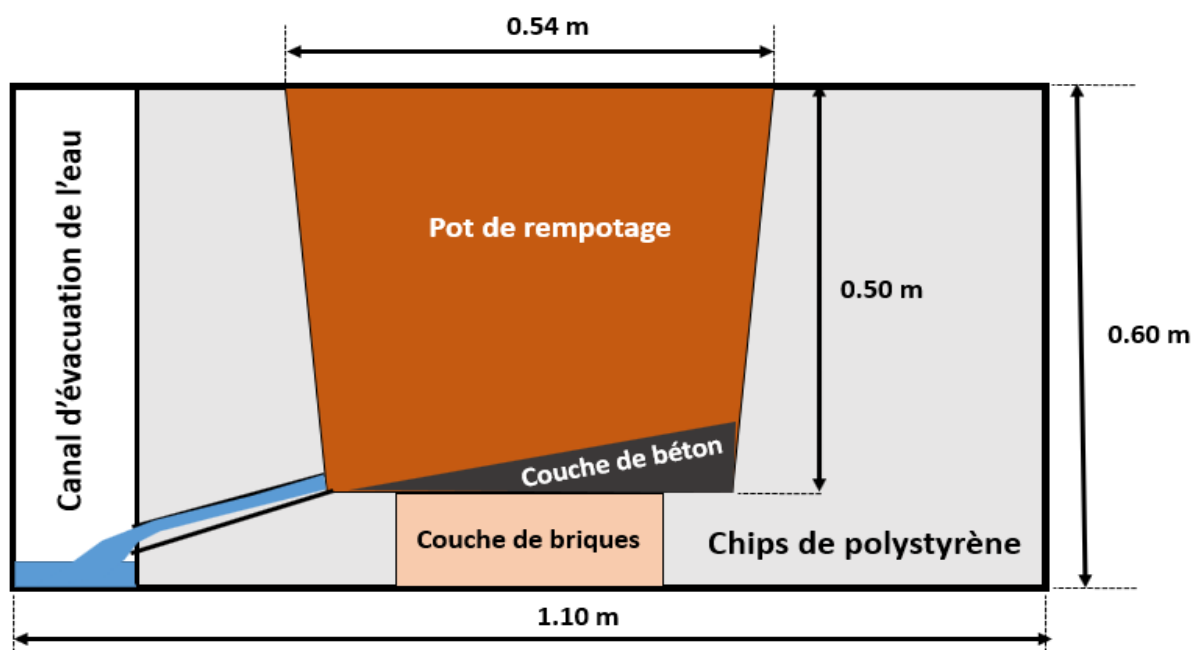


FIGURE 20 – Pot de rempotage installé dans une fosse de plantation.

Les arbres ont été régulièrement taillés pour maîtriser leurs ramifications et respecter les dimensions du modèle réduit. Une taille a été réalisée le 18 décembre 2018 afin de permettre un développement d'un houppier ramifié à partir d'une hauteur 0.9 m, en éli-

minant les feuilles et les tiges se trouvant en dessous de cette hauteur, et en taillant l'axe principal à 1.3 m au-dessus du sol de la rue. L'objectif de cette première taille était de stimuler la ramification et le développement du houppier entre 90 cm et 2 m du sol. Une taille d'ajustement d'une faible importance a également été réalisée le 06 août 2019 afin de raccourcir les branches qui commençaient à s'élever au-dessus de la rue ou à être trop proches des murs des bâtiments. Les branches ont été taillées de sorte que la hauteur de l'arbre ne dépasse pas 1.8 m et qu'un espace de 0.30 m soit ménagé avec les murs.

Des opérations de rempotage et de transplantation ont également eu lieu en décembre 2019 (FIGURE 18). L'arbre I qui se trouvait dans la modalité B a été remplacé par l'arbre de bordure B qui se trouvait dans la modalité A. L'arbre I avait un développement anormalement faible alors qu'il occupait une position importante dans la rue. L'arbre D qui était mort à l'automne 2019 et qui se trouvait dans la modalité végétalisée extérieure a été remplacé par l'arbre de bordure C qui se trouvait aussi dans la modalité végétalisée extérieure. L'arbre B qui se trouvait dans la modalité A et qui a remplacé l'arbre I dans la modalité B a été remplacé par l'arbre S qui était placé dans l'aire à conteneurs. L'arbre C qui était un arbre de bordure dans la modalité végétalisée extérieure a été remplacé par l'arbre R qui se trouvait aussi dans l'aire à conteneurs. L'arbre de bordure F dans la modalité végétalisée extérieure était mort et a été remplacé par l'arbre P qui se trouvait dans l'aire à conteneurs située sur le site de l'Institut Agro, mais en dehors du dispositif expérimental et constitue notre pépinière interne pour les jeunes arbres de réserve.

Une taille de formation a eu lieu pendant l'hiver 2019, juste après les opérations de rempotage et de transplantation. Cette taille a consisté à couper les branches apicales à 1.15 m au-dessus du sol de la rue canyon, à tailler les axes secondaires afin qu'ils ne puissent mesurer que 0.1 m, et à éliminer tous les axes secondaires se trouvant à une hauteur inférieure à 0.9 m du sol de la rue. Une autre taille de formation (plus légère) a également eu lieu le 06 février 2020. Pour permettre le transfert des résultats obtenus dans la rue canyon en échelle réelle, il est important de conserver les dimensions relatives entre les arbres et la rue dans une gamme compatible avec celle des rues en échelle réelle. Des tailles dont le principe est indiqué sur la FIGURE 21 ont été réalisées à cet effet les 13 et 24 juillet 2020.

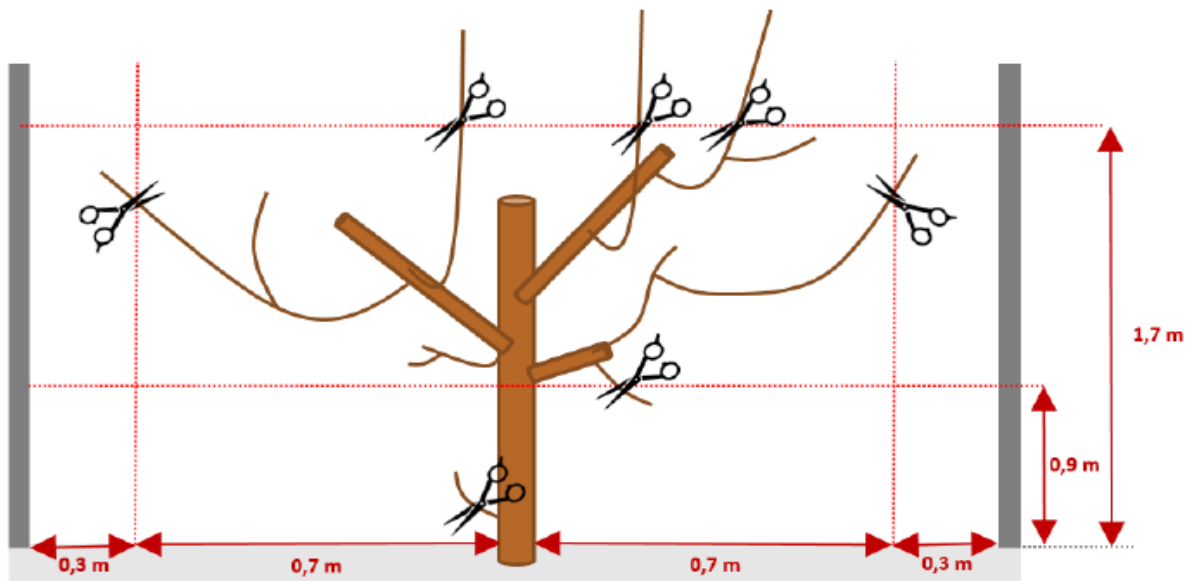


FIGURE 21 – Modalités des tailles du 13 et du 24 juillet 2020 (Boukouya, 2020).

4.2.3 Caractéristiques du substrat

Les conteneurs ont été remplis d'une couche de 0.25 m de mélange terre végétale/compost dans un rapport de volume de 60/40%, suivie au fond d'un mélange de 0.1 m d'épaisseur de terre végétale-compost/pierre dans un rapport de volume de 65/35%. Une couche de béton avec une légère pente a été installée au fond des conteneurs pour faciliter le drainage (cf FIGURE 20). Le volume utile total du mélange terre végétale-compost était finalement de 44.5 L. En ville, les arbres sont plantés dans des fosses d'un volume de 10 m³ (10000 L), avec 65% de mélange terre végétale-compost en rapport volumique (les 35% restants correspondant aux pierres). Cela donne un volume utile de terre végétale-compost de 6.5 m³ en grandeur nature. L'application d'un facteur de réduction géométrique de $(1/5)^3$ donne un volume utile à échelle réduite de 52 L, ce qui est proche du volume utile dans nos conteneurs (44.5 L).

4.2.4 Modalité d'irrigation

Pendant la campagne de mesures de 2019, l'irrigation dans chaque pot était assurée par 2 goutteurs installés de part et d'autre du tronc de l'arbre (dans l'axe Nord-Ouest/Sud-Est). Pendant la campagne de 2020, le mode d'irrigation a été modifié pour mieux répartir la quantité d'eau dans le pot. Dans chaque pot, 4 goutteurs (d'un débit unitaire de 1 litre/heure) ont été installés pour assurer l'irrigation au lieu de 2 goutteurs (d'un débit unitaire de 2 litres/heure) comme c'était le cas pour la campagne de 2019. Le débit total était donc de 4 litres/heure pour les campagnes de 2019 et 2020. En 2020, les goutteurs ont été installés sur les axes Nord-Ouest/Sud-Est et Nord-Est/Sud-Ouest. L'irrigation se faisait le soir, à 20 heures UTC. Des vérifications des quantités d'eau délivrées par les goutteurs ont régulièrement été faites via des mesures dans une éprouvette graduée. Les couvercles et plaques installés au-dessus des pots empêchaient les apports en eau par précipitation tout en limitant l'évaporation du sol.

4.3 Instrumentation de la rue canyon

Les expérimentations ont été réalisées durant les périodes estivales de 2019 (du 12 juin au 30 septembre) et de 2020 (du 08 juin au 18 septembre). Les centrales d'acquisition utilisées pour les deux campagnes de mesures ont une fréquence de mesure de 0.1 Hertz, mais seule la moyenne (sur les 10 minutes antérieures) était enregistrée. L'instrumentation de la rue était réalisée par un technicien de l'unité EPHor, Dominique LEMESLE. Le suivi des expérimentations était assuré par deux stagiaires : Sabri (2019) et Manteau (2020). Les données de la campagne de mesures de 2019 ne sont pas présentées dans ce manuscrit, mais leur analyse (se référer au rapport de stage de Sabri (2019)) a permis d'appréhender le fonctionnement climatique de la rue canyon (distribution spatiale de la température d'air dans la rue, ombrage provoqué par la haie d'arbres à l'Ouest de la rue. . .), et donc, d'adapter l'emplacement et la répartition des capteurs pour la campagne de mesures de 2020. La TABLE 8 présente les caractéristiques des capteurs qui ont été utilisés pour les expérimentations.

Dans tout ce qui suit, sauf mention contraire, c'est l'instrumentation de la campagne 2020 qui est présentée.

Variable mesurée	Type de capteur	Plage de mesure	Précision	Référence ou fabricant
Vitesse et direction du vent	Anémomètre sonique 3D	0 – 30 $m.s^{-1}$ 0 – 359°	$\pm 0.08 m.s^{-1}$ $\pm 0.7^\circ$ à 1 $m.s^{-1}$	CSAT3, Campbell Scientific Ltd
Vitesse et direction du vent	Anémomètre sonique 2D	0 – 60 $m.s^{-1}$ 0 – 359°	$\pm 2\%$ à 12 $m.s^{-1}$ $\pm 0.3^\circ$ à 12 $m.s^{-1}$	Wind Sonic, Gill instrument
Vitesse et direction du vent	Anémomètre sonique 2D	0.25 – 40 $m.s^{-1}$ 0 – 359°	$\pm 0.13 m.s^{-1}$ $\pm 1.5^\circ$	CV7, LCJ
Rayonnement	Bilanmètre	-	10%	CNR1, CNR4, NR-Lite
Température de surface	Sonde de platine	-	$\pm 0.1^\circ C$	PT100, TC, ONLINE
Température de surface	Fluxmètre	-30 – 70 °C	-	Captec
Flux de chaleur	Fluxmètre	Jusqu'à 150 kW	$\pm 3\%$	Captec
Température d'air	Sonde de platine	-40 – 60 °C	$\pm 0.2^\circ C$	PT1000 HMP110, Vaisala
Humidité relative	Sonde capacitive	0 – 100%	$\pm 1.5\%$ pour $HR \leq 90\%$ $\pm 2.5\%$ pour $HR > 90\%$	PT1000 HMP110, Vaisala
Température d'air	Sonde de platine	-70 – 180 °C	$\pm 0.2^\circ C$	PT100 HMP337, Vaisala
Humidité relative	Sonde capacitive	0 – 100%	$\pm (1.0 + 0.008 \times \text{valeur indiquée})\%$	PT100 HMP337, Vaisala
Teneur en eau	Sonde ECH2O	0 – 100%	$\pm 0.03 m^3.m^{-3}$	ECH2O EC-5, Decagon
Potentiel matriciel	Tensiomètre	0 à -800 hPa	-	SDEC

TABLE 8 – Caractéristiques des capteurs utilisés pendant les expérimentations.

4.3.1 Compartiment aérien

Dans le compartiment aérien, des mesures destinées à caractériser le microclimat ont été réalisées à l'intérieur de la rue. Des mesures ont été également réalisées à l'extérieur de la rue, sur le **mât Ouest** et sur le **mât Nord** (voir les positions des mâts FIGURE 22), pour caractériser les conditions ambiantes sur le site et pour produire des conditions aux limites réalistes pour le modèle numérique CFD.

4.3.1.1 Mesure du vent

Des simulations numériques préliminaires ont été réalisées pour étudier l'influence des conditions de vent incidentes sur l'écoulement de l'air à l'intérieur de la rue canyon. Les résultats obtenus ont montré que le profil de vitesse imposé en entrée du domaine de calcul avait un impact sur l'écoulement de l'air à l'intérieur de la rue et, en particulier, sur le sens de rotation du vortex. Cela était également constaté par [Guellal \(2018\)](#) dans les premières simulations numériques qu'il avait réalisées dans le cadre de son stage de fin d'études. Il est donc important de bien choisir le profil de vitesse à imposer en entrée du domaine de calcul pour le modèle numérique. Pour ce faire, 5 capteurs de vent (4 soniques et un à coupelle + girouette) ont été placés sur le mât extérieur au début de la campagne de mesures de 2019 pour disposer de 5 valeurs de la vitesse à différentes hauteurs. Les 5 capteurs de vitesse ont été répartis sur une hauteur de 10 m selon la distribution décrite sur la FIGURE 23. Les capteurs ont été placés de manière à ce que les mesures soient raffinées près du sol où les gradients de vitesse étaient susceptibles d'être amplifiés. Le mât de l'IRSTV (d'une hauteur de 10 m) et le mât d'Agrocampus Ouest (d'une hauteur de 5 m) ont été utilisés à cet effet. Le mât de l'IRSTV a été placé à 8 m en amont du bâtiment Ouest (les vents dominants sur le site étant d'Ouest). Les mesures réalisées grâce à ces 5 capteurs de vent ont été utilisées pour ajuster les coefficients du profil théorique du vent incident (loi en puissance). Ce profil de vitesse a ensuite été utilisé pour servir de donnée d'entrée au modèle numérique.

Pendant la campagne de mesures 2020, trois capteurs de vent ont été installés respectivement à 2 m, à 5 m et à 10 m du sol pour mesurer la vitesse et la direction du vent incident sur le mât Ouest. Les simulations numériques préliminaires ont également mis

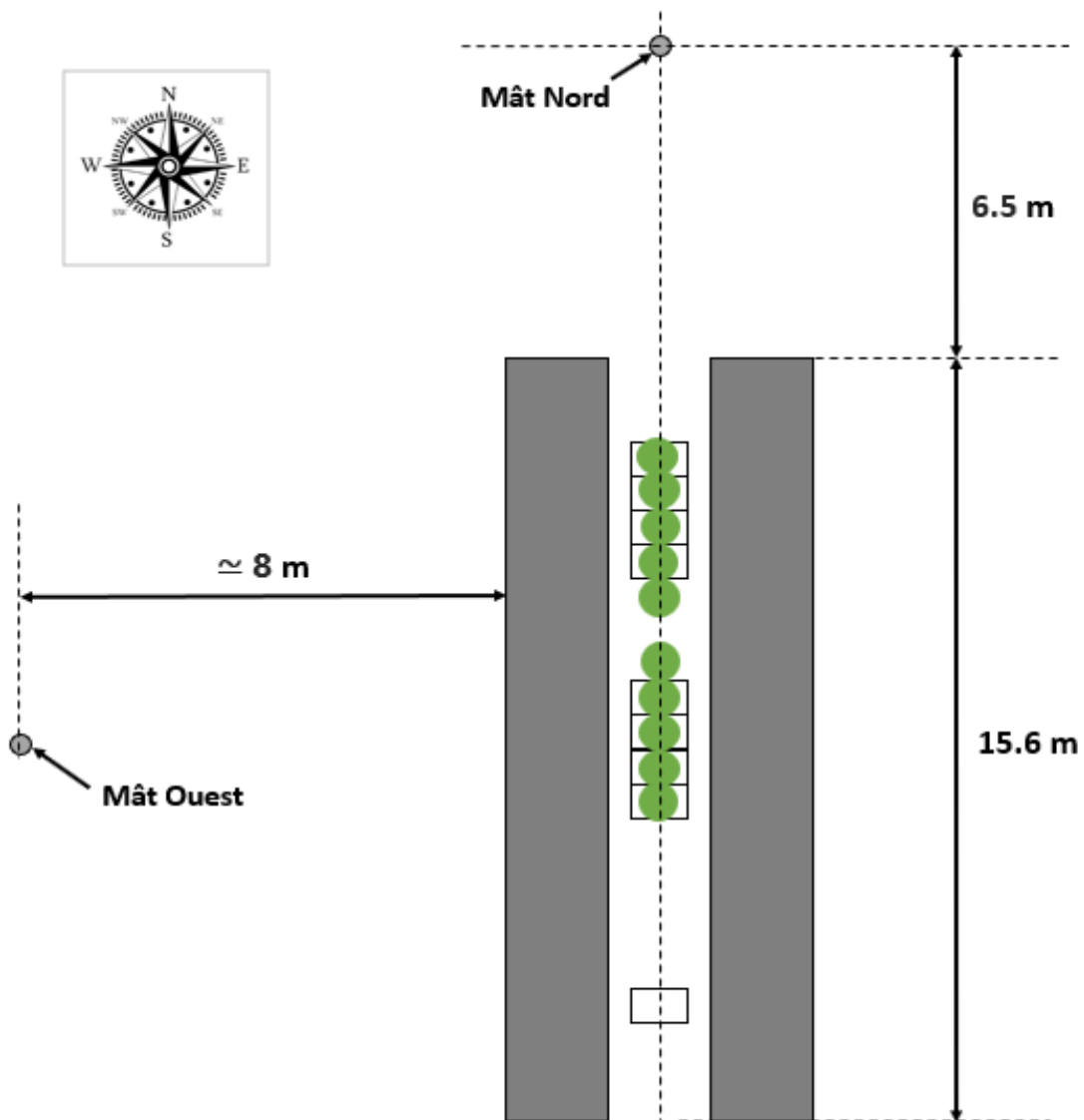


FIGURE 22 – Positions des mâts pendant la campagne de 2020.

en évidence la complexité de l'écoulement de l'air à l'intérieur de la rue et, notamment, auprès du sol et auprès du mur le chaud. Pour tenir compte de cette complexité pendant la campagne de mesures de 2020, nous avons placé l'anémomètre sonique 3D à l'intérieur de la rue, à mi-chemin entre les plans de mesure **B** et **C** et à 40 cm du sol (FIGURE 23). Par rapport aux autres capteurs de vent, l'anémomètre sonique 3D présente l'avantage de

permettre l'accès aux trois composantes spatiales de la vitesse du vent. Un autre capteur de vent sonique (2D CV7) a été placé à 2 m du sol entre les plans **B** et **C** également.

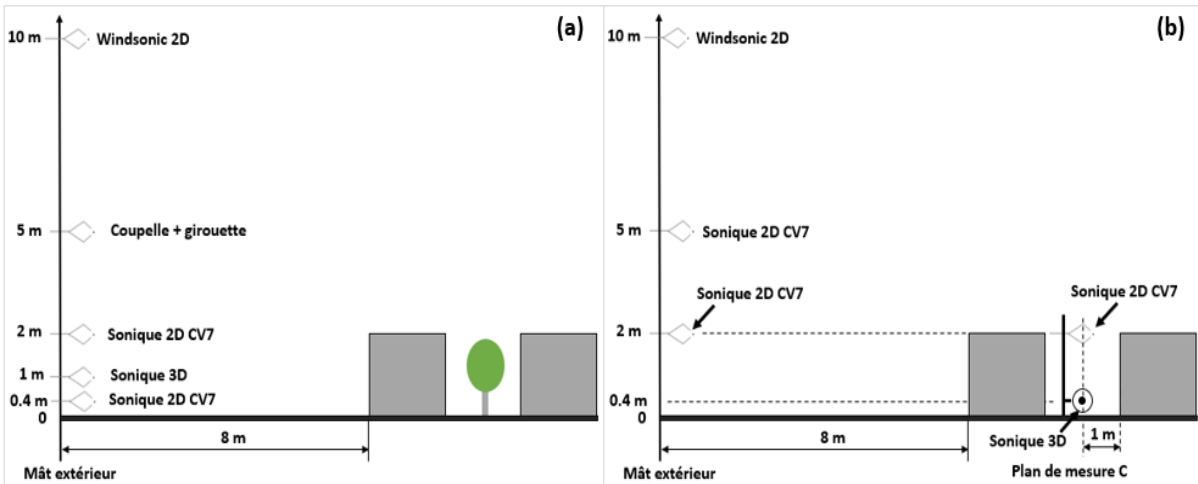


FIGURE 23 – Position des capteurs de vent à l'extérieur et à l'intérieur de la rue pendant les campagnes de mesures de 2019 et 2020. (a) : position des capteurs de vent pendant la phase préliminaire (de février à mai 2019), (b) : pendant la campagne de 2020.

4.3.1.2 Mesure de températures d'air et d'humidité relative

Le laboratoire dispose de sondes qui mesurent à la fois la température et l'humidité relative de l'air. Pendant la campagne de mesures 2019, une série de 5 capteurs placés sur un axe horizontal et transversal à la rue situé à une hauteur de 40 cm du sol a été utilisée pour mesurer la température et l'humidité relative à hauteur d'homme (en échelle réelle) dans le plan central de chaque modalité. La distribution des capteurs était raffinée près des parois (à 0.15 m) car c'est là qu'on attendait les plus forts gradients de température. Une série de 5 capteurs, disposée sur un axe transversal à la rue, a également été utilisée pour mesurer la température de l'air à la limite supérieure de la rue canyon (à 2 m). Un capteur a été aussi placé au centre du plan central de chaque modalité. Les capteurs utilisés étaient tous équipés d'une protection mécaniquement ventilée (tube de PVC de 0.2 m de long peint en blanc, équipé d'un ventilateur) contre le rayonnement. L'analyse des données expérimentales de la campagne de mesures 2019 a révélé que la

température de l'air ne varie quasiment pas sur l'axe horizontal à 2 m du sol, qu'il y a une variation de la température de l'air sur l'axe horizontal à 40 cm du sol, et qu'il existe un gradient vertical de la température de l'air à l'intérieur de la rue (résultats non montrés). Toutes ces observations, ainsi que la nécessité d'équiper un plan supplémentaire (le plan de mesures A) sans augmenter le nombre de capteurs utilisés en 2020, nous ont obligé à revoir la répartition spatiale des capteurs de température et d'humidité relative de l'air à l'intérieur de la rue pendant la deuxième campagne de mesures en 2020.

La répartition des sondes TRH à l'intérieur de la rue dans les plans de mesures **B** et **C** pour la campagne de 2019 est indiquée sur la FIGURE 24(a). La répartition des capteurs dans les plans de mesures **A**, **B** et **C** pendant la campagne de 2020 est montrée sur la FIGURE 24(b). Sur l'axe horizontal à 40 cm du sol, l'emplacement initial (pendant la campagne de mesures 2019) des capteurs a été légèrement modifié. En 2020, sur le côté Ouest, nous n'avons conservé qu'un seul capteur, celui placé à 15 cm du mur Ouest. Sur le côté Est, nous n'avons conservé aussi que le capteur situé à 15 cm du mur Est. Un troisième capteur a été placé sur ce même axe au centre de la rue à 1 m des deux murs. Sur l'axe vertical passant au milieu de la rue (à 1 m des deux murs), nous avons placé 4 capteurs pour mesurer les gradients verticaux de température d'air à l'intérieur de la rue. En plus du capteur qui est installé à 40 cm du sol pour l'évaluation d'indices de confort thermique à hauteur d'Homme (40 cm correspondant à 2 m en échelle réelle), trois autres capteurs TRH ont été installés sur ce même axe vertical : un capteur à 1 m du sol, un autre capteur à 1.5 m (hauteur à laquelle Météo France fournit des données de température à la station de Beaucouzé située à 420 m du site) et un dernier capteur à 2 m du sol pour mesurer la température de l'air à l'entrée ou à la sortie de la rue (sur l'interface rue/extérieur). Les températures d'air mesurées à 40 cm (sur l'axe vertical) ont été utilisées pour la validation des simulations numériques. La température de l'air et la fraction massique de la vapeur d'eau à l'extérieur de la rue (déduite des mesures de la température de l'air et de l'humidité relative) sont aussi des données d'entrée pour le modèle numérique lorsque l'on étudie respectivement les phénomènes thermiques et les phénomènes de transport de la vapeur d'eau. C'est aussi pour cette raison qu'il était important de mesurer ces deux variables à l'extérieur de la rue. Des sondes TRH ont donc été placées sur le **mât Ouest** pour mesurer à la fois les profils de température

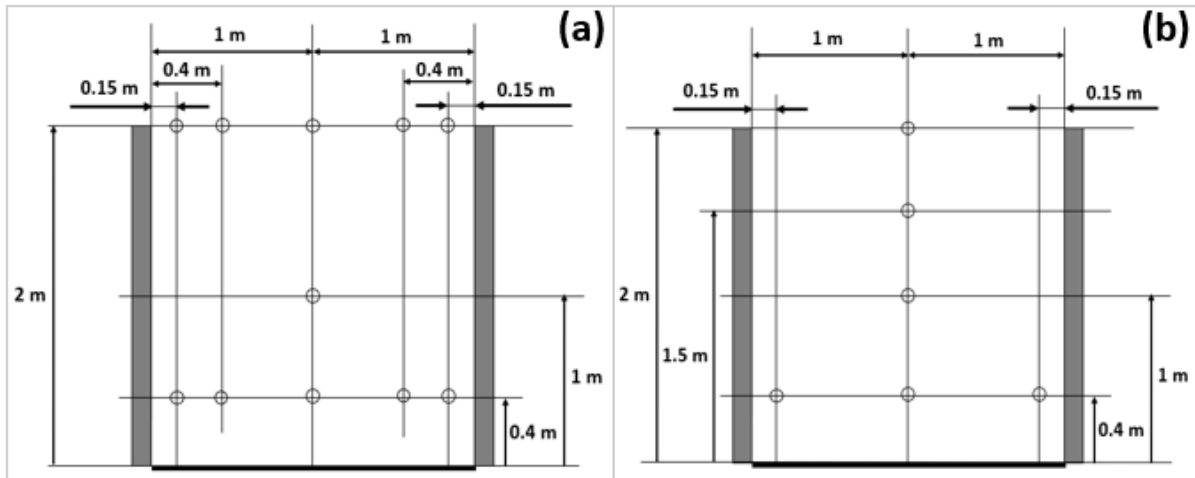


FIGURE 24 – Position des capteurs de température et d'humidité relative de l'air à l'intérieur de la rue dans le plan de mesures C pendant la campagne de mesures de 2019 (a) et pendant la campagne de mesures de 2020 (b).

et d'humidité relative de l'air. Pendant le début de la campagne de mesures 2019, la répartition des sondes TRH sur le **mât Ouest** était la même que celle des capteurs de vent indiquée sur la FIGURE 23. La première campagne de mesures avait également révélé que l'ombrage provoqué par la haie d'arbres située à l'Ouest de la rue avait un impact sur les valeurs de température et de rayonnement mesurées par les capteurs installés sur le mât extérieur placé à l'Ouest de la rue (à côté de la haie d'arbres) pendant l'après-midi (à partir de 14 heures UTC). Pour remédier à cela, un deuxième mât, que l'on appellera **mât Nord**, a été installé au Nord de la rue en 2020, à une distance de 6.5 m de l'extrémité Nord de la rue. Ce deuxième mât a l'avantage de passer dans la zone d'ombrage provoquée par la haie sensiblement au même moment que la rue. Au niveau de la rue, ces effets d'ombrage n'intervenaient qu'à partir de 17H UTC (pendant la période estivale de 2019). Les mesures de températures et d'humidités relatives de l'air à l'extérieur de la rue ont donc été réalisées par des capteurs installés sur ce deuxième mât à trois endroits : une mesure à 2 m du sol, une autre à 1.5 m du sol et une dernière mesure à 40 cm du sol. La mesure à 2 m correspond également au standard de mesure pour l'estimation de l'évapotranspiration de référence. Dans la modalité végétalisée à

l'extérieur de la rue, deux capteurs TRH ont été mis en place : un capteur à 40 cm du sol et un autre à 2 m du sol au niveau de l'arbre central.

4.3.1.3 Mesure de flux de chaleur et de températures de parois

Les mesures de flux de chaleur conductifs à travers les parois (murs et sol) ont été réalisées grâce à des fluxmètres. L'emplacement des capteurs dans les différentes modalités de la rue canyon est indiqué sur la FIGURE 25. Les mesures de flux de chaleur conductifs ont principalement été utilisées pour comprendre et quantifier les phénomènes thermiques afin de réaliser un bilan énergétique dans chaque modalité de la rue canyon. Les fluxmètres utilisés pour mesurer les flux de chaleur conductifs permettent également d'accéder aux températures de parois associées aux flux de chaleur conductifs. Des mesures de températures ont également été prises sur les toits des bâtiments. Les températures sur les toits des bâtiments étaient supposées quasi-uniformes en raison du matériau utilisé (bardage métallique fin et conducteur). Une seule mesure a donc été réalisée sur chaque toit. Pendant la campagne de mesures de 2020, des mesures de températures de parois ont également été acquises à l'intérieur du bâtiment Est (une en face de chaque plan de mesure, avant que celui placé en face de la modalité **C** ne soit déplacé (à partir du 17 juillet 2020) pour mesurer la température du sol dans la modalité **A**). Hormis celles qui ont été réalisées par les fluxmètres, les mesures de températures de parois ont toutes été réalisées avec des sondes PT100 plate. Une protection de ces sondes vis-à-vis du rayonnement a été posée en utilisant un matériau réfléchissant. Les mesures de températures réalisées sur les parois (murs, sol, toits) ont servi à la compréhension et la quantification des phénomènes thermiques qui se produisent dans la rue ainsi qu'à la validation des simulations numériques.

4.3.1.4 Mesure du rayonnement

Pour réaliser un bilan énergétique, il est nécessaire de mesurer le rayonnement. Parmi les données d'entrée du modèle numérique, il y a également le rayonnement courtes longueurs d'onde incident (longueurs d'onde comprises entre 0 et 3 μm) et le rayonnement grandes longueurs d'onde (longueurs d'onde comprises entre 3 et 100 μm). Des mesures de rayonnements ont donc été réalisées durant les deux campagnes de mesures. L'ana-

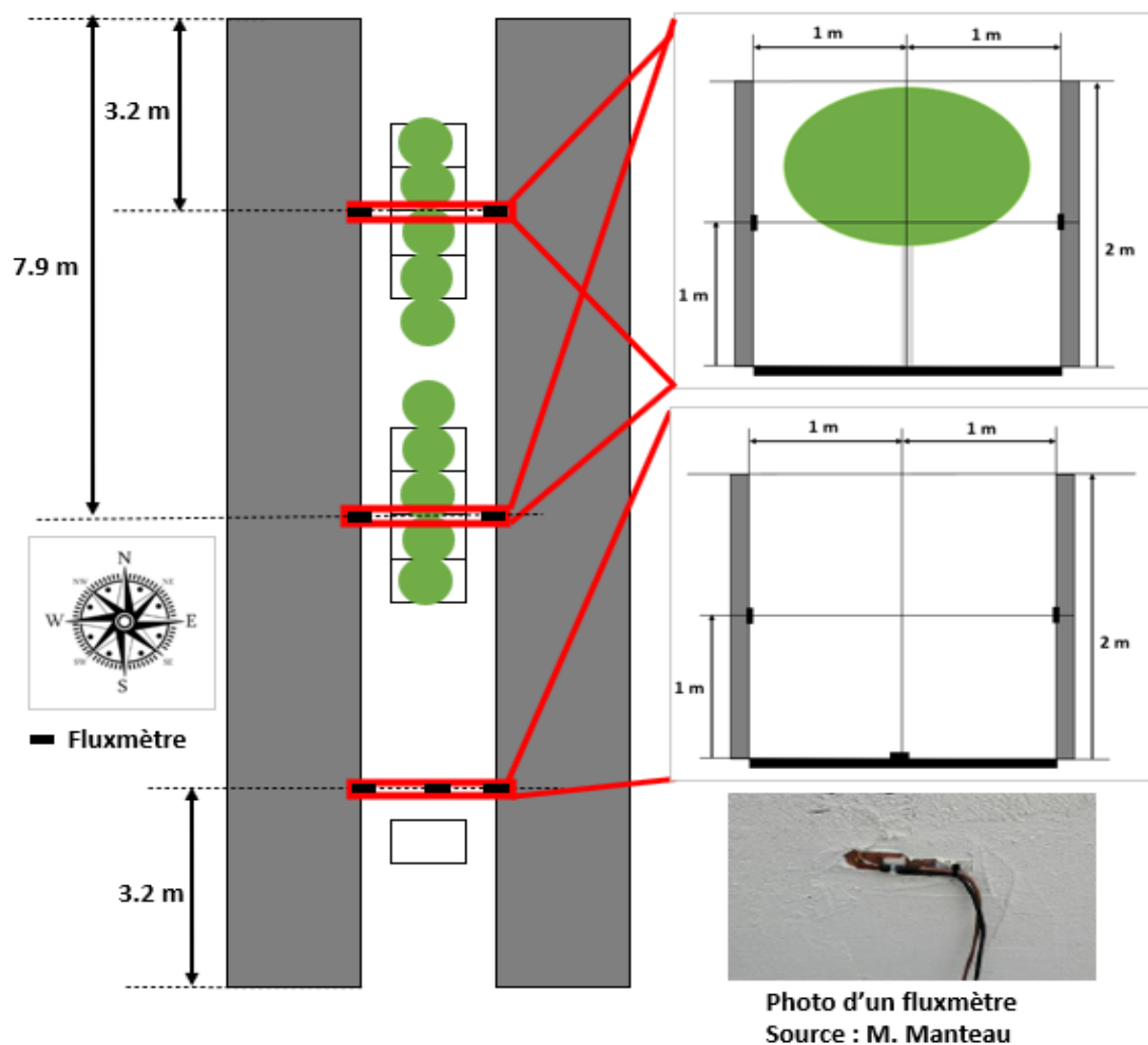


FIGURE 25 – Emplacement des fluxmètres dans les différentes modalités de la rue pendant la campagne de mesures de 2020.

lyse des données de rayonnements issues de la campagne de mesures de 2019 a permis d'adapter l'emplacement et la répartition des capteurs de rayonnement dans les différentes modalités de la rue et à l'extérieur de la rue pendant la campagne de mesures de 2020.

Pendant la campagne de 2020, des mesures de rayonnement ont été effectuées à l'intérieur de la rue grâce à trois bilanmètres : le bilanmètre **CNR1** et deux bilanmètres **CNR4**. L'emplacement des capteurs de rayonnement dans la rue pendant la campagne de 2020 est indiqué sur la FIGURE 26. Lorsqu'il est placé horizontalement, un bilanmètre est un appareil qui mesure le rayonnement vertical incident courtes longueurs d'onde (ou rayonnement global), le rayonnement vertical réfléchi courtes longueurs d'onde, le rayonnement vertical incident grandes longueurs d'onde (ou rayonnement atmosphérique), le rayonnement vertical grandes longueurs d'onde émis vers l'atmosphère et qui calcule le rayonnement net.

En l'absence d'obstacle, la valeur du rayonnement solaire incident ne dépendant pas de la hauteur par rapport au sol, les capteurs de rayonnement ont été placés à 2.1 m (juste au-dessus des arbres) pour faciliter leur accessibilité. Le bilanmètre **CNR1** était resté sur le plan C (dans la modalité non-végétalisée) à une distance de 2.10 m du sol comme pour la campagne de mesure 2019. En 2020, le bilanmètre **CNR4** d'Agrocampus Ouest est resté aussi sur le plan B (dans la modalité végétalisée au milieu de la rue) à la même hauteur que le bilanmètre **CNR1** placé dans le plan C. Le bilanmètre **CNR4** de l'IRSTV a été installé sur le plan A (dans la modalité végétalisée au Nord de la rue) à 2.1 m du sol également. En dessous des bilanmètres installés sur les plans de mesures **A**, **B**, **C** et **D**, un pyranomètre orienté vers le haut a été placé à 0.4 m du sol pour mesurer le rayonnement courtes longueurs d'onde incident. Les données fournies par le pyranomètre placé en dessous du bilanmètre **CNR1** avaient permis de déterminer l'atténuation du rayonnement global incident par les murs qui font obstacle à la course du soleil lorsque celui-ci est incliné ; celles fournies par les pyranomètres installés en dessous des bilanmètres **CNR4** permettent de déterminer l'atténuation du rayonnement global incident par les murs et par le couvert végétal. Les deux atténuations permettent ainsi de déduire l'atténuation du rayonnement global par le couvert végétal. Le pyranomètre installé dans le plan de mesures **D** devait permettre de quantifier l'atténuation du rayonnement global par les arbres extérieurs, mais les données n'ont pas été exploitées. L'analyse des données expérimentales issues de la campagne de mesures de 2019 a également montré que les effets d'ombre de la haie d'arbres situés à l'Ouest de la rue sur le rayonnement global

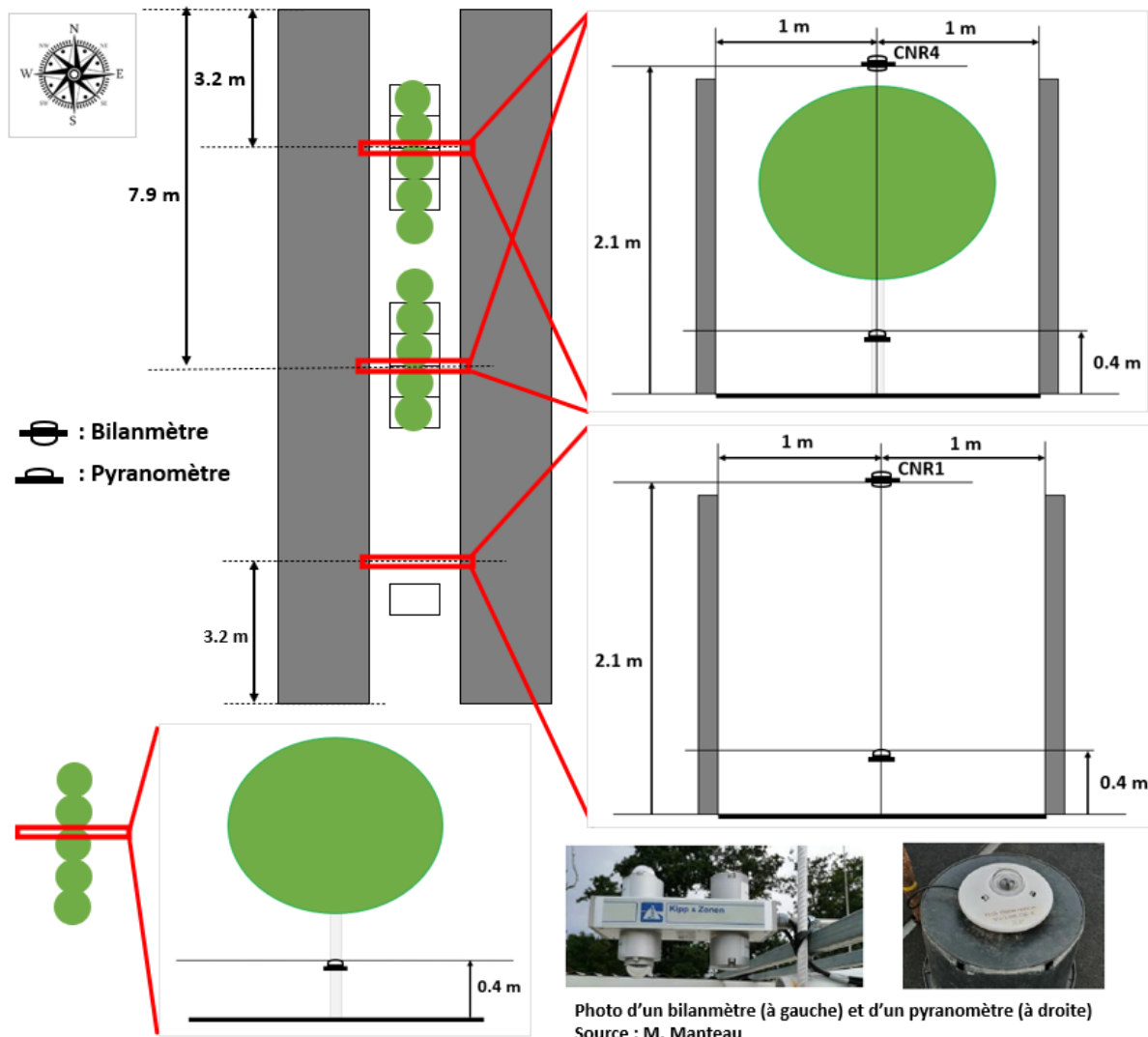


FIGURE 26 – Emplacement des capteurs de rayonnement pendant la campagne de 2020.

incident se produisent plus tôt sur le mât Ouest qu'à l'intérieur de la rue. Pour avoir les mêmes effets d'ombrage de la haie d'arbres sur le rayonnement, le capteur de rayonnement **NR-Lite** qui était installé sur le mât Ouest en 2019 a été déplacé sur le mât situé au Nord de la rue pour la campagne de 2020. Il a été installé à 2.1 m du sol comme pour les bilanmètres **CNR1** et **CNR4** installés à l'intérieur de la rue. Un pyranomètre orienté

vers le bas a été placé à 2 m du sol sur le mât Nord pour mesurer le rayonnement courtes longueurs d'onde réfléchi par le sol extérieur.

4.3.1.5 Mesure de la température de globe

La température moyenne radiante est un des facteurs dont dépend le confort thermique humain. Il s'agit d'une température qui permet de globaliser les échanges thermiques par rayonnement avec l'environnement. Elle est très utilisée dans l'étude du confort thermique et, principalement, dans l'ingénierie du bâtiment. Cette température se mesure grâce à un globe en cuivre, peint en noir (ou gris), creux à l'intérieur, au centre duquel est monté un capteur de température. Des globes noirs de 15 cm de diamètre ont donc été installés à 40 cm du sol dans chacune des trois modalités de la rue, dans la modalité végétalisée extérieure et à côté du mât Nord.

4.3.1.6 Mesure de la pluviométrie

Pour réaliser un bilan hydrique dans la rue, il est nécessaire de mesurer la pluviométrie. Des mesures de pluviométrie à l'extérieur et à l'intérieur de la rue étaient prévues pour la campagne de 2019, mais n'ont pas été réalisées. Pendant la campagne de mesures 2020, un pluviomètre a été installé près du mât Nord pour mesurer la pluviométrie sur le site de la rue canyon, un deuxième pluviomètre a été installé à l'intérieur de la rue (au centre) entre les modalités A et B.

4.3.2 Compartiment racinaire

Des mesures ont été réalisées dans le compartiment racinaire en 2019 et en 2020. Pour s'assurer que les arbres étaient bien en confort hydrique (potentiel hydrique du sol au-dessus de -800 hPa), il fallait mesurer le potentiel hydrique du sol. La teneur en eau et le drainage ont également été mesurées pour réaliser afin de pouvoir réaliser des bilans hydriques.

4.3.2.1 Détermination de la courbe de rétention en eau

La courbe de rétention en eau d'un sol traduit la capacité de ce sol à retenir l'eau. Elle correspond à la relation entre le potentiel matriciel d'une part et l'humidité du sol d'autre part. L'énergie de liaison entre l'eau et le sol se traduit donc par le potentiel matriciel. L'humidité du sol peut être exprimée sur une base volumique ou sur une base massique. Lors du dessèchement d'un sol, l'eau restante est liée de plus en plus fortement au sol et l'extraire requiert une énergie de plus en plus importante, ce qui peut par exemple conduire au stress hydrique. La courbe de rétention en eau du mélange terre-compost est présentée sur la FIGURE 27. La procédure qui a été mise en oeuvre pour son obtention est donnée dans l'Annexe D.

La courbe de rétention se caractérise par deux points que sont la capacité au champ (teneur en eau qui correspond à la capacité maximale de rétention d'eau d'un sol) et le point de flétrissement permanent (teneur en eau qui correspond à un potentiel hydrique bas tel que la force de rétention du sol excède la force de succion des racines de la plante). Un travail permettant de déterminer ces deux points a été réalisé par Manteau (2020) dans le cadre de son stage. Il obtenu le point (-33 kPa, 0.29) pour la capacité au champ et le point (-1600 kPa, 0.15) pour le point de flétrissement permanent. La réserve utile (RU) correspond à la variation de la teneur en eau entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent.

4.3.2.2 Mesure du potentiel hydrique et de teneur en eau dans le sol

La valeur de teneur volumique a été utilisée pour évaluer le stock d'eau dans le sol pour réaliser un bilan hydrique. 8 pots ont été instrumentés au total (les trois pots centraux dans les deux modalités végétalisées à l'intérieur de la rue et les deux pots les plus au Nord de la rangée d'arbres extérieure).

Pour mesurer le potentiel matriciel et la teneur en eau pour les arbres de notre dispositif expérimental, nous avons respectivement utilisé des tensiomètres rigides et des sondes capacitives (sondes ECH2O). L'emplacement de ces capteurs dans les pots est indiqué sur la FIGURE 28. Les mesures du potentiel matriciel ont été réalisées sur deux plans

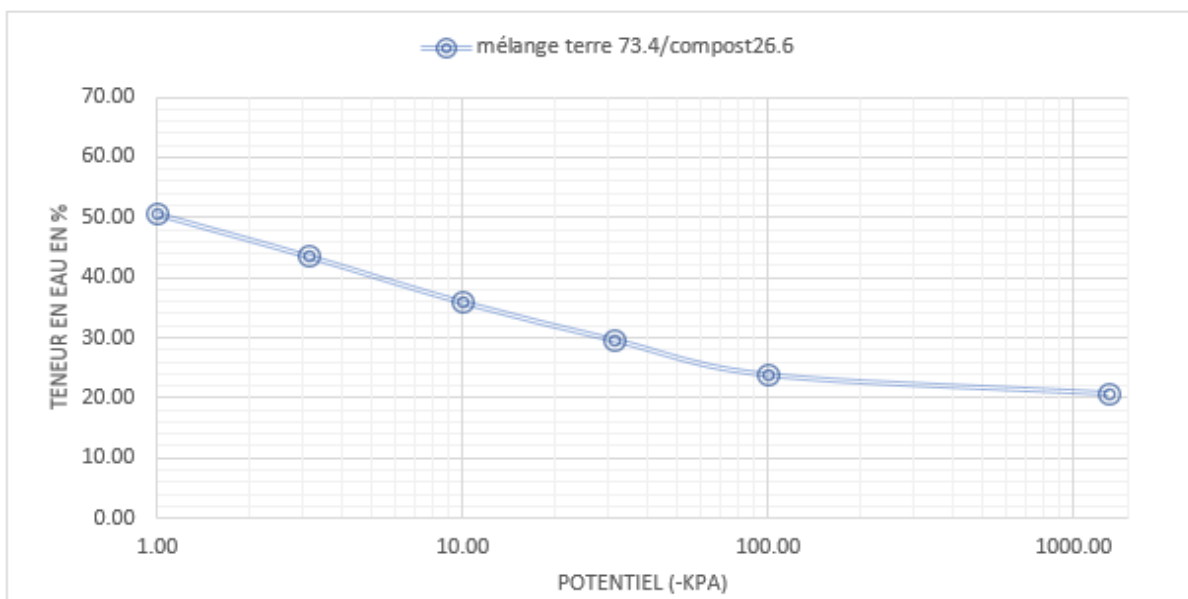


FIGURE 27 – Courbe de rétention en eau du sol déterminée en laboratoire par Yvette Barraud-Roussel.

horizontaux situés respectivement à 15 cm et à 30 cm de profondeur. Dans chaque plan de mesure, nous avons utilisé deux capteurs pour faire les mesures. Les capteurs étaient placés de façon à ce qu'ils soient symétriques par rapport à l'arbre. Les capteurs de teneur en eau volumique ont été placés à une profondeur de 22 cm.

Dans chaque fosse de plantation, un dispositif a été aménagé pour récupérer les eaux de drainage afin de réaliser un bilan hydrique dans le sol. Le relevé se faisait de manière quotidienne (vers 9H afin de s'assurer que les eaux drainage de l'irrigation survenue la veille au soir aient bien terminé de s'écouler) grâce à une pompe. Les sondes ECH2O ont été étalonnées avant d'être installées dans les pots. L'étalonnage consiste à établir une relation entre une grandeur à mesurer et une grandeur de sortie qui est le plus souvent une tension électrique exprimée en millivolts. Cette relation peut évoluer au cours du temps. La relation entre l'humidité d'un sol et la tension affichée par la centrale d'acquisition des données peut varier en fonction de la composition du sol. C'est pour cette raison qu'il est important d'étalonner les sondes ECH2O avant de procéder aux mesures

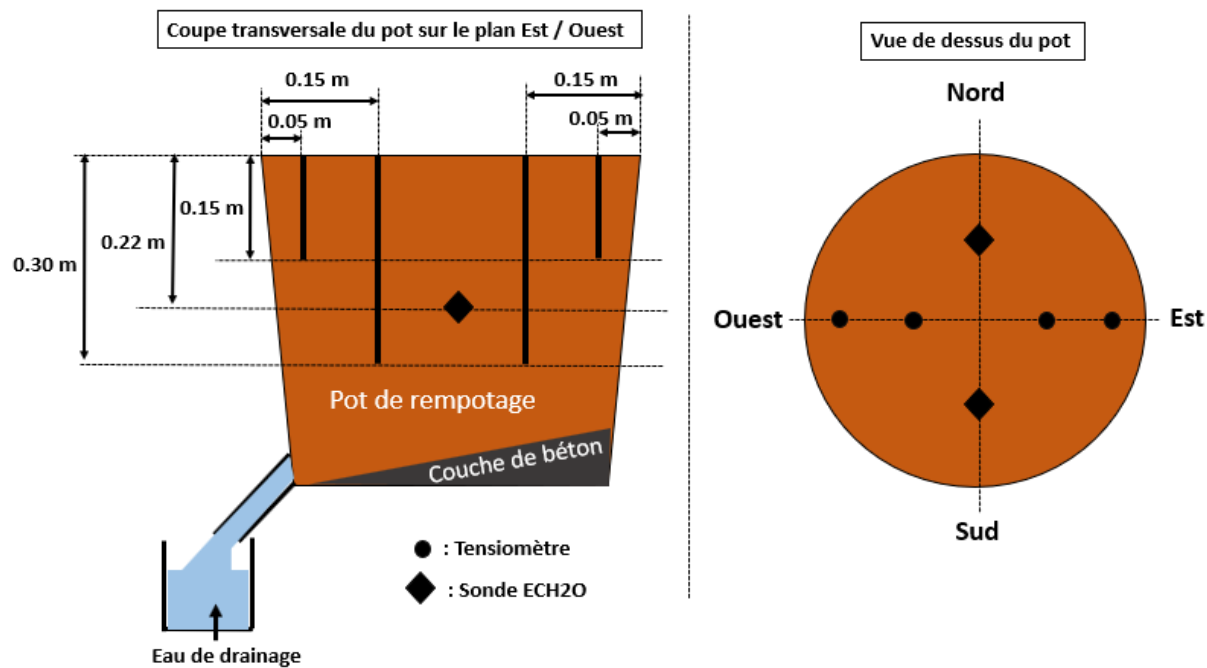


FIGURE 28 – Position des tensiomètres et des sondes ECH2O dans les pots pendant les campagnes de 2019 et 2020.

pour chaque type de substrat. Le principe de l'étalonnage des sondes ECH2O consiste à étudier l'évolution de la tension délivrée par les sondes ECH2O en fonction de l'humidité volumique du sol. À cet effet, on ajoute progressivement une quantité d'eau connue au substrat et on relève la tension correspondante affichée sur la centrale d'acquisition après avoir plongé la sonde dans le substrat. L'idée est d'avoir un nombre de points relativement important (une dizaine) et ainsi tracer l'évolution de la tension en fonction de l'humidité volumique. La plage d'humidité va d'un sol séché à l'air jusqu'à sa capacité de rétention en eau. L'interpolation des points obtenus par une fonction de référence (linéaire ou parabolique) permettra de connaître la relation entre la grandeur à mesurer (l'humidité volumique) et la tension affichée sur la centrale d'acquisition. Les différentes étapes de l'étalonnage sont détaillées dans l'**Annexe B**.

Les tensiomètres ont été fournis avec un étalonnage qui a été réalisé par les constructeurs.

La relation entre le potentiel matriciel mesuré par les tensiomètres et la tension affichée par la centrale d'acquisition est donc connue lorsque les appareils sont neufs. Cette relation peut cependant varier au cours du temps : on dit que les tensiomètres dérivent. Il était donc important de procéder à l'étalonnage des tensiomètres avant de les placer dans les pots afin de trouver une nouvelle relation entre le potentiel matriciel qui a été mesuré et la tension de sortie délivrée par les capteurs et qui a été affichée sur la centrale d'acquisition des données. La démarche qui a été suivie à cet effet est présentée dans l'**Annexe C**.

4.3.3 Compartiment végétal

4.3.3.1 Mesure de températures de feuille

Des mesures de températures sur quelques feuilles ont également été effectuées. Ces mesures ont été utilisées pour valider le sous-modèle de culture. Les mesures de températures de feuilles ont été prises sur les arbres centraux de chaque modalité végétalisée (dans les modalités A, B et D). Sur chacun des arbres centraux des modalités végétalisées, une mesure de température de feuille a été prise sur une feuille située à 1 m du sol de la rue sur le côté Est, et à 1.5 m du sol de la rue sur le côté Est, à 1 m du sol de la rue sur le côté Ouest, à 1.5 m du sol de la rue sur le côté Ouest, 1.5 m du sol de la rue au centre de l'arbre (FIGURE 29). Les mesures sont réalisées avec des thermocouples collés sur les parties inférieures des feuilles afin qu'ils ne soient pas exposés au rayonnement direct. Le poids des thermocouples empêchait en effet la feuille de se retourner et ainsi d'exposer le thermocouple au rayonnement direct. Une attention particulière a été apportée aux thermocouples pour vérifier qu'ils adhéraient bien aux feuilles durant la campagne car ils avaient tendance à se décoller très facilement des feuilles.

4.3.3.2 Mesure des résistances stomatiques

Des mesures de résistances stomatiques ont été effectuées ponctuellement sur des journées contrastées (fort/faible ensoleillement ; forte/faible température extérieure) à l'aide d'un poromètre. Les mesures ont été faites du lever au coucher du soleil (de 9H à 19H, heure locale) avec un pas de temps d'une heure sur l'arbre L (pour la modalité A), sur l'arbre B (pour la modalité B) et sur l'arbre K (pour la modalité D). Sur chacun de ces arbres,

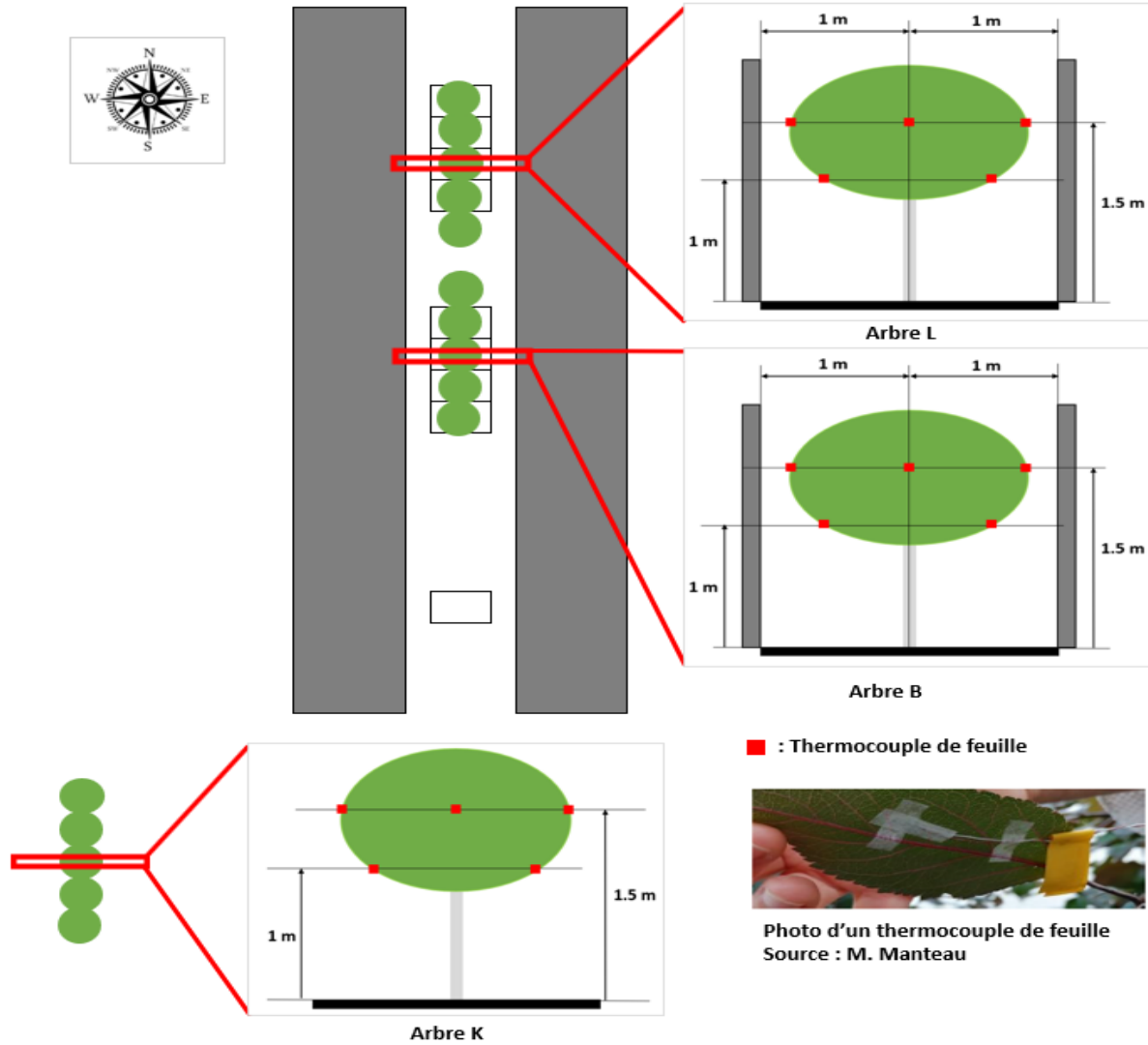


FIGURE 29 – Position des thermocouples de feuille pendant la campagne de 2020.

une mesure de résistance stomatique a été prise sur une feuille située à proximité d'une feuille où une mesure de température de feuille a été également prise. Pour chaque arbre, les mesures ont été prises sur 5 feuilles exposées au soleil. Les feuilles qui ont été choisies étaient toutes jeunes mais bien matures pour que les stomates puissent bien jouer leur rôle. En 2020, l'appareil de mesure était dysfonctionnel, mais des mesures ont été réalisées

en juin 2021, après réparation de l'appareil. Un jeu de données a été utilisé pour caler les paramètres du modèle de résistance stomatique.

4.3.3.3 Mesure de rayonnement PAR

Le rayonnement photosynthétiquement actif (Photosynthetically Active Radiation, PAR) est un rayonnement dont les longueurs d'onde sont comprises entre 400 et 700 nm, utilisé par le feuillage vert des plantes pour réaliser la photosynthèse. Il représente environ 45% du rayonnement courtes longueurs d'onde. Des mesures de rayonnement PAR ont été effectuées pendant les deux campagnes de mesures sur les arbres centraux de chaque modalité arborée avec des capteurs PAR linéaires de 30 cm de longueur, disposés horizontalement dans le sens longitudinal de la rue (FIGURE 30). Dans la rue, les capteurs PAR ont été installés sur les arbres B et L respectivement à 65 cm, à 110 cm, à 150 cm et à 2 m par rapport au sol de la rue. Dans la modalité végétalisée extérieure, les capteurs PAR ont été placés sur l'arbre K aux mêmes hauteurs par rapport aux arbres que dans la rue, mais en absence de sol de la rue les hauteurs sont mesurées par rapport aux couvercles des fosses et sont de 60 cm, à 105 cm, à 145 cm et à 195 cm à partir des couvercles.

4.3.3.4 Mesure de la surface foliaire

Le pommier d'ornement *Malus coccinella*® 'Courtarrow' développe des axes de 2 types morphologiques différents vis à vis de la répartition de la surface foliaire. D'une part des auxiblastes, dont les entre-noeuds s'allongent, et qui se développent en axes longs, d'autre part des brachyblastes qui sont des rameaux courts dont les entre-noeuds ne s'allongent pas et qui portent donc des feuilles formant des sortes de rosettes. La surface foliaire a été mesurée par allométrie. Pour chaque arbre, la longueur de l'ensemble des auxiblastes a été mesurée et multipliée par un coefficient linéique de surface foliaire (surface foliaire par cm linéaire d'axe) qui avait été estimé pour ces axes. D'autre part, le nombre de brachyblastes par arbre a été compté et multiplié par la surface foliaire moyenne des brachyblastes. La somme des deux termes a permis de calculer la surface foliaire de l'arbre. La réduction de surface foliaire par la taille a été prise en compte en estimant de la même façon la surface foliaire des extrémités taillées. Les différentes étapes qui ont

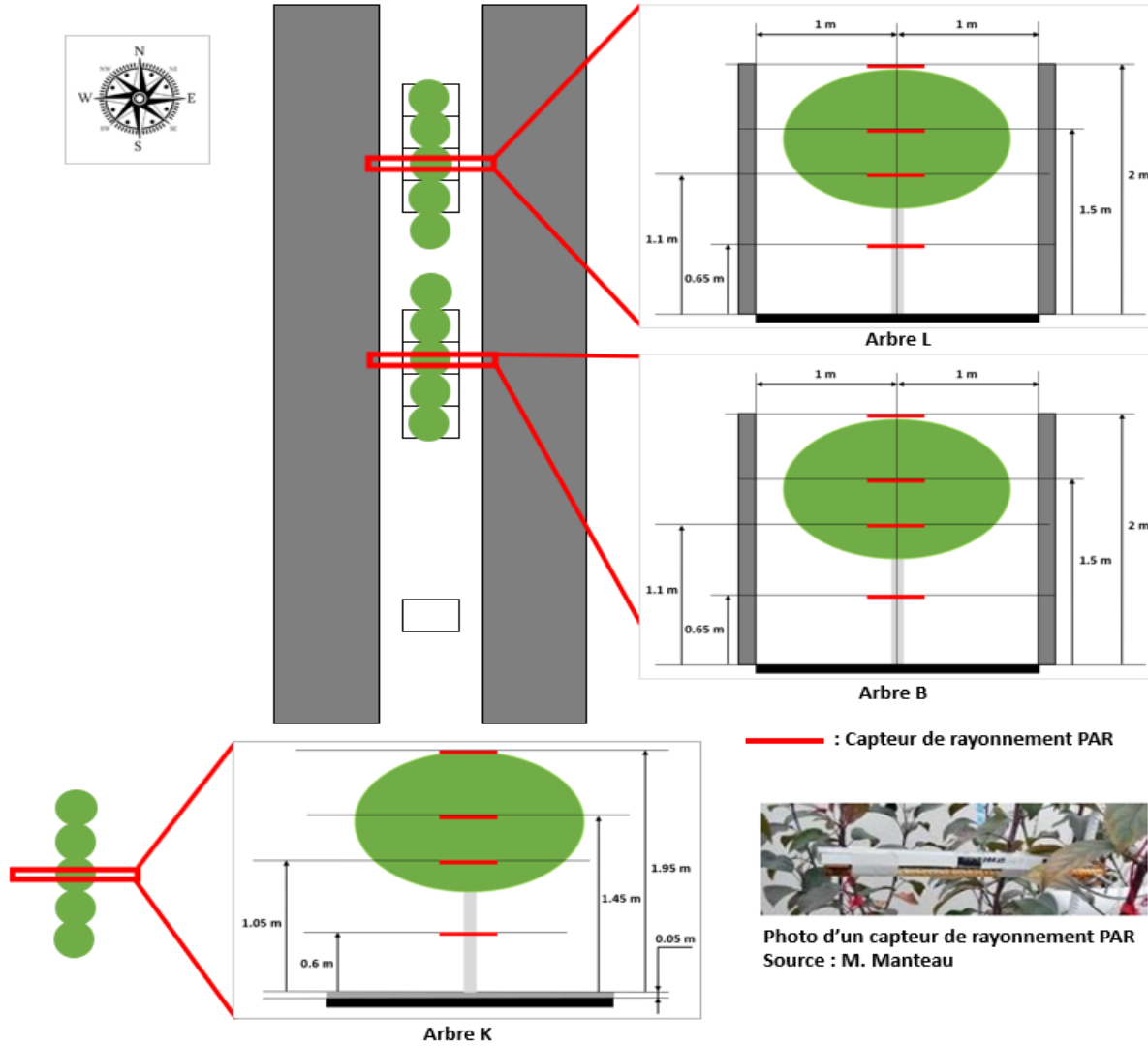


FIGURE 30 – Position des PAR linéaires pendant la campagne de 2020.

été mises en œuvre à cet effet sont données dans l'Annexe G. Les surfaces foliaires des arbres étudiés (déterminées le 24 juillet 2020) sont présentées dans la TABLE 9.

	Modalité A	Modalité B
Surface foliaire de l'arbre G (m ²)	3.11	-
Surface foliaire de l'arbre L (m ²)	2.53	-
Surface foliaire de l'arbre E (m ²)	2.14	-
Surface foliaire de l'arbre J (m ²)	-	2.48
Surface foliaire de l'arbre B (m ²)	-	1.42
Surface foliaire de l'arbre H (m ²)	-	2.16
Cumul des surfaces foliaires (m ²)	7.78	6.06

TABLE 9 – Surfaces foliaires des arbres utiles mesurées après la taille du 23 juillet 2020.

4.3.3.5 Mesure du volume de peuplement

Dans le modèle numérique, l'arbre est représenté comme un rectangle. Aussi, nous avons estimé le volume du peuplement comme un parallélépipède rectangle dont les dimensions sont présentées sur la FIGURE 31. Pour déterminer les valeurs de ces dimensions, nous nous sommes basés sur les mesures d'architecture des arbres qui ont été réalisées le 17 juillet 2020 et sur les dimensions qui ont résulté de la taille du 23 juillet 2020 avec l'appui des stagiaires [Boukouya \(2020\)](#) et [Manteau \(2020\)](#). Les étapes mises en oeuvre pour déterminer la valeur de la dimension **A** sont détaillées dans l'**Annexe H**. La taille du 23 juillet 2020 a été réalisée de sorte que la hauteur des arbres ne dépasse pas 170 cm (distance mesurée à partir du sol). La dimension **B** correspond donc au complémentaire de la dimension **A** pour arriver à 170 cm ($\mathbf{B} = 170 - \mathbf{A}$). Sur les côtés latéraux, les axes des arbres ont été taillés de manière à avoir une distance minimale de 30 cm entre le houppier et les murs. Cependant très peu de branches latérales arrivaient à 30 cm du mur, la majorité étant plus courtes. Pour ne pas surestimer le volume dédié au houppier dans le modèle, nous avons donc considéré que les dimensions **C** et **E** seraient de 40 cm toutes les deux. La dimension **D** correspond donc au complémentaire de la somme des dimensions **C** et **E** pour arriver à 200 cm qui est la largeur de la rue ($\mathbf{D} = 200 - (\mathbf{C} + \mathbf{E})$). Pour déterminer la dimension **F**, on a considéré pour chaque extrémité la moyenne

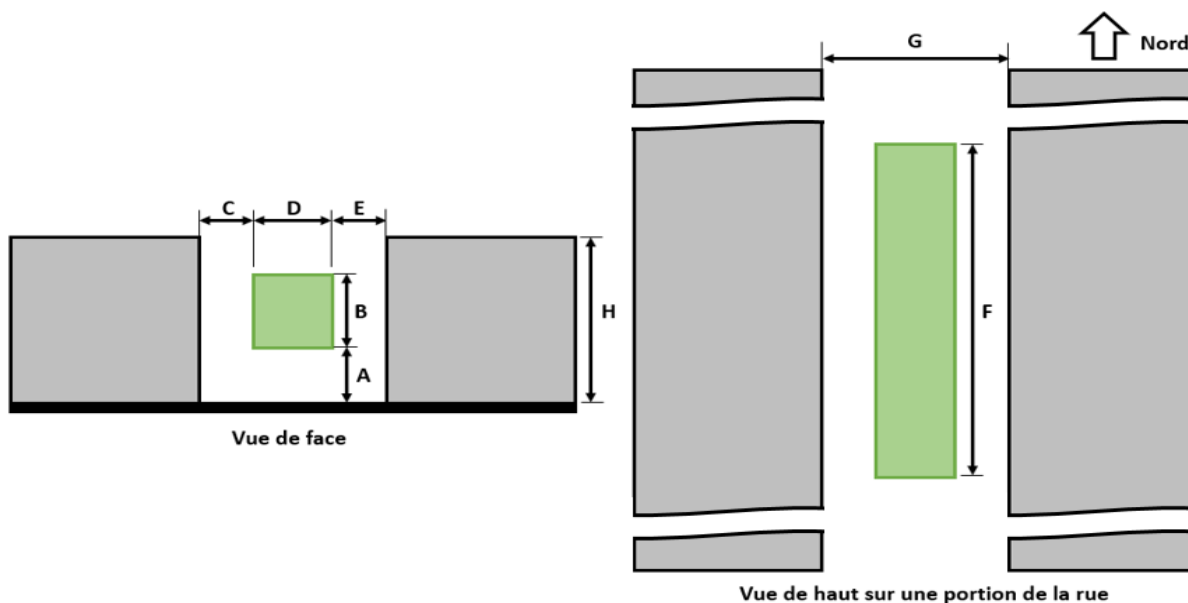


FIGURE 31 – Dimensions qui interviennent dans la détermination du LAD. La dimension F correspond à la longueur occupée par les 5 arbres (dont les 3 arbres étudiés).

des positions des 2 branches les plus au Nord ou les plus au Sud et la distance séparant deux arbres voisins. La TABLE 10 présente les valeurs des dimensions qui interviennent dans le calcul du volume de peuplement.

	Modalité A	Modalité B
Dimension A (m)	0.60	0.68
Dimension B (m)	1.10	1.02
Dimension C (m)	0.40	0.40
Dimension E (m)	0.40	0.40
Dimension D (m)	1.20	1.20
Dimension F (m)	4.34	4.40

TABLE 10 – Détermination des dimensions du volume de peuplement. La dimension A a été déterminée à partir des données présentées dans la TABLE 37.

4.3.3.6 Mesure du LAI et du LAD

Les valeurs des surfaces foliaires présentées dans la TABLE 9 ont été utilisées pour calculer le LAI (indice de surface foliaire, défini comme le rapport entre les surfaces foliaires cumulées par rapport à la surface projetée du houppier au sol) et le LAD (densité foliaire, définie comme le rapport entre les surfaces foliaires cumulées par rapport au volume du houppier). Les valeurs du LAI présentées dans la TABLE 11 sont conformes avec le LAI pour un arbre fruitier qui doit être compris entre 1.5 et 4 (m^2 de feuilles / m^2 de sol). [Poblete-Echeverría et al. \(2015\)](#) ont en effet aussi trouvé des valeurs du LAI comprises entre 1 et 3.75 (m^2 de feuilles / m^2 de sol) pour des pommiers.

	Modalité A	Modalité B
Cumul des surfaces foliaires (m^2)	7.78	6.06
LAI ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)	2.49	1.91
LAD ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$)	2.26	1.88

TABLE 11 – Détermination du LAI et du LAD. Les valeurs du cumul des surfaces foliaires sont celles présentées dans la TABLE 9.

4.4 Identification des journées types retenues pour l'étude et modalité de calcul de la transpiration des arbres

Des calculs préliminaires ont été faits pour une meilleure exploitation des résultats. Cette partie est présentée en détails dans le **Chapitre 5**. Nous invitons donc le lecteur à se référer à section 5.1.2.3 pour plus de détails.

4.4.1 Choix des journées étudiées

Un critère a été établi pour déterminer les types de journées étudiées (journées ensoleillées, journées moyennes ou journées nuageuses). Ce critère correspond au ratio entre l'intégrale sur une journée (24 heures) du rayonnement global incident juste au-dessus de la rue et le cumul du rayonnement incident au-dessus de l'atmosphère pour cette même journée (un ratio élevé correspondant à une nébulosité faible). Il a été constaté que les journées avec

des évolutions temporelles du rayonnement solaire incident en forme de cloche (donc très peu de passages nuageux) avec une valeur maximale du rayonnement global incident sur la rue à 12H UTC assez importante (plus de 800 W.m^{-2}) ont un ratio supérieur ou égal à 0.65. Ces journées ont donc été considérées comme des journées ensoleillées. Les journées pour lesquelles ce ratio est inférieur ou égal à 0.25 sont caractérisées par des valeurs de rayonnement global incident assez faibles sur la rue (inférieures à 165 W.m^{-2}) et sont donc considérées comme des journées nuageuses. Les autres journées sont considérées comme des journées moyennes. Cette méthode est également décrite dans le **Chapitre 5**, dans la section 5.1.2.3.

4.4.2 Méthode de détermination de la transpiration

Dans la rue canyon, une partie du rayonnement solaire incident est utilisée par les arbres pour convertir une partie de la quantité d'eau puisée dans le sol grâce à leurs racines en vapeur d'eau : c'est la transpiration. La transpiration végétale est le processus par lequel la plante perd une quantité d'eau à travers les stomates de ses feuilles, elle est régulée sous l'effet de nombreux paramètres physiques, biologiques et météorologiques. Elle est un des moyens par lesquels les végétaux contribuent au rafraîchissement de l'air en milieu urbain.

La transpiration des arbres a été évaluée à partir du bilan hydrique réalisé sur le sol. Celui-ci s'écrit :

$$P + I - \Delta S - ETR - D \pm R = 0 \quad (82)$$

P est la pluviométrie totale, I est l'irrigation appliquée au sol, ΔS est la variation du stock d'eau dans le sol, ETR est l'évapotranspiration réelle, D est le drainage et R est le ruissellement. Tous les termes du bilan hydrique doivent être exprimés dans la même unité.

Dans nos expérimentations, les conteneurs ont été protégés de la pluie. De plus, les journées choisies qui ont été sélectionnées pour évaluer la transpiration n'étaient pas pluvieuses, la pluie et le ruissellement étaient donc quasi nuls. L'évaporation du sol était négligeable, l'évapotranspiration réelle était donc égale à la transpiration des arbres. La période de calcul de la transpiration des arbres a été ajustée en fonction de la durée

d'ensoleillement et de la demande climatique de la journée afin de correspondre au début et à la fin de la période de transpiration. L'irrigation ayant lieu à 20 :00 UTC, nous pouvons considérer que le drainage est terminé avant le lever du soleil (et donc le début du calcul de la transpiration). Comme indiqué sur la FIGURE 32, l'équation du bilan hydrique pendant la période de calcul de la transpiration se réduit donc à :

$$ETR = -\Delta S = -\Delta\Theta V_{sol} \quad (83)$$

$\Delta\Theta$ est la variation de la teneur en eau volumique du sol, et V_{sol} est le volume de sol dans chaque conteneur.

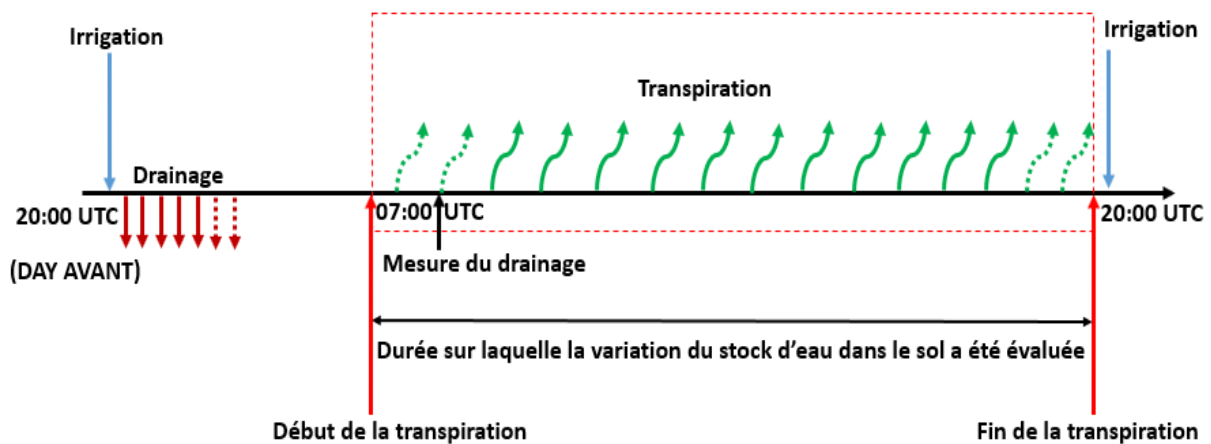


FIGURE 32 – Représentation des différentes étapes pour l'établissement du bilan hydrique et pour le calcul de la transpiration.

La méthode de calcul de la transpiration des arbres est également présentée dans le **Chapitre 5**, dans la section 5.1.2.3.

4.5 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons essayé de fournir une description détaillée des mesures effectuées dans les différents compartiments du système Sol-Plante-Atmosphère. Une des

originalités du dispositif expérimental décrit dans ce chapitre réside dans le fait qu'il permet de mesurer l'ensemble des variables liées aux transferts d'eau et d'énergie dans le continuum sol-plante atmosphère. À noter cependant que compte tenu du fait qu'il n'a pas été possible d'installer un capteur de flux de chaleur conductif au niveau du sol et un capteur de vent dans les modalités végétalisées, les bilans énergétiques n'y ont pas pu être effectués. De plus, un nombre plus élevé de fluxmètres installés à différentes hauteurs sur les parois verticales pour voir l'effet de l'ensoleillement progressif des parois le matin et l'après-midi aurait permis d'étudier la variation spatiale du flux conductif. Enfin, une thermographie par infra-rouge aurait permis de mesurer la distribution spatiale des températures de parois sur les murs.

Comme indiqué plus haut, le dispositif expérimental présenté dans ce chapitre a permis d'acquérir un nombre important de données, mais ne seront principalement présentées dans le prochain chapitre que les données qui nous semblent être les plus pertinentes pour évaluer le confort thermique à hauteur d'Homme.

Chapitre 5

Résultats expérimentaux

Le protocole expérimental décrit dans le **Chapitre 4** a été mis en oeuvre en 2019, puis réajusté en 2020. Dans ce chapitre, nous nous proposons de présenter une exploitation des mesures effectuées durant la campagne 2020 pour des arbres en confort hydrique. Ce chapitre est composé de deux grandes parties :

- Dans la première partie, nous avons présenté des résultats pour deux journées individuelles contrastées, sur base d'un article publié dans la revue **Urban Climate**.
- Dans la deuxième partie, nous nous sommes intéressés à des résultats sur un ensemble de journées ensoleillées afin d'évaluer la robustesse des résultats obtenus sur la journée individuelle ensoleillée.

Les données de sol ne sont pas présentées dans ce chapitre, mais l'analyse des courbes de teneur en volumique et de potentiel hydrique du sol données dans l'**Annexe E** confirment que les arbres étaient en situation de confort hydrique.

Les résultats dans la modalité **B** n'ont pas été exploités. En effet, les modalités végétalisées **A** et **B** étaient irriguées de façon similaire, et les travaux réalisés dans le cadre du stage de **Manteau (2020)** montrent que les résultats des deux modalités sont proches (voir l'**Annexe F**).

5.1 Impact of well-watered trees on the microclimate inside a canyon street scale 1 in outdoor environment for two contrasting individual days

Urban Climate 37 (2021) 100844



Contents lists available at ScienceDirect

Urban Climate

journal homepage: www.elsevier.com/locate/uclim



Impact of well-watered trees on the microclimate inside a canyon street scale model in outdoor environment



S. Mballo ^a, S. Herpin ^{a,b,*}, M. Manteau ^{a,b}, S. Demotes-Mainard ^c, P.E. Bournet ^{a,b}

^a EPHor, Institut Agro, SFR 4207 QuaSaV, 49045 Angers, France

^b IRSTV, FR CNRS 2488, 44321 Nantes Cedex 3, France

^c Univ Angers, Institut Agro, INRAE, IRHS, SFR QUASAV, F-49000 Angers, France

Les objectifs de cet article sont doubles. Pour deux journées individuelles contrastées en terme d'ensoleillement, nous nous sommes intéressés à l'impact d'une rue canyon en échelle réduite installée en milieu extérieur sur le microclimat d'une part, et à l'impact des arbres sur le microclimat à l'intérieur de cette rue d'autre part. La principale originalité de cet article réside dans le fait qu'il fournit une vision intégrée des mécanismes impliqués dans l'instauration d'un microclimat grâce à la mesure de plusieurs variables comme le rayonnement, les températures des murs, les températures d'air, l'humidité relative, la transpiration des arbres. Le sol est également instrumenté afin de pouvoir évaluer son état hydrique, et donc, de s'assurer que les arbres sont en situation de confort hydrique. Cette information est rarement disponible dans la littérature sur les études urbaines, mais elle est cruciale car elle peut fortement affecter les bénéfices climatiques rendus par les arbres. Enfin, le confort thermique humain a été évalué à plusieurs endroits (dans les modalités végétalisées dans la rue et hors rue, ainsi que dans la modalité non-végétalisée dans la rue). L'article a été publié en avril 2021 dans la revue **Urban Climate** (l'impact factor de la revue est de 5.731).

Impact of well-watered trees on the microclimate inside a canyon street scale l in outdoor environment

Abstract : Cities experience overheating due to factors such as urban form and materials, concentration of human activities, reduction in the amount of vegetation and water surfaces. Vegetation is one of the ways to reduce temperature peaks in the city during heat waves. The objectives of this paper are twofold : first, to study the impact on the microclimate of a north south oriented canyon street at reduced-scale (1/5), then to study the impact of well-watered trees on the street microclimate. This study provides a highly integrated view of climatic mechanisms through the measurement of a set variables, including air temperature, relative humidity, wall temperature, conductive and radiation fluxes as well as tree transpiration and thus allows a better understanding of the physical phenomena at stake. It shows that the canyon street created an urban overheating of up to 2.8 °C during the night, and up to 2.4 °C during the day, and that trees reduced the air temperature in the street by up to 2.7 °C during the day. Finally, trees improved human thermal comfort with a reduction of 8 °C of the Universal Thermal Climate Index at midday.

5.1.1 Introduction

Urbanization is the process of migration of people from rural area to urban area for the improvement of their lives (Kuddus and Rahman, 2015). At the beginning of the twentieth century, 15% of the world population lived in cities (Susca et al., 2011). In 2018, 55% of the world's population resided in urban areas, and by 2050, 68% of the world's population is projected to be urban (United Nations, 2018). In Europe, the urbanization rate was already 74.5% in 2018 and a projection indicates that this rate will reach 83.7% in 2050 (United Nations, 2018). The trend towards urbanization leads to the expansion of cities and the replacement of vegetation, natural soil, and water surface by impervious surfaces such as asphalt. The effect of urbanization on the urban thermal environment has attracted increasing research attention for its significant relationship to local climatic change and habitat comfort (Xiong et al., 2012). Among the consequences

of urbanization on the urban microclimate is the Urban Heat Island (UHI) phenomenon, which is a heat accumulation process within an urban area due to urban buildings and human activities (Yang et al., 2016). According to Rizwan et al. (2008), UHI is one of the biggest environmental problems of the 21st century caused by the urbanization and industrialization of our society. Extensive studies of the characteristics of UHI effect were carried out in recent decades by authors such as Aboelata (2020); Arnfield (2003); Cantat (2004); Chen et al. (2006); Ridha (2017b); Rizwan et al. (2008); Santamouris et al. (2001); Weng et al. (2004); Yang et al. (2016). They showed that the UHI effects (in terms of intensity in particular) vary from one place to another as they are closely related to urban heat release, surface properties, vegetation coverage, population density. Measured air temperature in UHI can exceed 10 °C compared with the neighboring rural areas for the city of Athens (Santamouris et al., 2001) and 11.4 °C in Paris (Cantat, 2004).

Among the different existing urban topologies, canyon streets are a classical downtown configuration and therefore deserve a particular attention. A canyon street is a straight street continuously bordered by tall buildings. Since the pioneering work of Oke (1988), canyon streets are an emblematic configuration of urban microclimate research on which many data are available. They are generally defined by their aspect ratio which is the ratio between the height of the buildings and the width of the street (or the inverse depending on the authors) and the orientation of their main axis. Canyon streets are ideal places to observe different phenomena at stake in the UHI such as wind sheltering effect (when the wind blows perpendicularly to the street), and radiative trapping (resulting from absorption and reflection of solar radiation during daytime, and retention of long-wave radiation at night). They are also often considered as a geometry of reference in modeling tools. The TEB (Town Energy Budget) model for instance is able to simulate the climate of an entire city from the prediction of the climate inside a set of canyon streets (Lemonsu et al., 2004; Redon et al., 2017, 2020). Many outdoor experimental studies on canyon street focused on aerodynamics and turbulence phenomena (Andreou, 2014; Georgakakis and Santamouris, 2006; Louka et al., 2002; Najjar et al., 2005; Nakamura and Oke, 1988; Niachou et al., 2008; Rotach, 1995; Rotach et al., 2005) and will not be further commented here. In the following, we will focus our attention on studies dedicated to urban microclimate inside canyon streets, including thermal effects, without (TABLE 12)

or with (TABLE 13) vegetation.

We have listed in TABLE 12 the main studies carried out on non-vegetated urban full-scale or reduced-scale canyon streets. The aspect ratio in this table is calculated as the ratio of building height to street width. The scales for the reduced-scale canyon streets are determined from a reference height of 10 m. TABLE 12 shows that prior to the 2000s, experimental studies on canyon streets were essentially full-scale. Indeed, full-scale outdoor experimental studies make it possible to assess several physical phenomena at the same time with fewer hypotheses. In particular for full-scale studies, [Najjar et al. \(2005\)](#) studied a canyon street in Strasbourg Eastern France oriented north north east/south south west with an aspect ratio of 0.9. The experiment was focused on the radiation balance of the street, but also looked at sensible and latent heat flux. Many authors have also been interested in the impact of canyon street orientation on the microclimate ([Andreou, 2014](#); [Eliasson, 1996](#)). They have found that for the same aspect ratio, the interception of solar radiation by the solid walls, and thus the wall and air temperatures, depended on both the orientation of the street and the inclination of the sun. [Andreou \(2014\)](#) showed, for example, that the ground of north south oriented streets, in comparison to east west oriented streets, is more shaded during summertime, and less shaded during wintertime. As for the wall façades, north south oriented streets receive more solar radiation than east west oriented streets in summer. This was observed for aspect ratios within the range $[0.6; 3]$. The author also showed that the larger the aspect ratio, the more important the shading in the street, especially for North-South oriented streets.

However, more and more outdoor canyon street experimental studies now tend to be conducted at a reduced-scale despite the difficulties associated with the transposition of results to full-scale. To our knowledge, there are for the moment only 4 ls of purely mineral canyon streets that have been built outdoors at reduced-scale, with scale reduction factor ranging from $1/2$ to $1/8$. [Athamena et al. \(2018\)](#) studied a reduced-scale ($1/2$) canyon street in an outdoor environment in Nantes, looking at phenomena coupling aerodynamics and thermics. [Idczak et al. \(2007\)](#) conducted micrometeorological measurements at an experimental site (scale $1/2$) located in the industrial area of Guerville ($48^{\circ}56'N$, $1^{\circ}44'W$) in France. [Idczak et al. \(2007\)](#) observed that thermal effects were significant only

in areas close to walls, and that buoyancy forces were generally negligible in the canyon street. Wang et al. (2017) carried out field experiments in an east-west 1/8 scale canyon street built in Sun Yat-Sen University, Guangzhou, China (23°4'N, 113°23'E) to study the impact of thermal mass of walls on air and wall temperatures. Their measurements show that during the daytime, walls with the lowest thermal mass reach their peaks earlier than walls with the highest thermal mass and that the opposite results occur after sunset. Chen et al. (2020) used the same experimental facility with various aspect ratios of the streets. Their studies showed that thermal storage capacity and aspect ratio are two essential factors that determine the urban microclimate. On the aspect ratio, they found that the wider the street, i.e., the lower the ratio between the height of the buildings and the width of the street, the higher the wall and air temperatures during daytime. On the contrary, during the night, the street with lower aspect ratio cools down faster.

As far as urban vegetation is concerned, Bowler et al. (2010) and Jamei et al. (2016) conducted a state-of-the-art review on studies focusing on the effect of green spaces on temperature and thermal comfort. Bowler et al. (2010) found that authors were more interested in the effect of parks and trees than in the effect of green roofs. All studies with urban green spaces show that they have an impact on the environment, at least locally. In canyon streets, trees can have cooling or warming effects on the air depending on their position on the street, prevailing wind conditions and time of day. During the day, the effects of trees are more noticeable in shallow streets because, in deep streets, their effects are masked by buildings (Bowler et al., 2010; Jamei et al., 2016). During the night, the air temperature beneath trees in deep canyons is slightly higher than the surrounding air temperature due to the low sky view factor that blocks infrared cooling (Jamei et al., 2016). In TABLE 13, we have listed studies dedicated to vegetation inside canyon streets, both at full-scale and reduced-scale. As it can be seen, most studies were conducted in temperate climate, as already pointed out by Bowler et al. (2010). In spite of the diversity of tree species used, it can be seen that trees organized in two lateral rows is the most frequently considered configuration. TABLE 13 also shows that information about vegetation such as LAI (Leaf Area Index, defined as the ratio of the cumulated leaf surfaces to the projected area of the crown to the ground), LAD (Leaf Area Density, defined as the ratio of cumulated leaf surfaces to crown volume) and part of ground co-

vered vegetation vary from one study to another. Therefore, configurations are often not easy to compare to one another, and a very broad range of air temperature reduction by trees (from 0.4°C to 6°C) has been reported in the literature, depending on the authors. To date, most of the studies on the impact of vegetation on the microclimate in a canyon street have been carried out at full-scale. In Dresden, [Gillner et al. \(2015\)](#) showed that, thanks to the shading effects, vegetation can reduce surface temperatures by 5.5 to 15.2 °C and air temperature by 0.7 to 2.2 K depending on the tree species used. The authors also showed that trees can reduce asphalt temperatures by up to 4.6 °C per unit of LAD [Gebert et al. \(2019\)](#) are some of the few authors to have measured the water content by volume in soil. Their results showed that stomatal conductance (and thus tree transpiration) was closely related to soil water availability. On the impact of trees on human thermal comfort, [Coutts et al. \(2016\)](#) found that, during heat events, trees in East-West oriented Canyons with average aspect ratio comprised between 0.27 and 0.76 had a low impact on air temperature (0.9 °C at mid-morning) but a significant impact on diurnal index in summer, largely due to a reduction in the mean radiant temperature, reducing heat stress from a very high level (UTCI > 38°C) to a high level (38 °C > UTCI > 32 °C). We found only three studies in the literature ([Ouldboukhitine et al., 2011](#); [Park et al., 2012](#); [Djedjig et al., 2015a](#)) that were conducted in reduced-scale street. The first two studies focused only on green walls and roofs and [Park et al. \(2012\)](#) were the only ones to consider trees in their street. [Park et al. \(2012\)](#) conducted a study in Japan (39°04', 139°07'E) on a small-scale (1/10) urban l on the effect of urban vegetation on the outdoor thermal environment. They found that trees, in comparison with a non-vegetated modality, could reduce the globe temperature (which incorporates the effects of radiation, so this magnitude is different from the air temperature) by 0.6 to 2.2 °C depending on the street orientation and sensors position.

In this paper, we propose to study the impact of a canyon street on the microclimate, and then to study the impact of trees on the microclimate within the canyon street. To reach this goal, we first present the 1/5 scale canyon used for experiments, the instrumentation, and the method of calculation of several quantities of interest. Second, in addition to the variables classically studied in the literature such as air temperatures, wall temperatures, relative and absolute humidities, we analyze other variables such as tree transpiration,

radiation and its interception by buildings and trees both in areas without or with trees. An originality of the present study also relies on the fact that the soil was instrumented, which gave access to the soil water status, whereas this information is very rarely available in urban studies. We also investigate the thermal comfort inside the street in the vegetated and non-vegetated modalities and compare it to a control rural-like environment outside the street. A discussion including considerations on the representativeness of the reduced-scale street and on the limitations and perspectives of the present work is also provided.

References	Place	Köppen-Geiger climate type	Orientation	l	Scale	Aspect ratio (H/W)	Measured variables
Chen et al. (2020)	Guangzhou, China	Cwa, Cfa	E-W	Reduced	1/8	1.0, 2.0 3.0	WS, AT, ST, SHF, RAD
Athamena et al. (2018)	Nantes, France	Cfb	NE-SW	Reduced	1/2	1.4	WS, AT
Liang et al. (2018)	Guangzhou, China	Cwa, Cfa	NW-SE	Reduced	1/8	1.0, 2.0, 3.0	WS, AT
Wang et al. (2017)	Guangzhou, China	Cwa, Cfa	E-W	Reduced	1/8	1.0	WS, AT, ST, HF, RAD
Andreou (2014)	Island of Tinos, Greece	Csa	Many	Full	-	2.0, 0.7, 0.9	WS, AT, ST, RAD
Doya et al. (2012)	La Rochelle, France	Cfb	N-S	Reduced	1/8	1.1	AT, ST
Niachou et al. (2008)	Athens, Greece	Csa	ESE-WNW	Full	-	1.7	WS, AT, ST
Idczak et al. (2007)	Guerville, France	Cfb	NE-SW	Reduced	1/2	2.2	WS, AT, ST, HF, RAD
Georgakis and Santamouris (2006)	Athens, Greece	Csa	NW-SE	Full	-	3.3	WS, AT, ST
Najjar et al. (2005)	Strasbourg, France	Cfb	NNE-SSW	Full	-	0.9	SHF, LHF, RAD
Rotach et al. (2005)	Basel, Switzerland	Cfb	-	Full	-	-	WS, AT, SHF, LHF, RAD
Bourbia and Awbi (2004)	El-Oued, Algeria	BWh	E-W, N-S	Full	-	1.3, 4.0, 2.0	AT, ST
Louka et al. (2002)	Nantes, France	Cfb	N-S	Full	-	1.4	WS, AT, ST
Santamouris et al. (1999)	Athens, Greece	Csa	NW-SE	Full	-	2.5	WS, AT, ST
Eliasson (1996)	Göteborg, Sweden	Dfb	ENE-WSW, NNW-SSE	Full	-	1.4-2.1	AT, ST
Nakamura and Oke (1988)	Kyoto, Japan	Cfa	E-W	Full	-	1.0	WS, AT, ST
DePaul and Sheih (1986)	Chicago, USA	Dfa	N-S	Full	-	1.4	WS

TABLE 12 – Main studies carried out on canyon streets in outdoor environment. The scale of the street in a reduced environment is determined in relation to a reference height of 10 m. The orientation refers to the direction of the main axis of the street. Variable names are AT : Air Temperature, Emax : Evapotranspiration maximum, Gs : Stomatal conductance, HF : Heat Flux, LHF : Latent Heat Flux, LT : Leaf Temperature, RAD : Radiation, RH : Relative Humidity, SHF : Sensible Heat Flux, ST : Surface Temperature, UTCI : Universal Thermal Climate Index, WS : Wind Speed. Climate characteristics refer to the Köppen-Geiger classification : BWk : Semi-arid climate, BWh : Arid climate, Cfa : Humid subtropical climates, Cfb : Oceanic climate, Csa : Mediterranean hot summer climates, Cwa : Dry-winter humid, subtropical climate, Dfa : Hot summer continental climates, Dfb : Warm summer continental or hemiboreal climates.

References	Place	Köppen-Geiger	Orientation	Model	Scale	H/W	Type of vegetation	Other information about vegetation	Measured or calculated variables
Aboelata (2020)	Cairo, Egypt	BWh	NW-SE	Full	-	1.0	Trees (<i>Ficus microcarpa Microcapa</i> , <i>Delonix regia Regia</i>), Grass	2 side rows, Percentage of the ground covered by vegetation = 20%; 50%; 70%	WS, AT
Gebert et al. (2019)	Melbourne, Australia	Cfb	N-S	Full	-	0.25 – 0.55	Trees (<i>Olea europaea</i> , <i>Eucalyptus olivaceaoltvacea</i>)	2 side rows; Leaf Area Index = 1.13, 2.36	AT, RH, VPD, LF, RAD, Gs, Θ_v
Coutts et al. (2016)	Melbourne, Australia	Cfb	E-W	Full	-	0.27, 0.32, 0.76	Trees (<i>Platanus</i> , <i>Ulmus</i>)	2 side rows, Percentage of the ground covered by vegetation = 31%, 12%, 45%	WS, AT, RH, RAD, UTCI
Gillner et al. (2015)	Dresden, Germany	Dfb	-	Full	-	-	Trees (<i>Aesculus × carnea</i> , <i>Corylus corluna</i> , <i>Ginkgo biloba</i> , <i>Liriodendron tulipifera</i> , <i>Tilia cordata</i> , <i>Ulmus x hollandica</i>) Trees (<i>Aca</i> , <i>Cco</i> , <i>Gbi</i> , <i>Ltu</i> , <i>Tco</i> , <i>Uho</i>)	Leaf Area Density = [0.90; 2.56]	AT, ST, RH, Gs, Emax
Andreou (2014)	Island of Tinos, Greece	Csa	Many	Full	-	Many	Trees	Height of Trees/Height of Building = [0.3; 1.0]	WS, AT, ST, RAD
Vailshery et al. (2013)	Bangalore, India	Cwa, Cfa	Many	Full	-	Many	-	Canopy cover = [30%; 90%]	AT, RH, ST
Djedjig (2013)	La Rochelle, France	Cfb	N-S	Reduced	1/8	1.1	Green roofs and walls (<i>sedum</i> , <i>mint</i> , <i>thyme</i> ...)	-	AT, RH, RAD, ST, HF
Correa et al. (2012)	Mendoza, Argentina	BWk	W-E	Full	-	0.16 – 0.31	Trees (<i>Platanus acerifolia</i> , <i>Morus alba</i> , <i>Fraxinus excelsior</i>)	2 side rows	WS, AT, RH, ST, RAD
Park et al. (2012)	Saitama, Japan	Cfa	-	Reduced	1/6	0.8	Trees	2 sides rows and 1 central row	WS, AT, GT
Ouldboukhitine et al. (2011)	La Rochelle, France	Cfb	N-S	Reduced	1/8	1.1	Green roofs (<i>Tundra</i> , <i>Pampa</i>)	-	AT, RH, LT, RAD
Shashua-Bar and Hoffman (2003)	Tel-Aviv, Israel	Csa	N-S, E-W	Full	-	0.3	Trees (<i>Ficus</i>)	2 sides rows, Percentage of the ground covered by vegetation = 63%; 74%	WS, AT, LT, RAD

TABLE 13 – Some studies carried out on vegetated canyon streets in outdoor environment. The scale of the street in a reduced environment is determined in relation to a reference height of 10 m. Variable names are AT : Air Temperature, Emax : Maximum evapotranspiration, Gs : Stomatal conductance, HF : Heat Flux, LHF : Latent Heat Flux, LT : Leaf Temperature, RAD : Radiation, RH : Relative Humidity, SHF : Sensible Heat Flux, ST : Surface Temperature, UTCI : Universal Thermal Climate Index, WS : Wind Speed. Climate characteristics refer to the Köppen-Geiger classification : BWk : Semi-arid climate, BWh : Arid climate, Cfa : Humid subtropical climates, Cfb : Oceanic climate, Csa : Mediterranean hot summer climates, Cwa : Dry-winter humid, subtropical climate, Dfa : Hot summer continental climates, Dfb : Warm summer continental or hemiboreal climates.

5.1.2 Materials and methods

5.1.2.1 Experimental site

For the purpose of the study, a canyon street was built at Institut Agro in Angers (47°28'N, 0°33'E), in north-western France. Angers has a temperate oceanic climate, considered as Cfb according to the Köppen-Geiger classification. The experimental installation consists of a 1/5 scale canyon street (FIGURE 33). The street is oriented north-south and prevailing winds are mainly from west, meaning that they blow perpendicular to the street. The street has nominal dimensions of 16 m long and 2 m wide. The two buildings which border it are 2 m high and 2 m wide. It can therefore be described as a “regular Canyon” since its aspect ratio (ratio of the height of the buildings to the width of the street) is 1. The floor on the ground of the canyon street consists, from top to bottom, of a 0.04 m thick layer of asphalt, a 0.25 m thick layer of gravel and a layer of brown soil beyond 0.25 m in depth. The walls are made of 0.1 m thick concrete and are insulated with 0.12 m thick expanded polystyrene and covered with white paint on the street-side. The roofs and external walls of the buildings were built with wooden frames and covered with steel pans to ensure rain proofness of the buildings.

The street is divided into three modalities organized from north to south : a treed modality at the northern side of the street, a treed modality in the middle of the street and a treeless modality at the southern side of the street (see FIGURE 34). The existence of two vegetated modalities will enable us, in a future experiment, to grow the trees located in the middle of the street in condition of water restriction, in order to study the impact of the soil water availability on the climatic services provided by trees. However, in the present study, trees of both modalities were grown identically, in well-watered conditions. For this reason, in the present study only the Northern modality will be exploited for the vegetated condition and compared with the Southern non-vegetated modality. Each vegetated modality counts five trees, and all measurements were taken at the level of the three central trees, to avoid border effect.

The plant species used is the ornamental apple tree *Malus coccinella*® ‘Courtarrow’. The studied trees are issued from cuttings, grown in a nursery (Briant Jeunes Plants) for 1



FIGURE 33 – Canyon street at 1/5 scale built at Institut Agro, in Angers (France). (a) : top view, (b) : front view Photo credit : INRAE, OPAALE research unit.

year. At the time of the experiment, the trees were 3 years old. They had been transferred one year earlier in the street in 80 L containers. The containers were filled with a layer of 0.25 m of topsoil/compost mixture in a 60/40% volume ratio, followed at the bottom with a 0.1 m thick mixture of topsoil-compost/stone in a 65/35% volume ratio. A layer of concrete with a slight slope was installed at the bottom of the containers to facilitate drainage. The total effective volume of the topsoil-compost mixture was finally 44.5 L. In cities, the trees are planted in pits with a volume of 10 m^3 (10,000 L), with 65% of topsoil-compost mixture in volume ratio (the remaining 35% corresponding to stones). This yields an effective volume of topsoil-compost of 6.5 m^3 at full-scale. Applying a geometrical reduction factor of $(1/5)^3$ gives an effective volume at reduced-scale of 52 L. We can therefore see that the effective volume in our containers (44.5 L) is consistent with the value used in real cities. As for the choice of the 60/40% proportions of the mixture of topsoil-compost, it is based on the common practices of green space planners (Bacholle et al., 2006). From a more scientific point of view, this ratio provides guarantees of the sustainable agronomic quality of urban soils supporting plantation trees. We have worked for several years on the effect of different doses of compost on soil structural properties (Cannavo et al., 2014, 2018; Vidal-Beaudet et al., 2012) showing that a proportion of

40% compost by volume was the best compromise between the agronomic quality of the soil and tree growth.

5.1.2.2 Instrumentation

A scheme of the experimental facility with its equipment is shown in FIGURE 34. The experimental measurement campaign took place from June 8 to September 18, 2020. Sensors were installed inside the street in both vegetated and non-vegetated modalities and outside the street to measure a set of climatic variables : air temperature (in °C), relative air humidity (in %), wall temperatures (in °C), heat flux through walls (in $W m^{-2}$) and radiation (in $W m^{-2}$). Measurements of the climatic variables were also carried out outside the street using two meteorological masts. A 10 m high mast, located approximately 8 m west from the western building of the street, was equipped with sonic wind sensors at 2 m, 5 m, and 10 m from the ground to measure incident wind conditions on the street (recall that prevailing winds are coming from the west). A 2 m high mast, located approximately 6.5 m north from the northern end of the street, was used to measure temperature, humidity (at 0.4 m, 1.5 m, and 2 m from the ground) and radiation (at 2.1 m from the ground) conditions outside the street. The position of this Northern mast was chosen so that it benefits from the same incident insolation as the street. A Météo-France weather station is located about 400 m from the canyon street site. The trends of the data provided by this station and those of the data recorded next to the canyon street on the northern mast have been compared and show good consistency.

To quantify the impact of trees on the radiation budget of the street, 4-component net radiometer sensors were installed above each modality at 2.1 m from the ground. These radiation sensors provide access to the short and long wavelengths of ingoing and outgoing radiation. A net radiation sensor was also placed on the north mast at 2.1 m from the ground to measure the net radiation outside the street. Upward pointing pyranometers were placed in the center of the street, at 0.4 m from the ground, respectively in the non-vegetated modality and in the vegetated modality. These sensors measure the global radiation transmitted at 0.4 m and will allow to calculate, from the global radiation measured at 2.1 m, the rate of solar radiation intercepted by the buildings on the street on

the one side, and by the walls and trees on the other side. Fluxmeters were installed 1 m from the ground on the east and west walls in each of the vegetated and non-vegetated modalities to measure both conductive heat flux through the walls and wall temperatures.

To measure the air temperature and relative humidity, temperature, and humidity sensors (TRH) sensors were installed in the vegetated and non-vegetated modalities as shown in FIGURE 34. A preliminary field survey revealed that a vertical gradient of air temperature and relative humidity develops, while gradients on the horizontal transverse axes only exist near the ground. For these reasons, the TRH sensors were placed on a vertical axis at 0.4 m, 1 m, 1.5 m, and 2 m from the ground. We also plan to evaluate thermal comfort at human being's height which, on the scale of the canyon street, corresponds to a height of 0.4 m. To do this, three TRH sensors were installed on the horizontal axis at 0.4 m from the ground respectively at 0.15 m from the west wall, in the middle of the street and at 0.15 m from the east wall. The air temperature and relative humidity data provided by the TRH sensors made it possible to calculate the absolute humidity.

To evaluate the heat stress felt outside the street and inside the street in both the vegetated and non-vegetated modalities, the UTCI (Bröde et al., 2012) comfort index was retained because compared to other thermal comfort indices, it has the particularity of taking account of all climatic variables, to make use of an advanced human physiological model (Fiala, 2010), and to be valid for a wide range of climatic conditions. A globe temperature sensor was therefore installed at 0.4 m from ground outside the street (near the north mast) and inside the street in the non-vegetated and vegetated modalities. Together with the air temperature, humidity and wind speed respectively measured at the same height, the globe temperature will make it possible to evaluate the human comfort indices at 0.4 m, corresponding to a height of 2 m at full-scale, which is relevant for the evaluation of the thermal comfort.

Each container was covered with an appropriate lid to prevent any water input from a rain event, and irrigation was ensured by sets of 4 drippers of 1 L per hour installed in each container. This arrangement makes it possible to control the water intake of the trees, which could be adjusted depending on the weather demand and on the tree development.

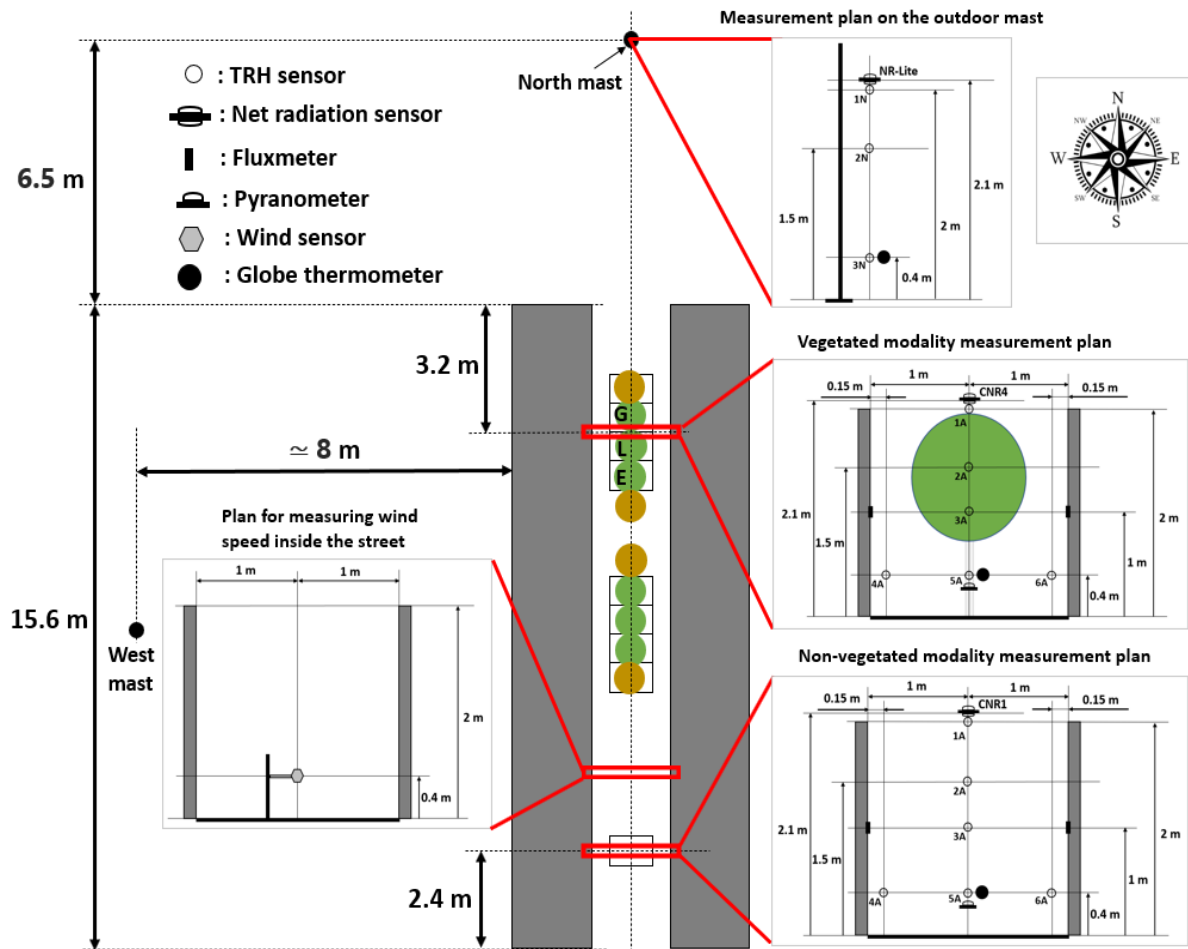


FIGURE 34 – Sketch of the street with the different modalities, the different measurement plans, the location of the different sensors and the outside masts. The positions of the trees are shown by green discs. Only tree marked G, L et E are investigated.

In order to be able to carry out the water balance and monitor the soil water status, soil moisture sensors and tensiometers were installed in the three central containers of each modality to measure the soil volumetric water content and the soil water potential respectively. The location of those sensors is shown in FIGURE 35. Water potential measurements were performed at two depths (0.15 m and 0.3 m) and on both sides of the trees, to correctly evaluate water availability in the container. Water volumetric content

was assessed at mid-depth (at 0.22 m) using capacitive ECH2O sensors located in the North and South of the containers. The sensors were calibrated in the lab using the same soil mixture as in the container. The data from the soil sensors were analyzed and confirmed that all the trees were well-watered during all the measurement campaign : indeed, soil water potential was often close to field capacity (-330 hPa), and always stayed above -800 hPa, ensuring well-watered conditions. Moreover, a daily observation of drainage confirmed that irrigation was abundant enough to ensure trees were well-watered. The characteristics of the sensors we used are provided in TABLE 14.

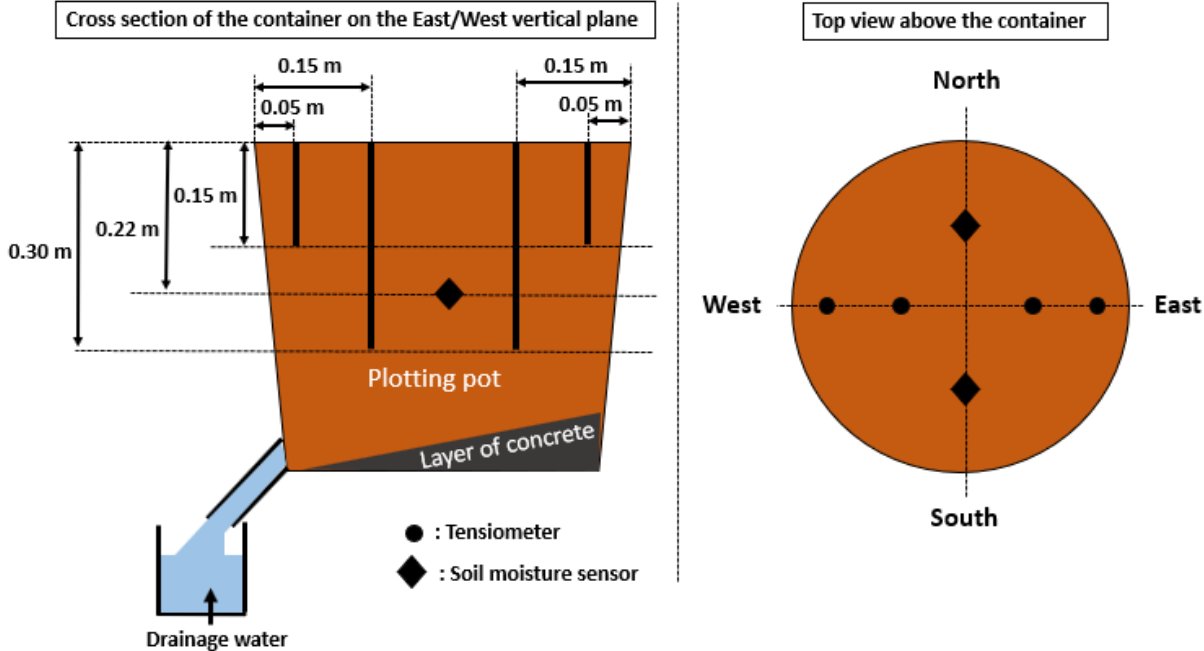


FIGURE 35 – Location of soil sensors in the three central containers of the vegetated modality.

Measured variable	Sensor type	Measurement range	Accuracy	Reference, manufacturer
Wind speed & wind direction (street : $z = 0.4 m$)	3D sonic anemometer	0 to 30 $m s^{-1}$ 0-359°	0.08 $m s^{-1}$ $\pm 0.7^\circ$ à 1 $m s^{-1}$	CSAT3, Campbell Scientific Ltd
Wind speed & wind direction (west mast : $z = 10 m$)	2D sonic anemometer	0 to 60 $m s^{-1}$ 0-359°	$\pm 2\%$ at 12 $m s^{-1}$ $\pm 0.3^\circ$ à 12 $m s^{-1}$	Wind Sonic, Gill instrument
Wind speed & wind direction (west mast : $z = 2m$ and $z = 5m$; street : $z = 2m$)	2D sonic anemometer	0.25 to 40 $m s^{-1}$	$\pm 0.13 m s^{-1}$ $\pm 1.5^\circ$	CV7, LCJ
Solar and long wavelength radiation	Net radiometer	-	10%	CNR1, CNR4, and NR-Lite, Kipp & Zonen
Surface temperature	Flat platinum probe	-	0.1 °C	PT100, TC ONLINE
Surface temperature	Fluxmeter	-30 to 70 °C	n.c.	Captec
Heat flux	Fluxmeter	Up to 150 kW	$\pm 3\%$	Captec
Air temperature (vegetated modality)	Platinum probe	-40 to 60 °C	± 0.2 °C	Pt1000 HMP110, Vaisala
Relative humidity (vegetated modality)	Capacitive probe	0 to 100%	$\pm 1.5\%$ for $HR \leq 90\%$ $\pm 2\%$ for $HR > 90\%$	Pt1000 HMP110, Vaisala
Air temperature (non-vegetated modality)	Platinum probe	-70 to 180 °C	± 0.2 °C	Pt100 HMP337, Vaisala
Relative humidity (non-vegetated modality)	capacitive	0 to 100%	$\pm (1.0 + 0.008 \times$ indicated value)% HR	Vaisala HMP337
Volumetric Water content	capacitive	0 to 100%	$\pm 0.03 m^3 m^{-3}$	ECH20 EC-5, Decagon

TABLE 14 – Characteristics of the sensors used for experiments.

5.1.2.3 Methods

A description of the criteria and the method that were retained to choose the days for which collected data were analyzed is provided here. The way tree transpiration and street energy balance were operated are also described here. These preliminary calculations will then be used for data analysis.

Choice of investigated sunny and cloudy days

To choose these days, we first determined the relative sunshine on all days of the measurement campaign by calculating the ratio between the daily integral of the global radiation reaching the top of canyon street site, $R_{top-street}$ and the daily integral of solar radiation above the atmosphere, $R_{top-atm}$:

$$ratio = \frac{R_{top-street}}{R_{top-atm}} \quad (84)$$

The daily integral of global radiation reaching the top of the canyon street is measured using the 4 components net radiometer located at 2.1 m from the ground of the street. The daily integral of solar radiation above the atmosphere, $R_{top-atm}$, is given by :

$$R_{top-atm} = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \sin(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (85)$$

$R_{top-atm}$ is expressed in $MJ m^{-2} day^{-1}$. $G_{sc} = 0.0820 MJ m^{-2} minute^{-1}$ is the solar constant. φ is the latitude of the position in radian d_r , δ and ω_s are respectively the inverse of the relative (no unit) Earth Sun distance, the solar declination in radian and the sunset angle in radian. These variables are respectively determined by :

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (86)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (87)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (88)$$

J is the number of the day in the year ($J = 1$ for January 1st and $J = 365$ or $J = 366$ for December 31st). The latitude φ of the city of Angers is 47.47°N or 0.828 radian.

Based on the analysis of the measured global radiation during several days of the experiment, it was established that days with a sunshine ratio above 0.65 were sunny days, and that days with a sunshine ratio below 0.45 were cloudy days.

Richardson number and flow convection regime

Regarding the stability and the wind convection regime, the relative importance of the inertial forces and buoyancy forces can be assessed using the Richardson number, which is given by the following formula :

$$R_i = -gH \frac{(T_w - T_0)}{T_0} \frac{1}{U_0^2} \quad (89)$$

T_w and T_0 are the wall and free-stream temperature in K respectively, U_0 is the free stream velocity in $m s^{-1}$, g is the acceleration of the gravity in $m s^{-2}$, and H is the building height in m .

Here, T_w is the average of the 6 temperatures measured on the walls and on the ground in the vegetated modality and in the non-vegetated modality, T_0 is the air temperature measured at a height of 2 m on the north mast, U_0 is the wind speed measured on the outside mast at 10 m from the ground. When the Richardson number is close to zero, the flow conditions are neutral, and the flow regime is forced convection. When the Richardson number is above zero, the flow is stable. When the Richardson number is negative, the flow conditions are unstable, with forced convection when $-1 \leq R_i \leq 0$, mixed convection when $-10 \leq R_i \leq -1$ and natural convection when $R_i \leq -10$.

Tree transpiration calculation

Since tree transpiration is one of the means by which trees modify the microclimate, it was investigated in the present study. A water balance was done to estimate the tree transpiration (FIGURE 36). The water balance equation in volume of water per unit time is written as follows :

$$P + I - \Delta S - ETR - D \pm R = 0 \quad (90)$$

P is the total rainfall, I is the irrigation applied to the soil, ΔS is the change in water stock in the soil, ETR is effective evapotranspiration, D is drainage and R is runoff.

Here, the containers are protected from the rain, and moreover the days selected for analysis in the present study were not rainy, therefore the rainfall and runoff are zero and evaporation from the ground is negligible. Evapotranspiration is then equal to tree transpiration. Transpiration occurs during daytime, according to the climatic demand.

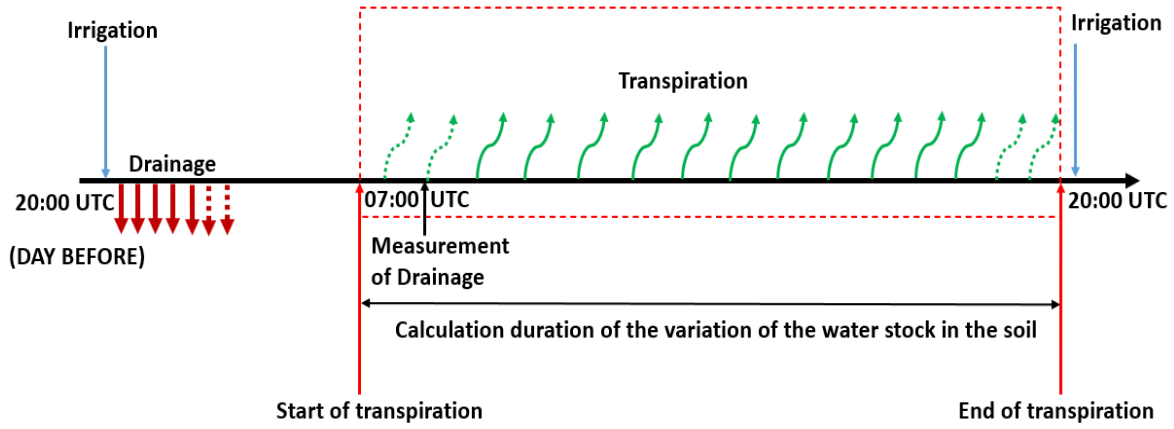


FIGURE 36 – Representation of the different stages of water inputs and outputs considered for the calculation of the water balance and transpiration amount.

The calculation period for tree transpiration was adjusted according to the sunlight duration and climatic demand of the day in order to match with the beginning and end of the transpiration period. Since irrigation occurs at 20 :00 UTC, we can consider that drainage is finished before the sunrise and the start of the transpiration calculation. The water balance equation during the calculation period for transpiration then reduces to :

$$ETR = -\Delta S = -\Delta\Theta V_{soil} \quad (91)$$

$\Delta\Theta$ is the change in volumetric water content computed using the two ECH2O sensors in each tree container, and V_{soil} is the volume of soil in each tree container. This time interval also presents the advantage of being free from possible uncertainties on irrigation or drainage measurement.

This real evapotranspiration, measured using the above-mentioned methodology, can be compared to a reference evapotranspiration ET_{ref} , which corresponds the evapotranspiration of a reference surface, defined as an extensive well-watered grass crop of 0.12 m height, with an albedo of 0.23, fully exposed to incident radiation. The reference evapotranspiration depends only on the climatic demand, and its expression is given by the so-called Penman-Monteith equation which results from the energy balance of the reference surface :

$$ET_{ref} = \frac{0.408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (92)$$

With ET_{ref} : the reference evapotranspiration in $mm \ day^{-1}$, Δ : slope of the water vapor saturation curve in $kPa \ ^\circ C^{-1}$, R_n : daily net radiation in $MJ \ m^{-2} \ day^{-1}$, G : conductive heat flux density in the ground in $MJ \ m^{-2} \ day^{-1}$ usually considered as zero on a daily basis, γ : psychrometric constant in $kPa \ ^\circ C^{-1}$, T : mean daily air temperature in $^\circ C$, u_2 : mean daily wind velocity at 2 m from the ground in $m \ s^{-1}$, e_s : mean daily saturation pressure of water vapor in kPa , e_a : mean daily water vapor pressure in kPa .

A Meteo-France weather station provided daily values of ET_{ref} . Climatic variables measured on our meteorological masts also allow to compute a reference evapotranspiration for our experimental site.

The crop coefficient k_c of a given crop (other than grass) is given by the ratio of the ETR of that crop in well-watered conditions to ET_{ref} . The FAO-56 provides tabulated value of crop coefficients, for a wide range of agricultural crop, and at different growing stages. A common value is given for apple, cherry, and pear fruit trees. A mid-stage of growing season (which corresponds to the period of interest for this experiment), it reads : $k_{c0} = 0.90$. This value is valid for standard conditions of wind velocity and relative humidity over grass, namely $u_2 = 2 \ m \ s^{-1}$ and $RH_{min} = 45\%$. Away from these conditions, the crop coefficient must be adjusted using the following formula :

$$k_{cb} = k_{cb0} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (93)$$

Where k_{cb0} : crop coefficient under standard conditions, k_{cb} : crop coefficient under actual conditions, u_2 : the mean value for daily wind speed at 2 m height over grass ($m \ s^{-1}$, for

$1 \text{ m s}^{-1} \leq u_2 \leq 6 \text{ m s}^{-1}$), RH_{min} : the mean value for daily minimum relative humidity in (%) for $20\% \leq RH_{min} \leq 80\%$, h : the mean plant height in (m).

A different approach, the WUCOLS (Water Use Classifications of Landscape Species) approach, was proposed by the University of California Cooperative extension and the California department of water resources for estimating irrigation need of landscape planting (WUCOLS, 2000). Indeed, the FAO methodology is designed for food production, with the intention to maximize yield. In urban greening, the plant species may be different, and they are not grown with the same objective. In WUCOLS approach, the crop coefficient k_c is replaced by a landscape coefficient k_L , taking into account three factors through specific coefficients : the plant species coefficient (k_{plant}), the microclimate coefficient (k_{mc}), and the planting density coefficient ($k_{density}$). In well-watered conditions, we thus have :

$$ETR = k_L ET_{ref} \quad (94)$$

$$k_L = k_{plant} k_{mc} k_{density} \quad (95)$$

Different categories, each associated to a range of values, are proposed for each coefficient. Over 2700 landscape species are referenced, including crabapple tree, for which the plant factor is in the medium category, with an average value of 0.5.

Street energy balance

The energy balance was carried out over a 2.4 m long (corresponding to the sum of the width of the three pits containing the 3 central trees), 2 m wide (corresponding to the width of the street) and 2.1 m high (corresponding to the height of the net radiometer) volume inside the street deprived of trees (see FIGURE 37). The cumulated net radiation and conductive flux were calculated from the experimental values using the radiation and heat flux sensors installed in the non-vegetated modality. This energy balance may be written in the general form as :

$$R_n = G + H + L \quad (96)$$

Where R_n is the net radiation, G the conductive flux density, H the sensible heat flux density and L the latent heat flux density (evapotranspiration). Since we perform the

balance in the non-vegetated modality of the street, the latent term is therefore zero. The net radiation was computed using measurements from the net radiometer at $z = H$. The conductive heat flux density was computed as the sum of the conductive heat flux of the two walls and the ground. The sensible heat flux density can then be evaluated as the difference between the net radiation and the conductive heat flux. It must be stated that this estimation of the sensible heat flux as the residue of the energy balance is subject to caution as it can also be affected by uncertainties in the evaluation of the other terms.

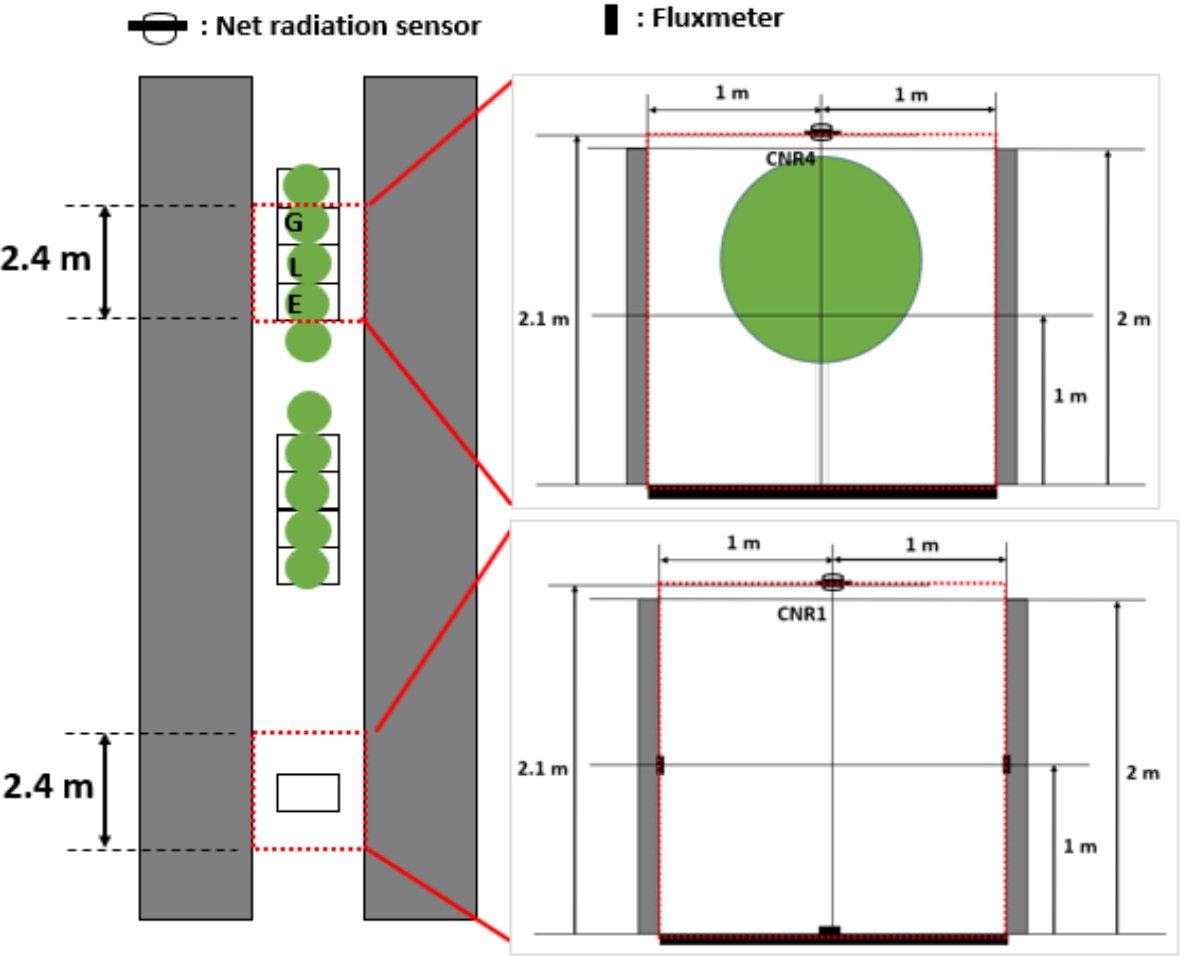


FIGURE 37 – Considered domains for the calculation of the energy balance in the non-vegetated modality and the transpiration of the 3 central trees in the vegetated modality.

5.1.3 Results

The results are analyzed according to two objectives :

- To study the impact of the canyon street on the microclimate by comparing the data acquired inside the street in the non-vegetated modality to those acquired outside the street using the north mast.
- To study the impact of trees on the microclimate inside the canyon street by comparing results acquired in the vegetated modality to those acquired in the non-vegetated modality of the canyon street.

5.1.3.1 Meteorological conditions during the selected days

For the purpose of the study, we will focus on two contrasting days in terms of solar radiation, but sufficiently close in time to have similar daylight duration and a stable leaf area for each tree. According to the methodology described in section 5.1.2.3, July 25, 2020 presents a rather low value of this ratio ($ratio = 0.243$) and is therefore considered as a cloudy day. July 29, 2020 shows a relatively high ratio value ($ratio = 0.655$) and is therefore considered as a sunny day. July 29, 2020 was preceded by a very sunny day ($ratio = 0.719$), but July 25, 2020 was preceded by a rately sunny day ($ratio = 0.558$). For the two studied days, the sunrise and sunset times were respectively 04 :32 - 19 :44 UTC for July 25, 2020 and 04 :37 - 19 :39 UTC for July 29, 2020.

The incident wind was analyzed using wind roses (not shown). For the two studied days, the direction of the incident winds was variable, but the wind speeds were very low on the experimental site (mostly lower than 2 m s^{-1} at 10 m from the ground). More specifically, the cloudy day direction (July 25, 2020) had clearly established southwesterly direction and a mean wind speed at 10 m of 1.3 m s^{-1} , and the sunny day (July 29, 2020) had a rotating northwesterly to northeasterly wind, with an average speed of 1.5 m s^{-1} . Regarding the flow convection regime, the daily evolution of the Richardson number, computed according to formula in section 5.1.2.3. for the sunny day and for the cloudy day are shown in FIGURE 38. For the sunny day, we are in a mixed convection regime during the night (presence of thermal effects, negative values of Ri, down to -4) and in a forced convection regime during the day (close to thermal neutrality). On a cloudy day,

we are almost always in forced convection and close to thermal neutrality.

Finally, the Penman Monteith reference evapotranspiration (ET_{ref}) (Allen et al., 1998) could also be calculated using the data from our meteorological mast (Eq. (92)). It was 5.2 mm day^{-1} on July 29, 2020 and 1.7 mm day^{-1} on July 25, 2020.

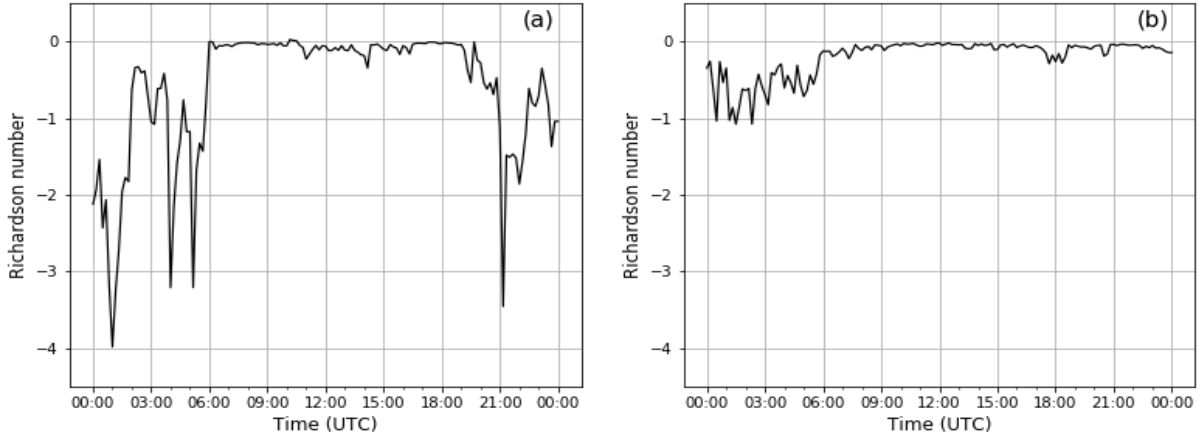


FIGURE 38 – Daily evolution of the Richardson number. (a) : for the sunny day, (b) : for the cloudy day.

5.1.3.2 Characteristics of the trees during the selected days

As far as the trees are concerned, the two selected days of investigation are sufficiently close in time to consider identical tree characteristics for the two days. The dimensions of the tree crowns were measured and the crown extended between 0.6 m and 1.7 m from the ground vertically, over 0.6 m on each side of the trunk laterally, and over 0.87 m longitudinally for each tree along the main axis of the street. This resulted in an average volume of 1.15 m^3 for each tree crown, and in a projected area of the tree crown of 1.04 m^2 per tree. The percentage of ground covered by vegetation, defined as the ratio of the projected area of the tree crowns by the total area of the street in the vegetated modality, is 60%. One-sided leaf areas of the three trees in the center of the row in the vegetated modality were estimated on July 23, 2020 just before the studied days. The cumulated leaf surface area per tree was estimated using a leaf area allometric relationship

and a coefficient of leaf surface area per unit length of branch (both calibrated on our trees using reference leaves and reference branches), and then the measurement of all branches length for each tree. The total leaf areas values were 3.11 ; 2.53 and 2.14 m^2 for trees E, L and G, respectively, with an average value of 2.59 m^2 per tree (tree positions are shown in FIGURE 34 and FIGURE 37). Compiled together with the crown dimensions, this yields an average Leaf Area Index (LAI) of 2.49 $m^2 m^{-2}$ and an average Leaf Area Density (LAD) of 2.26 $m^2 m^{-3}$. The main parameters of interest are compiled in TABLE 15.

Projected area of crown (m^2)	Ground covered by vegetation (%)	LAI ($m^2 m^{-2}$)	LAD ($m^2 m^{-3}$)
1.04	60	2.49	2.26

TABLE 15 – Average characteristics of the street trees.

5.1.3.3 Radiation balance of the street

Quantifying the radiative phenomena that occur within the street is essential for the analysis of the urban over-heating and of the impact of trees on the microclimate. The daily evolutions of the different radiation components at 2.1 m high inside the canyon street in the vegetated and non-vegetated modalities are shown in FIGURE 39. The temporal dynamics of the different radiation components are similar in both modalities, both for the sunny and the cloudy day. Not surprisingly, the incident radiations (short and long wavelengths) are very similar.

On the sunny day, the "M" shape of the daily evolution of the reflected short wavelength radiation can be explained as follows :

- In the morning, the sun is in the East and the West wall mainly intercepts the solar radiation. The share of reflected short wavelength radiation is therefore important because of the rather high albedo of the white walls.
- Around midday, the sun is near the Zenith and it is the asphalt and the tree leaves (for the vegetated modality) that intercepts most of the incident solar radiation. As their albedo is lower than that of the white walls, the reflected short wavelength radiation is therefore less important. For the sunny day, the total albedos (ratio

between reflected and incident short wavelength radiation for the street which combines reflection from the walls and depending on the modality from the ground and/or the trees) at 12 :00 UTC in the non-vegetated and vegetated modality are 0.09 and 0.12 respectively. These quite low values can be explained by the fact that the sunny day at midday the reflected radiation comes mainly from the ground and/or the trees rather than from the white walls. These albedo values are consistent with the values between 0.1 and 0.12 for a sunny day found by [Najjar et al. \(2005\)](#) at the top of a canyon street in Strasbourg, with characteristics close to our experimental facility (aspect ratio of 0.9, north-east/south-west orientation, with very sparse vegetation) and also with the albedos of 0.12 without vegetation and between 0.11 and 0.12 with trees for a North-South oriented canyon led using TEB-Surfex in [Redon \(2017\)](#). In our study as well as in [Redon \(2017\)](#), the trees thus tend to increase the absorption of solar radiation in the canyon, thus slightly decreasing its albedo.

- In the afternoon, the sun is in the west direction and it is the east wall that is mainly exposed to the sun. The reflected short wavelength radiation increases due to the albedo of the wall.

For the cloudy day, the albedo values at 12 :00 UTC are 0.19 and 0.18 in the non-vegetated and vegetated modality, respectively. These values are higher than during the sunny day because the radiation is more diffuse, and therefore a larger part is directed towards the white walls than during the sunny day.

On both the sunny and the cloudy days, the emitted long-wave radiation is larger than the incident long wave radiation, indicating that the street materials release their heat through long-wave radiation exchanges. Since the absorption of radiation is greater in the non-vegetated modality than in the vegetated modality, the emitted long wavelength radiation is greater in the non-vegetated modality ($37.88 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ for the sunny day) than in the vegetated modality ($36.56 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$). This is also coherent with the surface temperatures that will be analyzed further. Finally, it can be seen for the sunny day that in the middle of the day (at 12 :00 UTC), the net radiation in the vegetated modality is 49 W m^{-2} higher than the net radiation in the non-vegetated modality. At the same time, the net radiation measured outside of the street on the north mast is

approximately 124 W m^{-2} higher than the net radiation in the non-vegetated modality (data not shown).

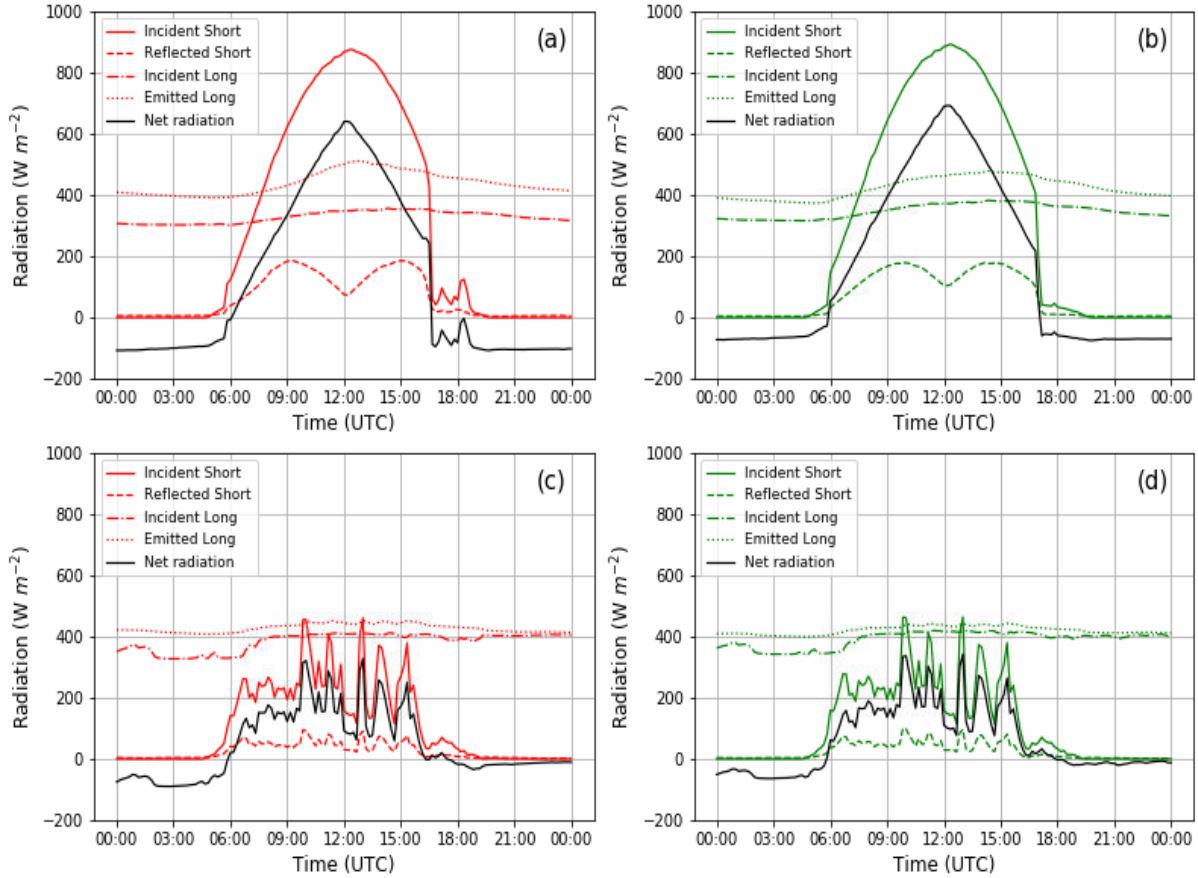


FIGURE 39 – Daily evolution of the different components of the radiation at 2.1 m height. (a) : for the sunny day in the non-vegetated modality, (b) : for the sunny day in the vegetated modality, (c) : for the cloudy day in the non-vegetated modality, (d) : for the cloudy day in the vegetated modality.

5.1.3.4 Interception of global incident radiation by the street and by the trees

The daily evolution of the incident global solar radiation inside the street (in the non-vegetated modality and in the vegetated modalities) at 2.1 m and 0.4 m from the ground is presented in FIGURE 40. Measurements of the overall incident solar radiation at 2.1 m confirm that the non-vegetated and vegetated modality of the street receive the same solar radiation. The measurement made at 0.4 m from the ground in the non-vegetated modality reflects the fact that the east and west walls of the street cause shading to the center of the street respectively during the morning (between 05 :00 and 10 :00 UTC) and during the afternoon (between 14 :30 and 19 :00 UTC). [Andreou \(2014\)](#) showed that north-south orientation provides indeed about 70% of shading of the ground during summertime, for streets with an aspect ratio of 1. In the non-vegetated modality at 12 :00 UTC, there is no more shading from the walls, and the global incident radiation measured at 0.4 m from the ground becomes slightly higher than the global incident radiation on the street (measured at 2.1 m from the ground), due to multiple reflections by the walls of the diffuse component of solar radiation ([Kastendeuch et al., 2006](#)). On a cloudy day, there is also an interception of the incident global radiation by the walls and trees, but this process is less pronounced than for the sunny day, mainly due to the diffuse character of the solar radiation.

The values of the one-day integrals of the incident global radiation at 2.1 *m* and 0.4 *m* respectively from the ground in the vegetated and non-vegetated street modalities are shown in TABLE 16. In the vegetated modality, the integral over the whole sunny day of the incident short wavelength radiation measured at 0.4 *m* from the ground (just below the trees) is 6.7 times lower than that measured at 2.1 *m* from the ground (just above the trees).

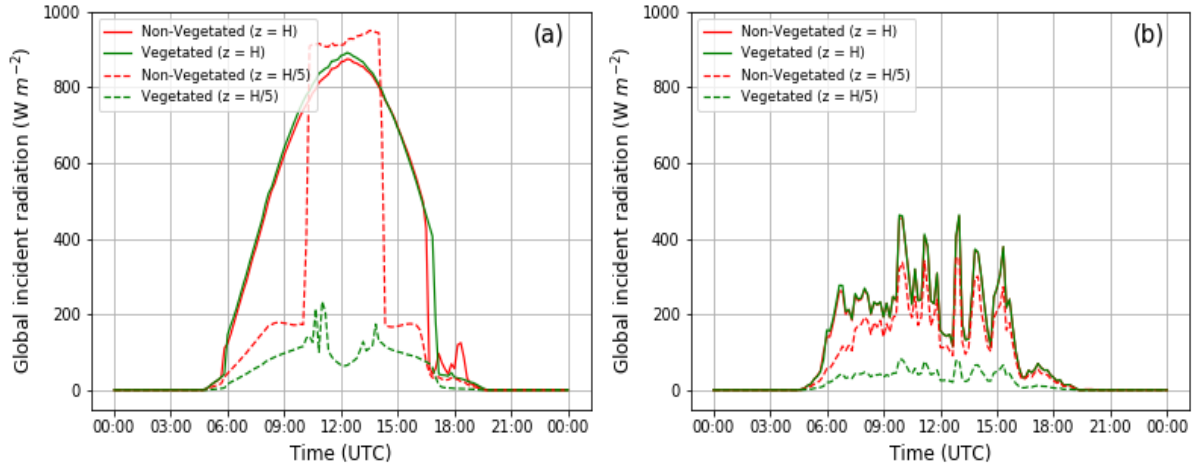


FIGURE 40 – Daily evolutions of global incident radiation in the non-vegetated and vegetated modalities of the street at $z = H$ and $z = H/5$ (a) : for the sunny day, (b) : for the cloudy day.

	At $z = H$	NVM at $z = H/5$	VM at $z = H/5$	Difference at $z = H/5$
Sunny day	25.27	17.09	3.75	13.34
Cloudy day	9.52	6.88	1.66	5.22

TABLE 16 – Daily integral of incident global radiation at 2.1 m ($z = H$) and 0.4 m ($z = H/5$) from the ground in the vegetated and non-vegetated canyon street modalities (NVM and VM) for the sunny day and for the cloudy day. All values are expressed in ($MJ m^{-2} day^{-1}$).

For the sunny day, only 68% of the energy arriving at the top of the street reaches the $H/5$ level in the non-vegetated modality, as a consequence of the shade provided by the walls, and only 15% in the vegetated modality due to the combined interception of radiation by both walls and trees. 32% of the energy arriving above the street is therefore intercepted by the walls ($8.18 MJ m^{-2} day^{-1}$ of energy decrease) and 85% of the incident energy is intercepted by the walls and trees. On a cloudy day, 28% of the energy from

the sun is intercepted by the walls but 83% is intercepted by the walls and trees. Global incoming radiation at $z = H$ is decreased at $z = H/5$, thanks to the tree shading, by $13.34 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ on the sunny day, and by $5.22 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ on the cloudy day. The parts of the incident energy intercepted by the trees for the sunny day and for the cloudy day is therefore 53% and 55%, respectively, meaning, from the energetic point of view, that the shading effect of the trees is therefore larger than that of the walls at $H/5$. These results also reveal very similar behaviors in terms of proportions of intercepted radiation by the trees both for the sunny and cloudy days.

5.1.3.5 Impact of the trees on wall fluxes and wall temperatures

The daily evolution of the heat fluxes on the east and west walls is presented in FIGURE 41. It can clearly be seen that the sun course has an impact on the heat fluxes. Trees reduced the heat flux on a sunny day by 99 W m^{-2} (maximum value) on the west wall and 76 W m^{-2} (maximum value) on the east wall.

Similar daily evolutions in wall temperatures are observed between the non-vegetated and vegetated modalities (FIGURE 42). For the sunny day, in the morning, the sun is in the east and therefore the west wall heats up rapidly to about $26.5 \text{ }^\circ\text{C}$. The east wall temperature increases progressively during the morning, and the reflection of incident solar radiation by the west wall probably contributes to this increase. In the afternoon, the sun is in the west and the temperature of the east wall, which is exposed to the sun, increases to about $34 \text{ }^\circ\text{C}$. Thanks to the reflection of the radiation intercepted by the eastern wall, the western wall heats up again and its temperature reaches a second peak of about $27.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

As for the ground, it is observed that the more it faces the sun, the higher its temperature rises. The soil temperature in the non-vegetated modality rises up to $47 \text{ }^\circ\text{C}$ on the sunny day. These daily evolution of wall and ground temperature are very similar to that found by [Najjar et al. \(2005\)](#). In their study, the ground temperature is the same ($47 \text{ }^\circ\text{C}$), while the wall temperatures are $2 \text{ }^\circ\text{C}$ higher for the eastern wall and $7 \text{ }^\circ\text{C}$ higher for the western wall. This difference on the walls may be due to the walls being less reflective in

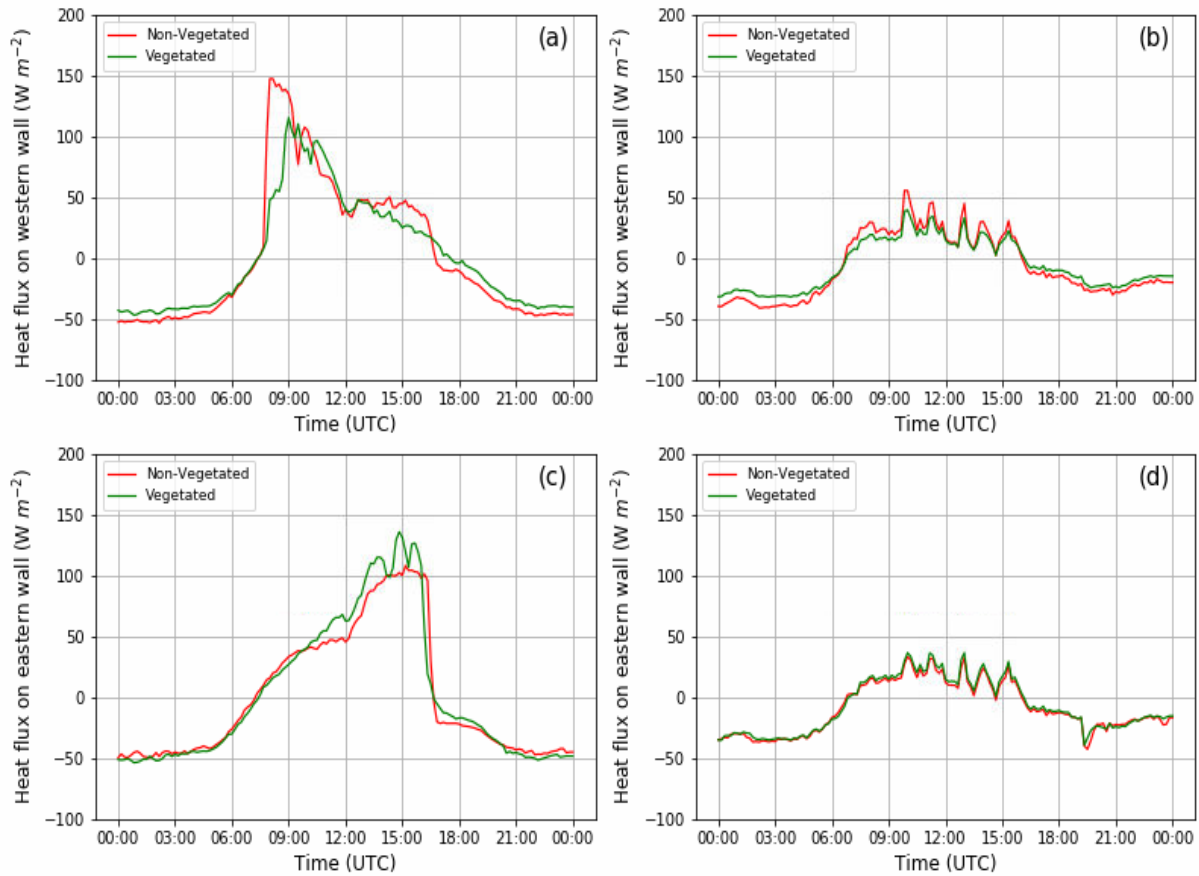


FIGURE 41 – Daily evolution of wall heat fluxes. (a) : for the sunny day, western wall (b) : for the cloudy day, western wall (c) : for the sunny day, eastern wall (d) : for the cloudy day, eastern wall.

Najjar’s street than in our experiment, and also to the street orientation which is 35° to the North in [Najjar et al. \(2005\)](#). In contrast, the values of wall temperature obtained in [Doya et al. \(2012\)](#) in their North-South oriented canyon facility at the 1/8 scale in La Rochelle, France reach much higher values (60°C for the eastern wall and 45°C for the western wall), due to a dark paint on the wall with a very low albedo value (0.145). On a cloudy day, the temperatures of the east and west walls follow almost the same trend but are less impacted by the sun course, which is due, by the very low level of the direct

component of the global radiation, as the sun radiation is mainly diffuse. We can finally notice that during the night, the ground cools down more during the sunny day (minimum of about 16 °C than during the cloudy day (minimum of about 19 °C). This is related to the fact that the sky is clearer on sunny days and that cooling by infrared radiation is more important. The effect of the interception of part of the incident global radiation by the trees is clearly visible on the wall temperatures. Indeed, FIGURE 42 shows that the trees contributed to maintain the east and west walls at temperatures lower by up to 7 °C and the ground at temperatures lower by up to 18 °C compared to the non-vegetated modality. These values correspond to differences at the time of temperature peaks. In their study, Gillner et al. (2015) showed that, thanks to the shading effects, vegetation can reduce surface temperatures by 5.5 to 15.2 °C depending on the plant species used. The authors also showed that trees can reduce asphalt temperatures by up to 4.6 °C per unit of LAD (Leaf Area Density).

5.1.3.6 Tree transpiration

The daily evolution of the transpiration (Eq. (91)) of the three central trees of the vegetated modality for the sunny day and for the cloudy day are respectively given in FIGURE 43 and FIGURE 44. The transpiration was calculated using the methodology described in section 5.1.2.3, with a transpiration period of 05 :30 19 :30 UTC for the sunny day and of 07 :30 17 :30 UTC for the cloudy day, because of the lower climatic demand in early morning and evening. For all trees, the daily evolution of evapotranspiration follows that of the incident global radiation, but with a certain delay for the sunny day, with a peak of transpiration at 14 :00 UTC. This is probably due to the peak of air temperature occurring in the afternoon, and impacting the water vapor pressure deficit, which is another driver of transpiration. The daily cumulated transpiration of trees E, L and G is 2.4, 1.6 and 1.9 L day⁻¹ respectively, for the sunny day (average value of 1.97 L day⁻¹) and 1.3, 0.6 and 1.2 L day⁻¹, respectively, for the cloudy day (average value of 1.03 L day⁻¹). Besides the indication already given in the Material and methods section on soil water potential during the whole experiment, the daily cumulated transpiration of the different trees also confirms that the irrigation of 4 L day⁻¹ per tree for these two specific days was largely sufficient to maintain well-watered conditions for the two studied days. Using the

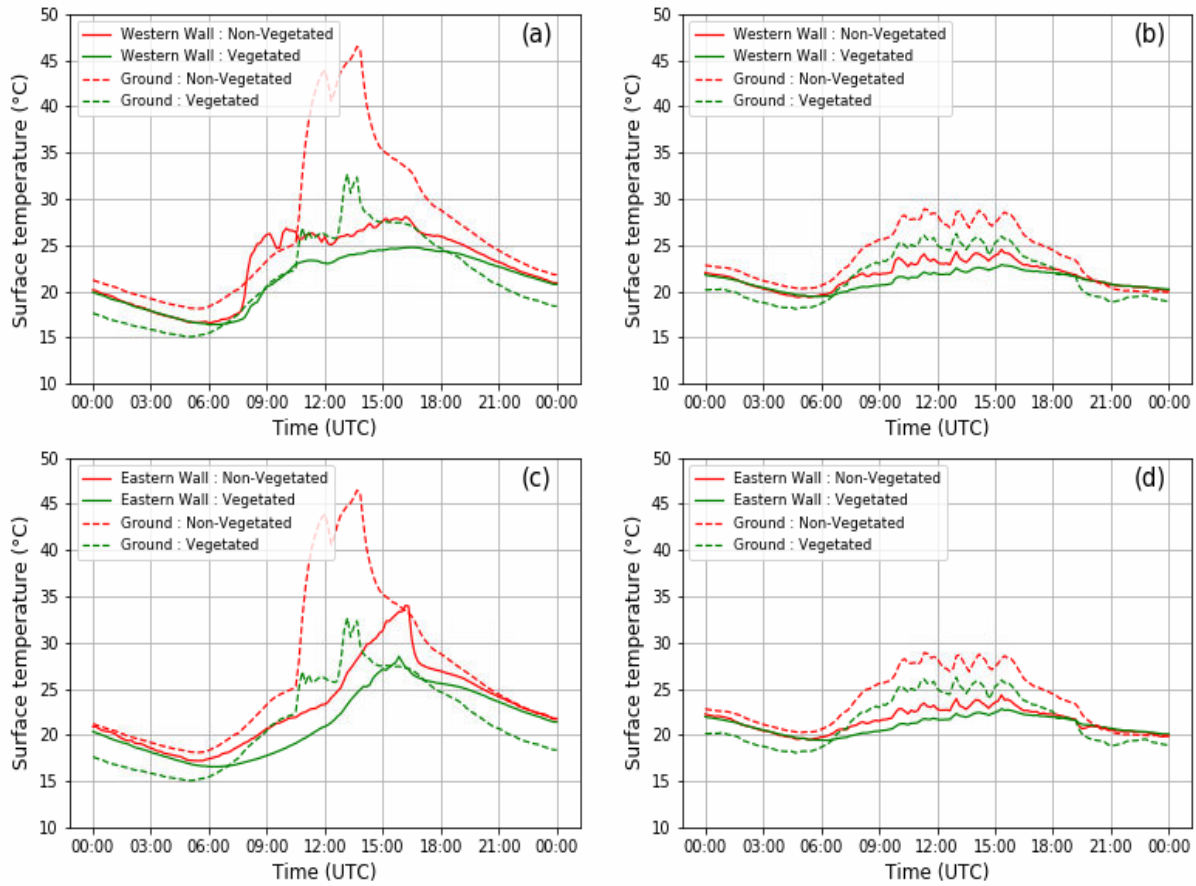


FIGURE 42 – Daily evolution of surface temperatures in the non-vegetated and vegetated modalities. (a) : for the sunny day, west wall, and ground (b) : for the cloudy day, west wall and ground (c) : for the sunny day, east wall and ground (d) : for the cloudy day, east wall and ground.

projected area of the tree crown given in section 5.1.3.2, the tree transpiration can also be expressed in $L m^{-2} day^{-1}$, that is in $mm day^{-1}$: the average value is $1.9 mm day^{-1}$ for the sunny day and $0.99 mm day^{-1}$ for the cloudy day. Recall that reference evapotranspiration was $5.2 mm day^{-1}$ and $1.7 mm day^{-1}$ on the sunny and cloudy day, respectively. The ratio of real to reference transpiration gives a crop coefficient of 0.37 (for the sunny day) and 0.58 (for the cloudy day) for our ornamental apple trees. The FAO-56 crop co-

efficient for the apple tree is 0.9 during mid-season under standard conditions. Adjusted for the weather conditions of the specific days investigated, it reads 0.93 for the sunny day and 0.83 for the cloudy day. It is of interest to note that the transpiration of our trees in urban condition is therefore lower than the theoretical one predicted by FAO. Two main reasons can be invoked : first of all, the FAO deals with agricultural crop, with the aim to maximize yields. Here, we are in a different perspective : our apple trees are young ornamental trees, the fruits are not edible, and for this reason the FAO crop coefficient may be overestimated here. Secondly, the growing conditions are not optimal in our street in terms of solar access of the trees. As reported in the literature ([Andreou, 2014](#)), the north-south orientation in summer provides a lot of shade inside canyon streets ; and the sun global radiation is the main driver for transpiration. This may also explain why the crop coefficient we obtain is higher for the cloudy than for the sunny day : being already in the shade from the cloud cover of the sky, the street does not bring additional shade to the street during the cloudy day. Therefore, the crop coefficient based on our transpiration measurements during the cloudy day is closer to that of FAO-56 than the one for the sunny day.

When applying the WUCOLS method proposed in [WUCOLS \(2000\)](#) (see section 5.1.2.3) for landscape planting, we consider an average planting density with a value $k_{density} = 1$. The crabapple tree has a lower plant coefficient ($k_{plant} = 0.5$) than that of orchard tree in FAO. For the cloudy day, considering that the shading effect of the walls is reduced, the microclimate falls into the higher end of the "low" category, with $k_{mc} = 0.9$. This gives for the cloudy day a landscape coefficient $k_L = 1 \times 0.5 \times 0.9 = 0.45$. This value is quite close to the one we obtain for cloudy day (0.58). During the sunny day, due to the shading from the walls, our street falls into the middle of the "low" category for the microclimate coefficient, with $k_{mc} = 0.7$. According to the WUCOLS approach, the landscape coefficient thus reads $k_L = 1 \times 0.5 \times 0.7 = 0.35$, which is close to our value for the sunny day (0.37). Therefore, the WUCOLS (2000) approach present a better match to our results than that of FAO approach, by taking into account the ornamental species investigated (crabapple tree), the landscape application, and the microclimate of the street.

From the energetic point of view, multiplying by the latent heat of vaporization of wa-

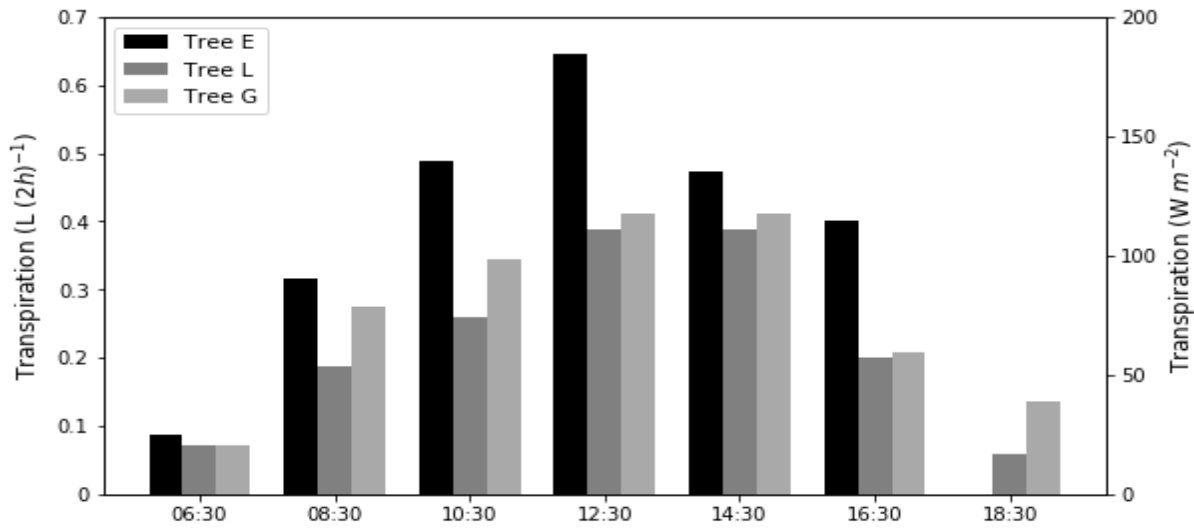


FIGURE 43 – Transpiration of the three central trees (E, L and G) of the vegetated modality for the sunny day.

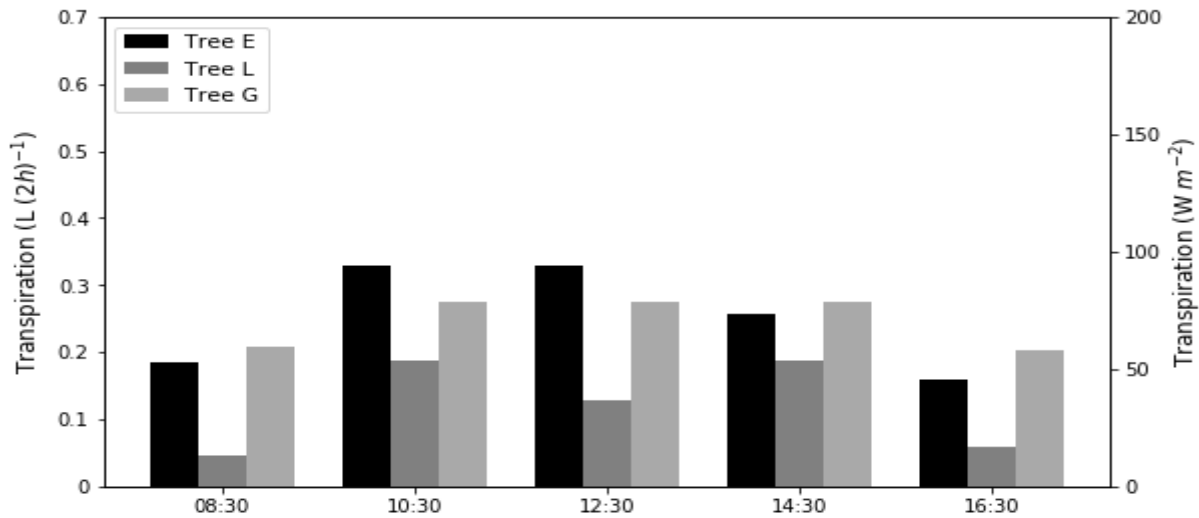


FIGURE 44 – Transpiration of the three central trees (E, L and G) of the vegetated modality for the cloudy day.

ter at 20 °C ($L_v = 2.46 \text{ MJ kg}^{-1}$) yields a transpiration of $4.66 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and $2.44 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ during the sunny and the cloudy day, respectively. These figures

will be compared in the discussion section (section 5.1.4) to the reduction of global radiation provided by the trees, in order to compare the relative impact of shading and transpiration in climatic benefits of the trees.

5.1.3.7 Impact of the street and trees on air temperature

The spatial distribution of air temperature along the central vertical axes of the non-vegetated and vegetated canyon street modalities is presented in FIGURE 45. It is generally observed that the distribution of the air temperature is almost uniform during the night (at 03 :00 UTC) for both sunny day and cloudy day. On the central vertical axis, for both the sunny day and the cloudy day, it is observed that, for the sunny day, the air temperature measured under the canopy at $z = 0.4 \text{ m}$ during the day (12 :00 UTC) is lower by $2.7 \text{ }^\circ\text{C}$ than that measured in the non-vegetated modality at the same height thanks to shading caused by the trees.

Since the impact of trees on air temperature appears to be greater under the canopy than at other locations inside the street on the sunny day, we now turn our attention to the spatial distribution of air temperature on the transverse horizontal axis located 0.4 m from the ground as shown in FIGURE 46. This height is also of interest for the evaluation of thermal comfort. Again, for the sunny day and for the cloudy day, we observe almost no difference between the two modalities of the street during the night (at 03 :00 UTC). The spatial distribution of air temperature is almost uniform. At 12 :00 UTC, we notice that it is cooler (by $2.7 \text{ }^\circ\text{C}$) in the vegetated modality compared with the non-vegetated one in the sunny day, especially under the tree crown in the middle of the street ($x = 1 \text{ m}$).

The daily evolution of air temperatures outside the street and inside the street at $z = 0.4 \text{ m} = H/5$ from the ground (in vegetated and non-vegetated modalities) and at mid-distance from the walls, are presented in FIGURE 47. Globally, it can be noted that for both types of studied days, the air temperature at $z = H/5$ follows almost similar temporal evolutions. It increases from around 05 :00, shortly after sunrise, reaches a maximum around 14 :00 and decreases from 18 :00 onwards because of reduced solar radiation. Under the effect of solar radiation, which heats up the walls and the air more during

the day, and of a clearer sky at night, which allows a more important cooling by long wavelength exchange, the sunny day shows a daily amplitude of the variation of the air temperature (approximately 18 °C over the day) much larger than for the cloudy day (approximately 8 °C over the day).

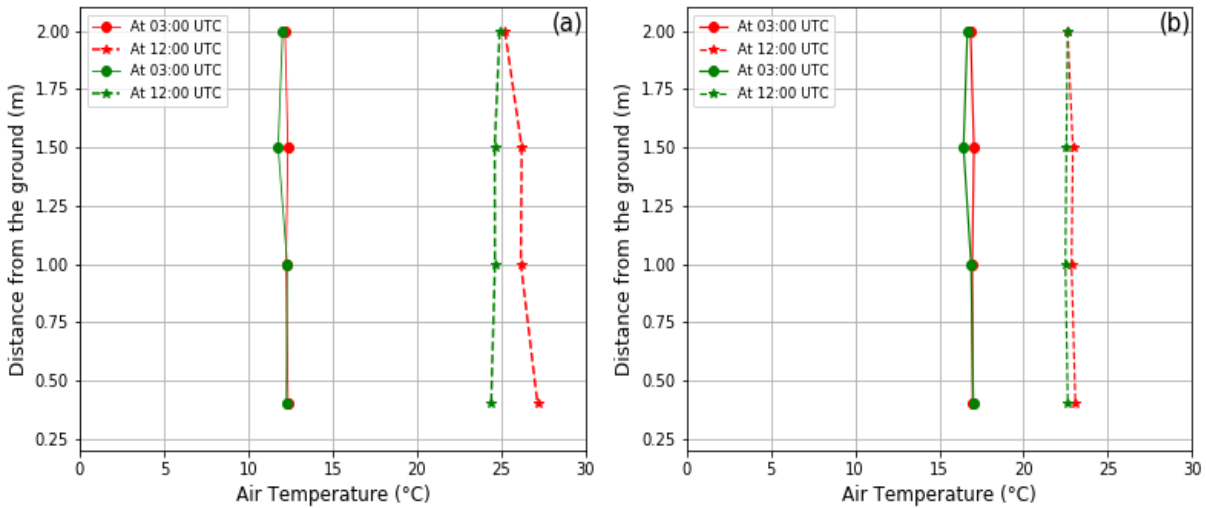


FIGURE 45 – Vertical distribution of air temperature on the central vertical axis. (a) : for the sunny day, (b) : for the cloudy day. The non-vegetated modality and vegetated modalities are represented in red and green color respectively.

In order to better visualize the impact of the street on the microclimate on the one hand, and the impact of trees on the microclimate in the street on the other hand, the temperature differences between modalities are also presented in FIGURE 47. Concerning the sunny day, at 0.4 *m* from the ground, the air temperature in the street remained higher than outside the street by up to 2.1 °C (maximum value) during the night until 06 :00 due to the release of the heat that had been stored by the street materials during the day, thus highlighting the phenomenon of urban overheating at night. In the early morning, from 06 :00 to 10 :00 UTC, the inertia of the materials in the street causes the air inside the street to heat up slower than the air outside the street, creating an island of coolness inside the street of 0.9 °C (maximum value). From 11 :00, the phenomenon of urban overheating occurred again (with a maximum overheating of 2.4 °C). But the temperature of

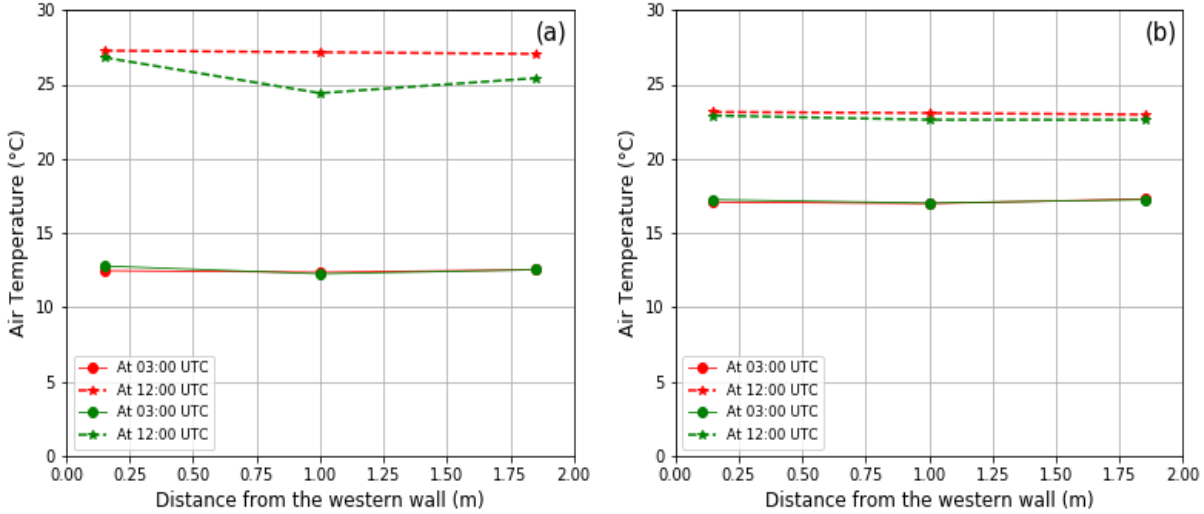


FIGURE 46 – Horizontal distribution of air temperature on the transverse horizontal axis at 0.4 m from the ground. (a) : for the sunny day, (b) : for the cloudy day. The non-vegetated modality and vegetated modalities are represented in red and green color respectively.

the outside air became slightly higher (by 0.5 °C) than that inside the street from 15 :00 to 18 :00 UTC, due to the shading produced by the west wall at 0.4 m (TABLE 16). We can see that the intensity of urban overheating gradually increases with the arrival of night before reaching a level around 2 °C, very close to the value obtained the night before. We can also observe that the trees reduced the temperature inside the street and that this reduction is greater on a sunny day than on a cloudy day, thus highlighting the trees' ability to cool the air through the phenomenon of transpiration and shading. At 0.4 m above the ground level, trees reduced the air temperature inside the street by 2.7 °C (maximum value at 12 :00 UTC) on a sunny day and by 1.2 °C (maximum value at 13 :00 UTC) on a cloudy day.

The air temperatures presented in FIGURE 47 indicate that the street creates urban overheating. Experimental data also showed that the street is cooler in the morning. The morning coolness observed in the street on sunny days is a phenomenon that is not well known in the literature but has also been observed by [Oke et al. \(2017\)](#) and in the city

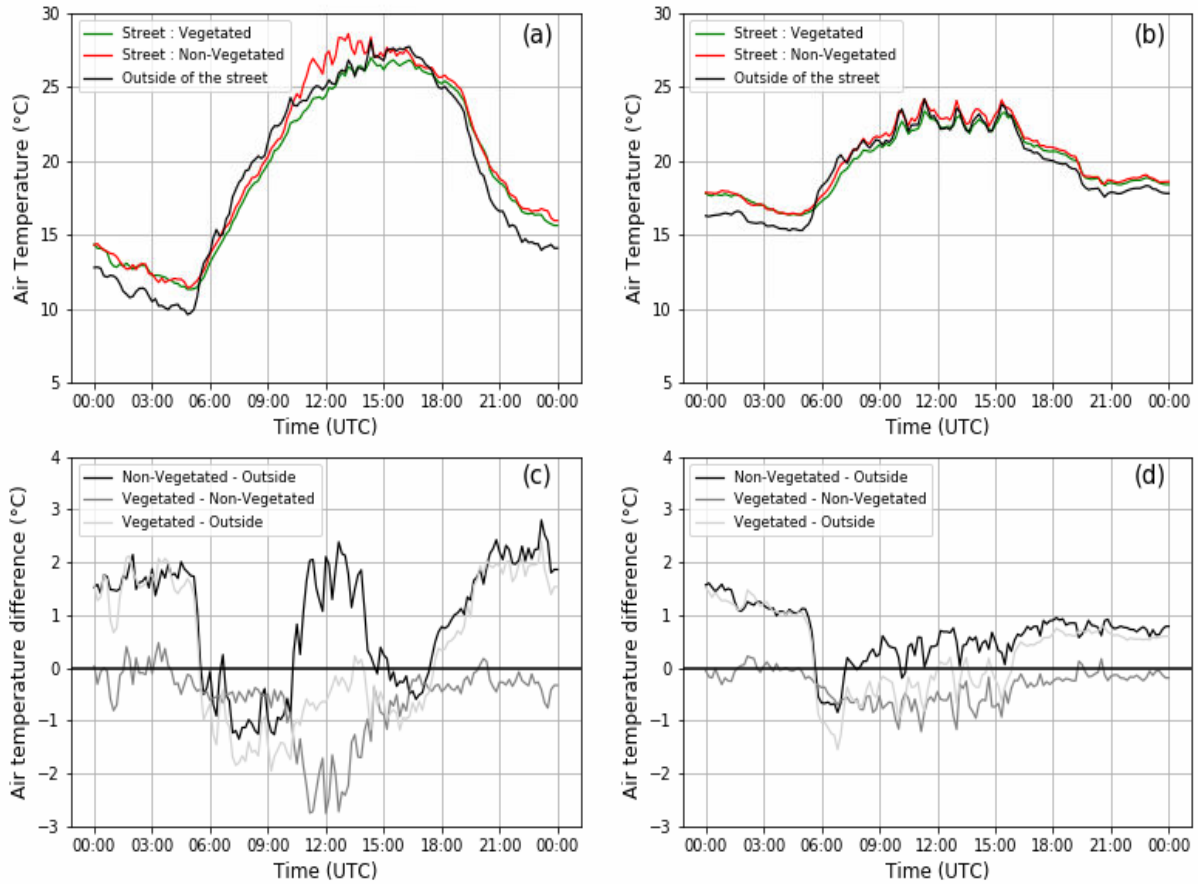


FIGURE 47 – Daily evolution of air temperatures outside and inside the street at 0.4 m from the ground and at mid-distance from the walls. (a) and (c) : for the sunny day, (b) and (d) : for the cloudy day.

of Lyon by [Lauzet \(2019\)](#). On the impact of the urban environment on the microclimate, we noted for the sunny day a maximum difference of 2.1 °C between the air temperature inside the non-vegetated street measured at 0.4 m from the ground (at $z = H/5$) and the air temperature outside the street measured at the same height. A difference of about 2.5 °C during daytime between the air temperature at the center (at $z = H/2$) of a canyon street (Scale = 1/8; Aspect Ratio = 1) and the air temperature above the street (at $z = 2H$) was measured by [Wang et al. \(2017\)](#), which is very close to our result (2.4 °C)

for the sunny day. Surprisingly, Wang et al. (2017) do not measure any significant urban overheating at night. Doya et al. (2012) observed a maximum difference of about 5 °C during daytime and a difference of about 1.5 °C during nighttime between the air temperature in the street (which they called "Control Street") and the air temperature measured above a 16 m high building. Therefore, the urban overheating obtained by Doya et al. (2012) is much higher during the day, but slightly lower during the night. This difference in day-time overheating is linked to differences in the wall temperatures, which reach up much higher values in Doya et al. (2012) (60 °C) due to a very low albedo value of the paint on the walls (0.145). Moreover, in Doya et al. (2012), the air temperature in the street is measured near a warm wall (at a height of $H/2$). Finally, regarding the strong decrease in urban over-heating observed in our street between 15 :00 and 18 :00 UTC that we explained with the shading provided by the east wall, we can question whether it would be as strong at full-scale in a real city. Indeed, our experimental facility consists in an isolated street oriented north-south, and shading from the building walls is reputed important for this orientation during summer time (Andreou, 2014). In a full city, the temperature inside a street is also influenced by the temperature in the surrounding streets, and the different street orientations can therefore in part compensate each other.

On the impact of trees on the air temperature inside the canyon street, the analysis of our experimental data clearly showed that trees help fight against overheating in the street, since they reduce the air temperature up to 2.7 °C (maximum value), thus allowing to do more than compensate for the overheating (whose maximum value was 2.1 °C during the night). The benefits of trees in terms of air temperature reduction that we observed are of the same order of magnitude as those reported in the literature. Indeed, a synthesis study carried out by Qiu et al. (2013) shows that vegetation can reduce the air temperature of the surrounding environment by 0.5 °C to 4 °C depending on the season, the vegetalization solution and the plant species. It has also been shown that, compared to a non vegetated surrounding area, vegetation can reduce air temperature by 0.4 to 6 °C according to Coutts et al. (2016), up to 2.5 °C according to Bowler et al. (2010), by 0.7 to 2.2 °C according to Gillner et al. (2015), by 1.5 to 5.6 °C according to Jamei et al. (2016) and up to 1 °C according to Shashua-Bar and Hoffman (2003).

5.1.3.8 Impact of the street and trees on air relative and absolute humidity

The daily evolution of relative humidities outside the street and inside the street (in vegetated and non-vegetated modalities) are presented in FIGURE 48 at 0.4 *m* from the ground. The vertical and horizontal distribution of relative and absolute humidities are shown in supplementary Figures 1 and 2. Again, as for air temperatures, relative humidities show globally similar evolutions at 0.4 *m* from the ground for both sunny and cloudy days. They decrease from 06 :00 UTC (just after sunrise), reach their minimum around 18 :00 UTC and then increase again with the effect of sunset. This evolution is coherent with that of air temperature (see FIGURE 47), given the fact that the saturation pressure increases with air temperature. The range of relative humidity variations is from 30 to 95% for the sunny day and from 60 to 95% for the cloudy day. It can be observed that, overall, the canyon street decreases relative humidity compared to the outside air. As for trees, it can clearly be observed that they play a role in the increase of the relative air humidity in the canyon street, but only during daytime, which is the period when transpiration occurs.

The analysis that was done on the spatial distribution of relative humidity and absolute air humidity (data not shown) with that of air temperature led to the conclusion that spatial variations in relative air humidity are mostly due to variations in absolute humidities. FIGURE 49 shows that the daily evolutions of absolute humidity outside the street and inside the street (in vegetated and non-vegetated modalities) are also similar at 0.4 *m* from the ground. Absolute humidity changes along the day from 6 to 8.5 *g* of water per cubic meter of dry air on the sunny day and from 10 to 12.5 *g* of water per cubic meter of dry air on a cloudy day. For the sunny day, the absolute humidity increases in the morning to reach a maximum at 11 :20 UTC, then decreases in the afternoon with a slight stall from around 14 :20 UTC. This temporal evolution is consistent with the expected daily evolution of reference evapotranspiration (Allen et al., 1998), and the dynamics of the measured tree transpiration (cf FIGURE 43 and FIGURE 44 in section 5.1.3.6), which explains well this evolution for the outside the street and in the treed modality of the street. It can be noticed that the non-vegetated modality of the street follows the same overall evolution, but with milder gradients across the day. This can be explained by the

mixing of ambient air between the different modalities of the street and the outside of the street, which bring some part of absolute humidity produced by transpiration into the non-vegetated modality.

During the sunny day, the absolute humidity is higher during the day by up to 0.5 g of water per cubic meter of dry air in the vegetated modality of the street and outside the street, compared to the non-vegetated modality of the street, highlighting the effect of trees (inside the street) and grass (outside the street transpiration). In all three spaces, the absolute air humidity in the vegetated modality remains almost stable during the night, but it is noticeably higher (by up to 0.3 g of water per cubic meter of dry air) inside the street than outside the street. This trend towards an urban excess of humidity at night can be surprising, but it has been in fact consistently reported by several authors (Holmer and Eliasson, 1999; Tapper, 1990) as analyzed by Pigeon et al. (2007), and could be attributed to a lower condensation at night in cities. Overall, the differences observed between the different modalities and time of the day remain small.

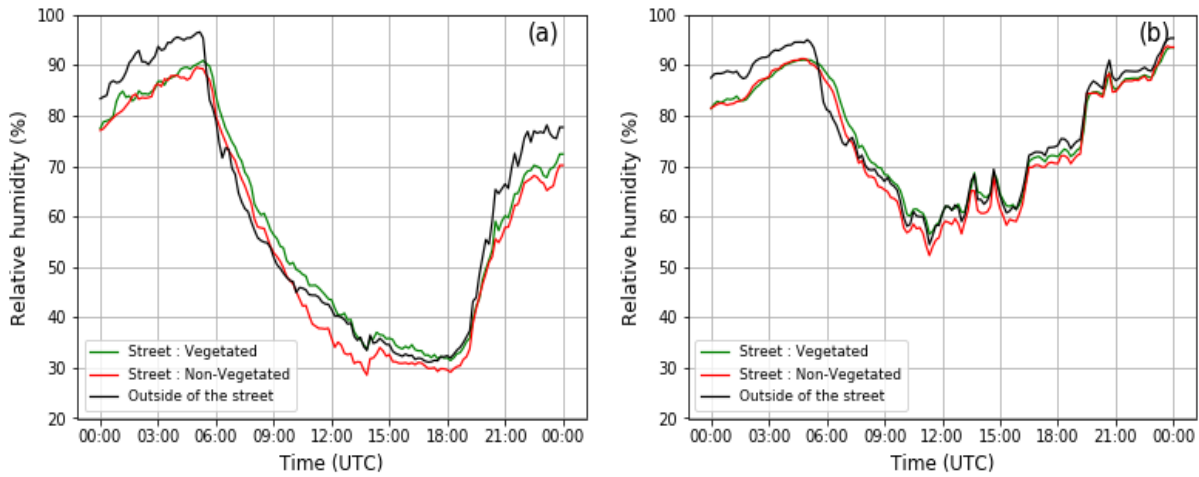


FIGURE 48 – Daily evolution of air relative humidities outside and inside of the street at 0.4 m from the ground. (a) : for the sunny day, (b) : for the cloudy day.

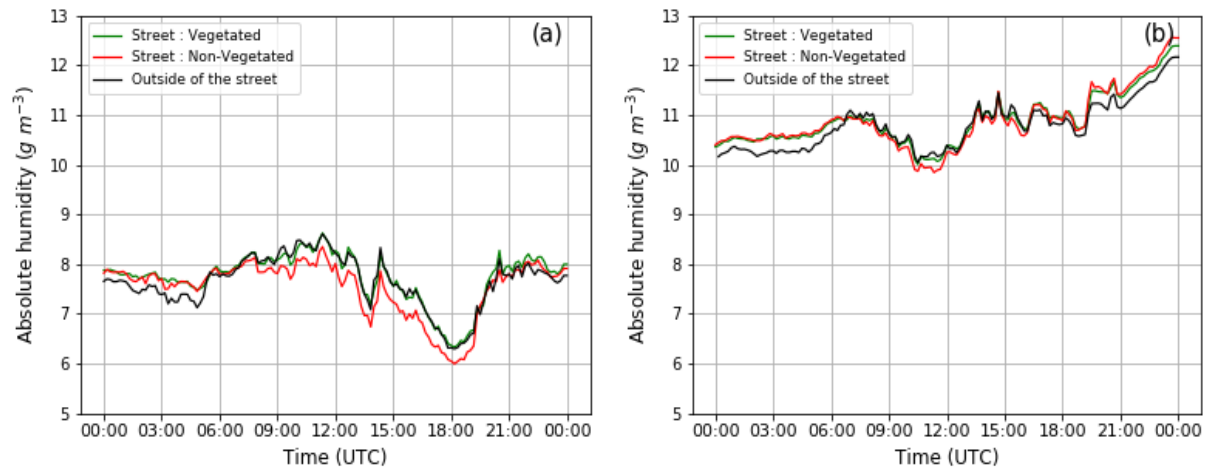


FIGURE 49 – Daily evolution of air absolute humidity outside and inside the street in the non-vegetated and vegetated modalities at 0.4 m from the ground. (a) : for the sunny day, (b) : for the cloudy day.

5.1.3.9 Impact of the street and the trees on Universal Thermal Climate Index (UTCI)

We used the Universal Thermal Climate Index to calculate the heat stress felt outside as well as inside the street in the vegetated and non-vegetated modalities. The different heat stress categories based on the UTCI may be found in [Bröde et al. \(2012\)](#). The daily changes in UTCI outside and inside the street calculated at $z = 0.4\ m$ (corresponding to human height at full-scale i.e. $\sim 2\ m$) are given in [FIGURE 50](#). During the night, the UTCI is 2.5 °C higher in the street than outside the street for the sunny day, and about 1.5 °C higher during the cloudy day. At this period of the day, there is very little difference between the vegetated and non-vegetated modality. Indeed, at night, the trees do not provide cooling through shading and transpiration. However, trees are sometimes reported to prevent longwave radiation cooling at night due to a reduced sky-view-factor. In our results, the UTCI value of the vegetated modality at night is slightly higher than in the non-vegetated modality, but the difference is very small (less than 1 °C) and may not be significant. In any case, we see that, for the two days of interest, the UTCI values at night are all comprised between 9 and 26 °C, which corresponds to the “no heat

stress” UTCI band. Solar radiation is an important factor for human thermal comfort. During the morning (until 10 :00 UTC) the shading caused by the east wall prevents heat stress inside the street while the outside of the street is in a situation of rate heat stress ($26\text{ }^{\circ}\text{C} \leq UCTI < 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) : the inside of the street is actually $8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ cooler in terms of UTCI than the outside of the street at 09 :30 UTC. From 10 :30 UTC, the position of the sun on the sunny day is such that there is no more shading in the street at human height (FIGURE 37) in the non-vegetated modality of the street. Consequently, the UTCI values increase abruptly (from $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ at 09 :30 up to $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ at 11 :00) and enter the zone corresponding to high heat stress with a peak of $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ at 14 :00 UTC. In the vegetated street modality, the UTCI values also increase with radiation but this increase is strongly attenuated as the UTCI remains below $29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ all day, keeping the street in a rate heat stress condition at mid-day. The trees therefore reduce the UTCI by up to $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ at midday (between 10 :30 and 14 :00 UTC), reducing the heat stress category from high to rate inside the vegetated street. From 14 :00 UTC, the shading caused by the west wall reduces the heat stress felt in the street (rate heat stress) while outside the street, the heat stress remains in a zone of high level until 17 :00 UTC. For the cloudy day, there is no heat stress felt inside the vegetated street, neither during the night nor during the day. Outside the street, there is no heat stress during the night, but a rate heat stress during the day. The UTCI is intermediate between that outside the street and in the vegetated street.

Concerning the impact of trees on human thermal comfort, the results shown in FIGURE 50 disclose trends similar to those reported in the literature (Błażejczyk et al., 2014; Cheung and Jim, 2018; Coutts et al., 2016; Redon et al., 2020). (Błażejczyk et al., 2014) have shown in their study that during the summer period, the UTCI in rural areas could be up to $9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ lower than the UTCI in urban areas at midnight. During daytime, they also found that in the morning and afternoon, the urban area could actually be cooler than the rural area, due to shading provided by street canyons. However, the degree of cooling in the urban area was less intense than in our study, probably due to the fact that at the city scale, streets have different orientations with different degrees of shading (while our north-south street has the shadiest orientation in summer) and the whole city has more inertia than an isolated street. Coutts et al. (2016) also estimated

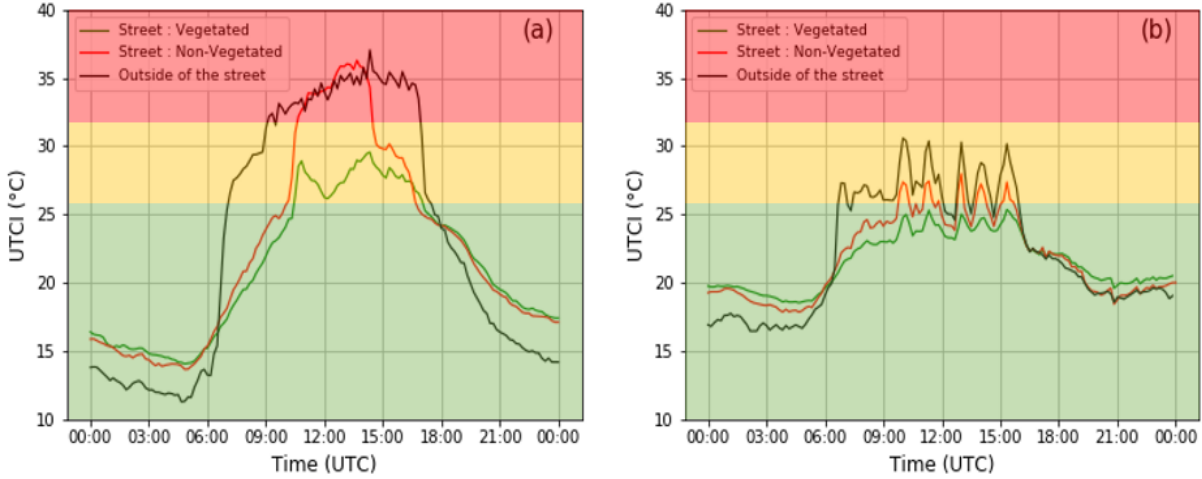


FIGURE 50 – Daily evolutions of UTCI outside of the street and inside the street at 0.4 m from the ground. (a) : for the sunny day, (b) : for the cloudy day. Red bands refer to strong heat stress ($32\text{ }^{\circ}\text{C} \leq UCTI < 38\text{ }^{\circ}\text{C}$), yellow bands refer to rate heat stress ($26\text{ }^{\circ}\text{C} \leq UCTI < 32\text{ }^{\circ}\text{C}$), green bands refer to no thermal stress ($9\text{ }^{\circ}\text{C} \leq UCTI < 26\text{ }^{\circ}\text{C}$)

the UTCI in three canyon streets in Melbourne City. The east west orientation of their streets shows some differences in temporal evolution compared with our street, especially in the morning and afternoon when shading effects from the walls are less important than in our north south orientated street. When averaging all measurement positions within each street, the maximum reduction values in UTCI by trees compared to areas free of trees, also obtained at midday, was between 2 and 3 °C, lowering heat stress from a very high level ($UCTI > 38\text{ }^{\circ}\text{C}$) to a high level ($38\text{ }^{\circ}\text{C} > UCTI > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$). For the measurement station located right under a tree crown, the reduction in UTCI could reach 7 °C, in good agreement with our results. [Coutts et al. \(2016\)](#) also found that, during heat events, trees in east west oriented canyons with average aspect ratio between 0.27 and 0.76 had a low impact on air temperature (0.9 °C at mid-morning) but a significant impact on diurnal UTCI index in summer, largely due to a reduction in the mean radiant temperature, reducing heat stress from a very high level to a high level. In their study on the comparison of the cooling effects of a tree and a concrete shelter conducted in Hong Kong (22.32° N, 114.20° E), in China, during the summer period of 2017, [Cheung and](#)

Jim (2018) have shown that the tree can reduce the heat stress index by up to 10.3 °C – this maximum cooling effect of the trees was also observed around midday, when the solar radiation was the strongest. Our observations on the daily evolutions of UTCI can also be compared to those obtained numerically with the TEB 1 by Redon et al. (2020) with similar orientation (12° angle to the north), and percentage of ground covered by trees (70%), but with a different aspect ratio (0.55) and with bare soil under the trees (whereas in our study it is sealed asphalt soil). In Redon et al. (2020), the UTCI of the treeless canyon reaches a maximum of 35 °C with a strong heat-stress sensation at midday which is similar to our results, but the strong shadowing effect of the walls in early morning and late afternoon is not visible, due to the canyon lower aspect ratio. The trees only reduce by 3 °C the UCTI, which is lower than the reduction we obtain. This may be due to the fact that the ground under the tree in the TEB study is bare soil rather than asphalt; therefore, it has a higher albedo, and hence the benefit of the trees may not be as marked.

5.1.3.10 Energy balance

An energy balance (Eq. (96)) was carried out in the non-vegetated modality of the street, over 24 hours during the selected sunny and cloudy days considering the volume (see FIGURE 37) and methods described in section 5.1.2.3. The sensible heat flux was deduced from radiation and conductive heat fluxes measurements. Results show that the dissipation of energy in the street modality occurs more through convection than through conduction (TABLE 17). Indeed, over a 24 hours period, the conductive heat flux changes sign (from positive during the day to negative during the night, see FIGURE 41), which can in part cancel out the cumulated value. Here, on a sunny day, only 16% of the energy is dissipated by conduction, the remaining amount being dissipated by convection.

The daily totals of net radiation and transpiration for the three central trees of the street vegetated modality are provided in TABLE 18. To convert tree transpiration from $L \text{ day}^{-1}$ to $MJ \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, we used the density of water, the latent heat of vaporization of water and a reference surface corresponding to the surface of the street occupied by the 3 central trees (see FIGURE 37). We estimated the reference surface of the street equal to 4.8 m^2 .

The corresponding values of the transpiration per m² are lower than those obtained in section 5.1.3.6 for which the reference area was the projected area of the crown only (1.04 m² per tree i.e. 3.12 m² for three trees). For this case, the conductive heat flux could not be calculated, as we only have fluxmeters on the vertical walls but not on the ground in this part of the street. As it can be seen, the total net radiation is larger by 34% in the vegetated modality than in the non-vegetated one due to the absorption of solar radiation by the trees and to the presumably high albedo of the white walls. Therefore, there is less absorption of solar radiation during the morning and the afternoon in the non-vegetated modality than in the vegetated modality. In a real city, the walls, after some years, become more greyish and this may not be as marked. Transpiration accounts for 22% of the net radiation for the sunny day and 32% of the net radiation for the cloudy day. In the vegetated modality, the energy dissipated by transpiration does not fully compensate the increase in net radiation. However, the excess of the energy is absorbed by the trees at crown height. The lower part of the street, at human height, benefits from the shading of the trees with a large improvement of UTCI at midday (see FIGURE 50).

	Net radiation ($MJ m^{-2} day^{-1}$)	Conductive heat flux ($MJ m^{-2} day^{-1}$)	Sensible heat flux ($MJ m^{-2} day^{-1}$)
Sunny day	10.19	1.63	8.55
Cloudy day	3.69	-2.27	5.95

TABLE 17 – Accumulation of the different terms of the energy balance (computed over the whole day) on the non-vegetated modality of the canyon street.

	Net radiation ($MJ m^{-2} day^{-1}$)	Transpiration ($MJ m^{-2} day^{-1}$)	Ratio (%)
Sunny day	13.72	3.02	22
Cloudy day	4.97	1.59	32

TABLE 18 – Accumulation of the net radiation (computed over the whole day) and of the transpiration of the three central trees in the vegetated modality of the canyon street.

5.1.4 Discussion

The present study is probably among the first to use alignment trees as a vegetation solution in a canyon street in a reduced-scale outdoor environment, hence the difficulty of being able to compare our results with those of the literature. The trends we observed on the climatic variables and impact of the vegetation are however in agreement with those identified in the synthesis of studies on the cooling effects of vegetation on the urban heat island published by [Qiu et al. \(2013\)](#). Their paper points out that the climatic benefits that trees can provide depend on several factors such as the scale of the study, the aspect ratio, the orientation of the street, the type of vegetation used, the rate of vegetation cover and the local climatic conditions. In the following, we will first discuss the possible influence of our experimental configuration (isolated reduced-scale street, North-South orientation, absence of human activity) on the street microclimate. Then, we will analyze and discuss the trees climatic benefits, with special emphasis on the partitioning between shading and transpiration.

5.1.4.1 Impact of the canyon street scale reduction on the energy balance

Our canyon street is an isolated canyon street, at reduced-scale (1/5), north-south oriented with white painting on the walls and an aspect ratio of 1. We will first discuss the impact of the street geometrical reduction factor on the energy balance of the street, given in Eq. (96). Provided the urban materials are the same (in terms of surface optical factor, thermal conductivity, and material thickness), and the geometrical aspect ratio of the street is conserved, then the radiation and conductive fluxes are conserved and are not directly impacted by the scale reduction.

Regarding the sensible heat flux (convective heat transfer), it can be affected by the wind speed, the temperature gradient between the surfaces and the air, and the type of convection regime (through different formulae of the convection coefficients). We have shown earlier in the results that the surface temperatures were correctly represented (given our configuration, with a north-south orientation and a light painting on the walls). As far as the wind speed is concerned, our site is quite sheltered from the wind, but so are urban spaces. Reynolds number independence is achieved thanks to the characteristic dimension

of the street which remains large ($H = 2 \text{ m}$) and ensures a flow in the fully turbulent regime. Indeed, with a wind velocity of $U = 1 \text{ m s}^{-1}$, this yields a Reynolds number of $Re = UH/\nu \sim 130000$, (with ν the kinematic viscosity of air) which is largely above the critical number $Re_c = 11000$ for atmospheric flows around sharp-edged obstacle bodies (Snyder, 1972).

The main discussion here lies on the type of convection regime. The non-dimensional number of interest here is the Richardson number (Eq. (89) in section 5.1.2.3), which gives the relative importance of inertial forces and buoyancy forces (due to air temperature gradient) on the flow field. Eq. (89) shows that, for the same free stream velocity and wall and free stream temperatures, the importance of the buoyancy forces will be reduced by the same factor as the geometrical scale reduction factor on the building height which here is equal to 5. Hence it can be expected that on the reduced-scale 1, the thermal effects on the flow field will be reduced by 5 compared to the inertial forces. Natural convection regimes are therefore difficult to reproduce, and our facility is better suited for the investigation of flows in the forced or mixed convection regimes. Indeed, we saw here that during the investigated sunny day, the Richardson number reached a value of -4 for our experiment (FIGURE 38) corresponding to a mixed convection regime. In comparison, Louka et al. (2002) obtained a Richardson number of the order of -10 (in the natural convection regime) on a sunny summer day in their full-scale study in Nantes (computed here from their results of air and surface temperature, wall height and wind speed); in their reduced-scale study, Idczak et al. (2007) obtained a Richardson number of -0.9, at the beginning of the mixed convection regime (with weaker thermal effect than us, possibly owing to a higher wind speed). Hence the sensible heat flux can be affected by the above-mentioned considerations on the flow field and Richardson number, but this impact is expected to be small provided the wall temperatures are the same and the flow remains in the same type of convection regime (where the same convection coefficient formula applies). This assumption is made (explicitly or not) by most authors working on reduced-scale ls (Chen et al., 2020; Djedjig et al., 2015a).

Finally, regarding the latent heat flux density, corresponding to the tree transpiration, it depends on the tree species, the LAI, the street area covered by the trees, the water

availability in the ground and the climatic conditions. We show below (section 5.1.4.3) that the tree LAI in our facility is representative of other urban studies at full-scale. Therefore, the latent heat flux density can be expected to be comparable to a full-scale situation in well-watered conditions, with same LAI and tree coverage area.

The benefit of working on a scale-1 in outdoor environment is to mimic a canonical urban environment at a lower experimental cost, while benefiting from realistic climatic conditions (including radiation and wind). It also makes it possible to use a more extensive and dense instrumentation than in real cities.

5.1.4.2 Impact of the canyon street configuration and its environment on urban overheating

We will discuss here the impact of our experimental configuration on urban overheating, in relation with factors other than scale reduction (that we just discussed above). Compared to the outside of the street, we measured a maximum urban overheating of 2.8 °C at night and of 2.4 °C during daytime. The north south orientation of our canyon street is the one for which the shading effects of the building walls are more important during the summer period (Andreou, 2014). In addition, our walls are quite reflective (white painting). Altogether, this is likely to induce rate wall surface temperatures and hence air temperatures increase in the canyon during daytime, compared to other configurations (Doya et al., 2012; Najjar et al., 2005). At nighttime, one may question whether an isolated street may cool down more quickly than an ensemble of several neighboring streets, resulting in a lower urban overheating at night. But the comparison with the results from of the facilities of Wang et al. (2017) and Doya et al. (2012) consisting of several adjacent reduced-scale canyons, does not show any effect of the number of canyons and in fact our urban overheating at night was actually larger than theirs (see section 5.1.3.7).

Regarding the fact that our street is not in a real dense city center, it may surely affect the intensity of measured urban overheating. First of all, inside a real city, the air temperature in a street is impacted by the air temperatures in the surrounding streets, which may have different orientations leading to different sun exposure and sheltering

effect from the wind. Therefore, it is expected that the impact of the street orientation inside a full city would not be as strong as in an isolated street such as ours. In addition, over consecutive days of heat waves, the whole city having more inertia than an isolated street, the heat may accumulate more over the days. Therefore, our difference in air temperature between the inside and the outside of the canyon cannot directly be compared with the maximum urban heat island effect in real city. The air temperature difference we measured at the scale of the street corresponds to urban overheating, as defined by ADEME (French Ecological Transition Agency), while Urban Heat Island (UHI) refers to the larger city scale.

Another difference that may arise between our street configuration (as in other mock-up streets) and a real city is of course linked to the human activity and the associated anthropogenic heat, caused by industrial activity, road traffic or heat release by the buildings (due to heating or air conditioning). The amplitude of anthropogenic heat can be impacted by the population density, the climate (in connection with heating/air-conditioning demand), the building insulation, and the degree of use of air conditioning (Pigeon et al., 2007; Sailor and Lu, 2004). It has been measured on a city scale by Pigeon et al. (2007) in Toulouse, France. Toulouse is a medium size city in the south west of France with a larger population than Angers, a comparable climate (both cities have temperate climate without dry season, classified as Cf according to the Köppen-Geiger classification, but Toulouse has a 2.5 °C warmer summer) and limited domestic use of air-conditioning in summer, like the majority of French or to a larger extent of European cities. Pigeon et al. (2007) established that the anthropogenic heat flux in Toulouse was variable over the year but that it was lower in summer (of the order of 30 W m^{-2}) because the heating demand is less important during this period. In Angers, with a lower population and slightly cooler summer, the anthropogenic heat flux is expected to be even less. Besides, 30 W m^{-2} represents less than 5% of the net radiation that we measured on our street (which is of the order of 650 W m^{-2} at 12 :00 UTC). We can therefore assume that not reproducing the anthropogenic heat flux in our street did not significantly affect the results. Of course, for cities where the energetic demand is higher in summer due to a warmer climate in conjunction with a broader use of air-conditioning (or conversely in winter due to heating), neglecting the anthropogenic heat flux could be more problematic.

5.1.4.3 Climatic benefits of the trees

In our Canyon street, the ground has a vegetation cover ratio of 60% in the vegetated modality, and the trees have a LAI of $2.49 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ and a LAD of $2.26 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$. It has been identified in TABLE 13 that the street vegetation cover ratio varies from one study to another from 30 to 90%. In the study from Gebert et al. (2019), the LAI of the different trees were comprised between 1.13 and $2.36 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, whereas in their meta-analysis on trees in urban situations Rahman et al. (2020) report average LAI of $3.19 \pm 1.13 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ on the basis of 49 studies devoted to cooling by shading and $4.08 \pm 1.47 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ on the basis of 23 studies devoted to cooling by transpiration. Gillner et al. (2015) got a LAD comprised between 0.9 and $2.56 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ in their study. The trees in our street thus have tree cover ratio, LAI and LAD within the range of the literature.

We have shown that in our north-south oriented canyon, the strongest impact of the central row of trees on thermal comfort occurs at midday, from 10 :30 to 14 :00 UTC, with a reduction up to $8 \text{ }^\circ\text{C}$ in UTCI. This is in good agreement with the results of Błażejczyk et al. (2014) and Coutts et al. (2016). Earlier in the morning and later in the afternoon, the orientation and aspect ratio of the street are such that the walls provide enough shading to stay in the no-heat stress comfort zone. The central row of trees, although not so commonly found in cities is therefore very adequate for north-south oriented street. At night, we found no benefit of the trees on thermal comfort.

The extensive instrumentation has allowed to quantify, from the energetics point of view, the total benefits of the trees, and the relative part of transpiration and shading in the improvement of thermal comfort. Taking as a reference area the projected area of the tree crown, the trees allow to reduce global radiation during the sunny day by $13.34 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ at $z = H/5$ (human height) through shading, while their transpiration dissipates $4.66 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, out of an incident global radiation of $25.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ at $z = H$. The walls also participate in reducing by $8.18 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ incident global radiation at the center of the street, through shading in the morning and in the afternoon. In total, between $z = H$ and $z = H/5$ under their crown, the trees therefore reduce by 53% the incoming energy flux density. Shading

represents 74% of the benefit and transpiration 26% of the benefit. Shading is therefore almost 3 times more important than transpiration from the energetics point of view. For human thermal comfort, the impact of shading may be even more important, since heat dissipation through transpiration occurs at crown height, rather than at human height. It must also be reminded that our trees are well-watered. Therefore, under water restriction, as it frequently occurs during the summer, the benefit of tree transpiration may be less important. However, it should be reminded that tree transpiration also contributes to keep the leaves surface cool, thus preventing an excess of heat due to long-wave radiation. As a matter of fact, a study by [Kántor et al. \(2017\)](#) has shown that trees were more effective than sun sails in improving thermal comfort.

5.1.5 Conclusion

This work consisted in comparing the climate inside and outside a small-scale canyon street on the one hand and assessing the impact of well-watered trees on the microclimate inside the canyon street on the other hand. The results were analyzed during a sunny and a cloudy day in the summer season. Almost all the variables on which the microclimate depends as well as their spatial distributions were recorded. An originality of this study is to provide in a unique study an overview of many variables and phenomena that are often split over several studies. This makes it easier to assess their relative magnitude and will thus contribute to progress in the understanding of the urban climate as influenced by the street structure and the vegetation. In summary, the experimental results showed that, at human height ($z = H/5$), in the non-vegetated modality, the street and its buildings :

- intercepted 32% of the solar incident energy on the street during the sunny day and 28% of the solar incident energy on the cloudy day, thanks to the shading effects of the walls.
- were responsible for an urban overheating on air temperature of 2.8 °C during the night and 2.4 °C during daytime (maximum values for the sunny day), compared to the outside environment.
- generated a morning cooling of 1.2 °C on air temperature (maximum value for the sunny day) compared to outside environment, due to the shading from the east wall and to the thermal inertia of the urban materials.

- reduced the UTCI by up to 8 °C (maximum value for the sunny day) in the early morning and late afternoon thanks to the shading of the walls.

As for the trees, we observed that they :

- intercepted through their crown 53% of the incident solar energy on the street during the sunny day and 55% on the cloudy day.
- increased the total net radiation (measured at $z = H$) over a 24 hours period by 34% (in relation with the above-mentioned interception), and dissipated about 22% of the total net radiation through to their transpiration during the sunny day.
- diminished the air temperature at $z = H/5$ from the ground (equivalent to 2 m at full-scale, that is at human height) at mid-day by up to 2.7 °C during the sunny day, and by up to 1.2 °C during the cloudy day, thus cancelling out the urban overheating in the street.
- reduced the conductive heat flux on western wall by 99 W m^{-2} and by 76 W m^{-2} on the eastern wall for the sunny day.
- reduced by about 18 °C the peak of ground temperature and by about 7 °C the peak of temperatures of the eastern and western walls thanks to shading for the sunny day.
- reduced the UTCI by up to 8.0 °C (at 13 :00 UTC) in the street during the day, thus reducing the heat stress from strong to rate for the sunny day.

In spite of sometimes different areas of study or vegetalization solutions, the effects of the street and trees on the microclimate observed during the two studied days are globally of the same order of magnitude as those observed in the literature. It suggests that our reduced-scale 1 is able to correctly reproduce the main physical and ecophysiological processes occurring inside a street.

Regarding recommendations to urban planners, this study shows that a central row of trees, although not so commonly found in cities, is especially well adapted for North-South oriented streets with an aspect ratio of 1, which can be considered as intermediate between deep and shallow canyons. Indeed, the daily temporal evolution of UTCI values shows that, in this configuration, the street benefits from shading through the whole day :

in the morning and afternoon, thanks to the building walls, and at mid-day (when the solar radiation reaches its maximum), thanks to the street trees.

Finally, in this work, we took care to maintain and check the well-watered status of the trees through the measurement of soil water potential, whereas this status is usually unknown or not reported in urban studies. In this sense, the above-mentioned climatic benefits of the urban trees should be understood as an upper limit (for our configuration), and trees in water-restriction (as it can frequently happen in summer) could provide lower benefits due to a reduced transpiration and, on the long run, a weaker development that could reduce total leaf surface area and hence shading effects. In this prospect, this work will be followed by a study of the impact of water restriction on the climatic services provided by trees within a canyon street. The use of these experimental results for the implementation of a CFD (computational Fluid Dynamics) numerical model is planned in a future publication. CFD is a numerical technique making it possible to assess the distributed climate inside the street, by solving the conservation equations for mass, momentum, and energy. Specific models may be also activated to solve the radiative transfers and to simulate the interactions of the trees with local climate conditions (light interception, transpiration). Once validated using experimental data, the CFD numerical model can then be used to study the influence of various parameters such as the physical properties of the materials (thermal conductivity, specific heat ...), the surface radiative properties (albedo), or the properties of the vegetation cover (leaf area, LAI ...) on the urban overheating and climatic benefits of the trees, so as to help in the decision making of urban planners. The CFD model can also be used to test a range of climatic boundary conditions such as the incident wind speed, the incident radiation (short and long wavelength), the outdoor relative humidity and the air temperature, which could be of interest in the context of climate change.

Acknowledgments

We would like to thank Dominique Lemesle (EPHor, Institut Agro) who implemented the street sensors and Patrice Cannavo (EPHor, Institut Agro) who provided his expertise on soil data analysis, Agathe Boukouya, Lydie Ledroit and Bénédicte Dubuc (IRHS,

Univ Angers, Institut Agro, INRAE) who performed tree measurements. Our thanks also go to the staff of the Phenotic platform for their help in this project. We finally thank our tree supplier, the nurseryman Jacques Briant. This work took place within the framework of a thesis financed by Region Pays de la Loire and ADEME (French Ecological Transition Agency). It also benefited from the financial support of the regional program "Objectif Végétal, Recherche, Formation, et Innovation en Pays de la Loire", supported by the Pays de la Loire Region, Angers Loire Métropole and the European Regional Development Fund.

5.2 Impact d'arbres en confort hydrique sur le microclimat dans une rue canyon arborée à échelle réduite : données obtenues sur des périodes de plusieurs jours ensoleillés pendant la campagne 2020

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous nous proposons d'analyser des données obtenues sur plusieurs journées ensoleillées issues de la campagne de mesures de 2020. Les objectifs de cette analyse sont doubles. Le premier est d'évaluer la variabilité et la robustesse des résultats obtenus sur la journée individuelle ensoleillée du 29 juillet étudiée dans la section 5.1, en la comparant à la moyenne de l'ensemble des journées ensoleillées étudiées. Le deuxième objectif est d'analyser, pour l'ensemble des journées ensoleillées étudiées, les écarts de températures d'air entre les différentes zones d'intérêt (extérieur de la rue, intérieur de la rue dans la modalité non-végétalisée, intérieur de la rue dans la modalité végétalisée) pour voir s'ils sont suffisamment forts et reproductibles pour être statistiquement significatifs.

5.2.1 Choix des journées étudiées

Nous avons choisi les journées ensoleillées du mois de juillet 2020 (TABLE 19, et **An-nexe I**) pour l'analyse des données moyennées sur plusieurs jours. Le mois de juillet 2020 correspond en effet à la période pendant laquelle les données acquises sont les plus complètes. Ce choix permet aussi, comme on peut le voir sur la FIGURE 51, d'avoir des durées de jour et des inclinaisons solaires comparables. Les roses des vents des 12 journées ensoleillées étudiées sont présentées sur la FIGURE 52. Elles montrent que les journées du 13, 17 et 19 juillet 2020 sont majoritairement des journées à vents faibles (moyennes journalières de la vitesse du vent inférieures ou égales à 1 m.s^{-1}) arrivant perpendiculairement ou de façon oblique à la rue, et donc favorables au phénomène de surchauffe urbaine. Il ressort également des roses des vents que les journées du 11, 12, 20, 21 et 22 juillet 2020, contrairement à celles identifiées précédemment, sont majoritairement des journées à vents forts (moyennes journalières de la vitesse du vent supérieures à 2 m.s^{-1}) arrivant parallèlement à l'axe de la rue, et sont donc moins favorables au phénomène de surchauffe urbaine car l'air dans la rue est davantage renouvelé. La journée du 29 juillet 2020 se situe plus dans la catégorie des journée par vents faibles, mais avec avec un vent incident oblique à l'axe de la rue.

Journées	Ratio d'ensoleillement	Type de journée
09 Juillet 2020	0.656	Journée ensoleillée
11 Juillet 2020	0.686	Journée ensoleillée
12 Juillet 2020	0.681	Journée ensoleillée
13 Juillet 2020	0.654	Journée ensoleillée
17 Juillet 2020	0.656	Journée ensoleillée
19 Juillet 2020	0.651	Journée ensoleillée
20 Juillet 2020	0.652	Journée ensoleillée
21 Juillet 2020	0.655	Journée ensoleillée
22 Juillet 2020	0.669	Journée ensoleillée
28 Juillet 2020	0.719	Journée ensoleillée
29 Juillet 2020	0.655	Journée ensoleillée
30 Juillet 2020	0.655	Journée ensoleillée

TABLE 19 – Journées ensoleillées sélectionnées.

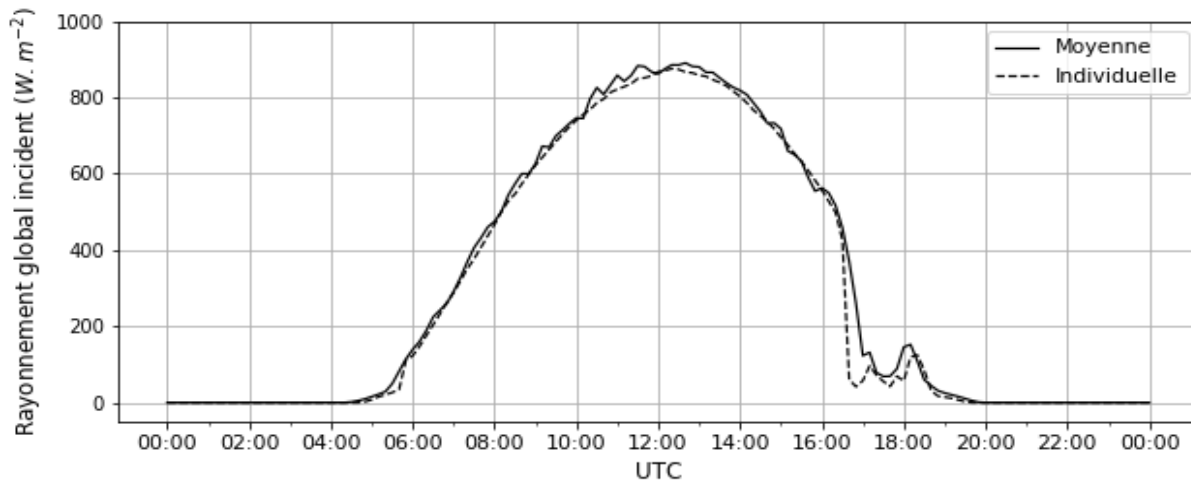


FIGURE 51 – Évolutions journalières du rayonnement solaire incident pour la journée individuelle du 29 juillet 2020 et pour la journée moyenne des 12 journées ensoleillées.

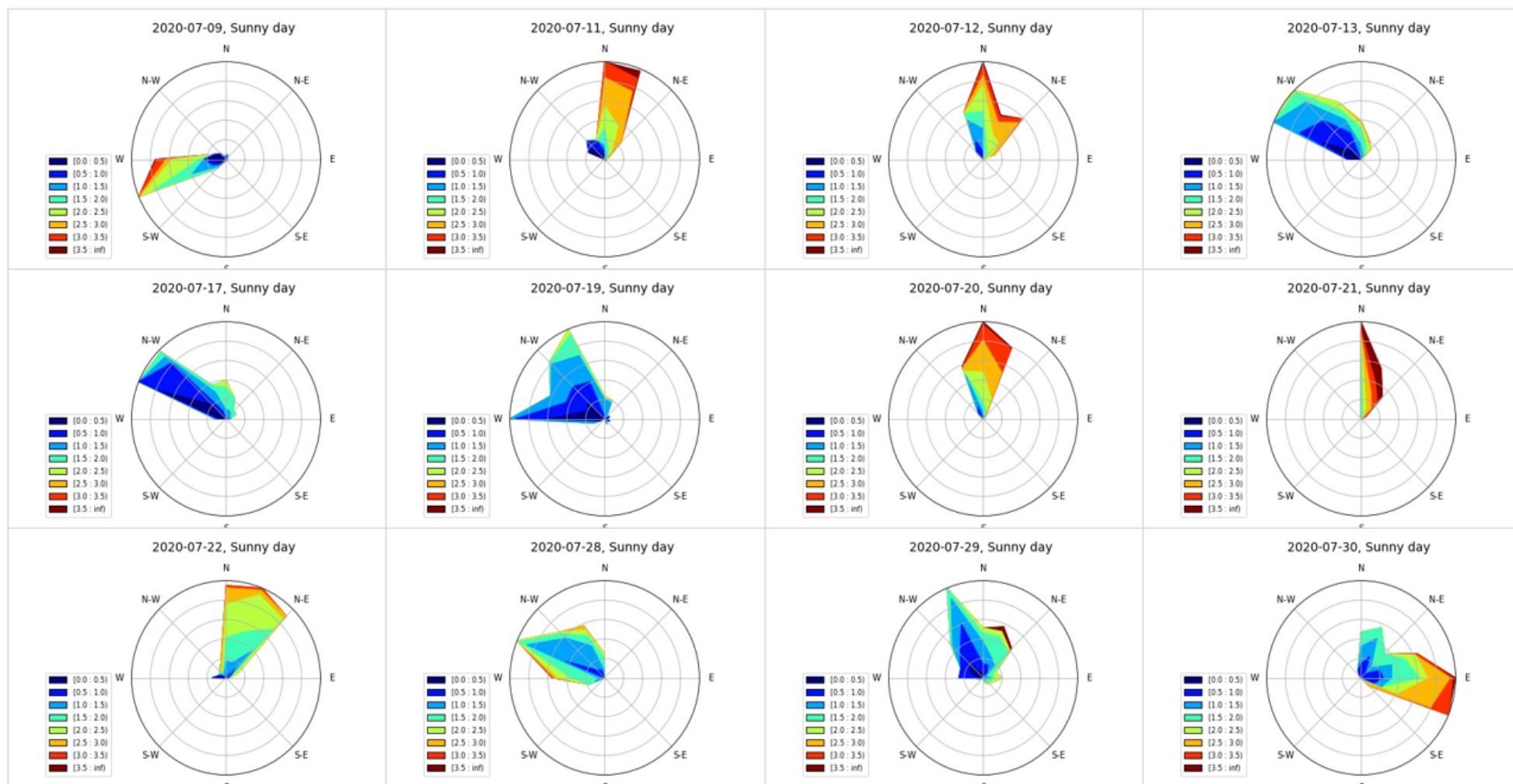


FIGURE 52 – Roses des vents pour les 12 journées ensoleillées du mois de juillet 2020. Les données des roses des vents sont issues du capteur de vent installé sur le mât Ouest à 10 m du sol. La journée ensoleillée du 07 juillet 2020 a été exclue de la liste des journées ensoleillées analysées car de nombreuses données étaient manquantes pour cette journée là.

5.2.2 Analyse des résultats

Pour l'approche moyennée, nous choisissons de porter principalement nos analyses sur les températures d'air mesurées (à 40 cm du sol) à l'extérieur de la rue (EXT), à l'intérieur de la rue dans la modalité non-végétalisée (MNV) et dans la modalité végétalisée (MV). Les résultats pour d'autres variables sont données dans l'**Annexe J**. Pour mieux conduire nos analyses, nous nous proposons de calculer le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'écart de biais moyen (EBM) entre les valeurs pour la journée individuelle ensoleillée du 29 juillet 2020 et les valeurs pour la moyenne des 12 journées ensoleillées. Les formules utilisées pour calculer l'EBM et le RMSE sont respectivement :

$$EBM = \frac{\sum (y_{ind} - y_{moy})}{m} \quad (97)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_{ind} - y_{moy})^2}{m}} \quad (98)$$

y_{ind} est la valeur mesurée pour la journée individuelle ensoleillée du 29 juillet 2020, y_{moy} est la valeur moyenne calculée pour les 12 journées ensoleillées, m est le nombre de valeurs utilisées.

Les évolutions journalières des températures d'air pour la journée ensoleillée individuelle du 29 juillet 2020 et pour la journée ensoleillée moyenne (sur les 12 journées ensoleillées) sont présentées sur la FIGURE 53. Pour des raisons de lisibilité, nous avons choisi de ne pas représenter les barres d'erreur sur les différentes. Le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) des températures d'air entre la journée individuelle et la journée moyenne sont donnés dans la TABLE 20. Comme nous pouvons clairement le voir sur les graphes présentés sur la FIGURE 53, les valeurs élevées du coefficient de détermination (0.99 pour l'extérieur de la rue, 1.00 pour la modalité non-végétalisée, et 1.00 pour la modalité végétalisée) confirment que la dynamique temporelle de l'ensemble des journées ensoleillées est bien en accord avec la dynamique observée pour la journée individuelle. Comme cela est également visible sur les différents graphes, les valeurs de l'erreur quadratique moyenne confirment que les valeurs numériques des températures d'air dans les différents endroits de mesure sont légèrement plus faibles (de l'ordre de 1.5

°C pour l'extérieur de la rue, de l'ordre de 1.5 °C pour la modalité non-végétalisée, de l'ordre de 1.4 °C pour la modalité végétalisée) pour la journée individuelle. Les écarts des températures d'air observés entre la journée moyenne et la journée individuelle peuvent s'expliquer par deux raisons. D'abord, parce que, comme on peut le voir sur les roses des vents présentées sur la FIGURE 52, le vent arrivait majoritairement Nord Nord-Ouest pendant la journée du 29 juillet 2020 (donc dans une direction oblique par rapport à l'axe de la rue); ce qui permet de réduire les températures d'air mesurées à l'intérieur de la rue. La deuxième raison des écarts de températures d'air entre la journée moyenne et la journée individuelle liée à la succession des journées car la journée du 29 juillet 2020 n'était précédée que d'une seule journée ensoleillée (et que la précédente journée ensoleillée remontait au 22 juillet 2020), alors que avant le 22 juillet 2020, il y avait une succession de plusieurs journées ensoleillées qui a permis un réchauffement.

Sur les écarts de températures d'air entre les différentes zones d'intérêt (extérieur de la rue, modalité non-végétalisée de la rue, modalité végétalisée de la rue), les indicateurs statistiques (R^2 et RMSE) présentés dans la TABLE 21 permettent de confirmer quantitativement ce qui est qualitativement observé sur les graphes (FIGURE 54). En effet, malgré quelques oscillations observées pour la journée individuelle, la FIGURE 54 montre que les dynamiques temporelles des écarts de températures d'air entre les différentes zones d'intérêt observées pour l'ensemble des journées ensoleillées sont similaires entre la journée individuelle ensoleillée du 29 juillet 2020 et la moyenne des journées ensoleillées. En revanche, malgré des dynamiques temporelles semblables, les valeurs de l'EBM et du RMSE indiquent (et c'est également visible sur les graphes) que les écarts de températures d'air entre les différentes zones d'intérêt sont légèrement surestimés (de l'ordre de 0.4 °C pour l'écart entre la modalité non-végétalisée et l'extérieur de la rue, de l'ordre de 0.3 °C pour l'écart entre la modalité végétalisée et la modalité non-végétalisée) pendant la journée individuelle.

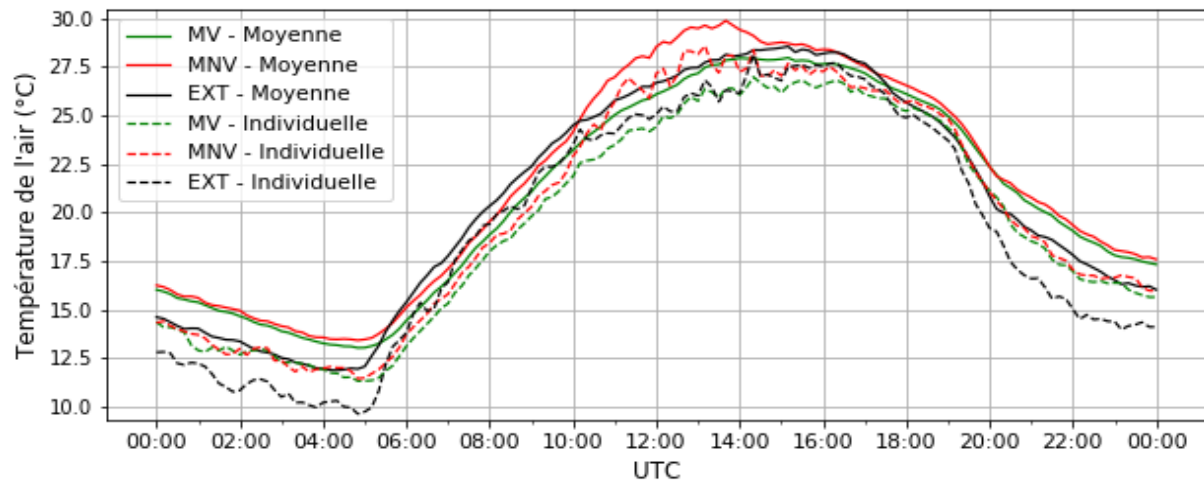


FIGURE 53 – Évolutions journalières des températures d’air mesurées à l’extérieur de la rue (EXT), à l’intérieur de la rue dans la modalité non-végétalisée (MNV), et à l’intérieur de la rue dans la modalité végétalisée (MV) pour la journée individuelle du 29 juillet 2020 (Individuelle) et pour la journée moyenne des 12 journées ensoleillées (Moyenne). Les mesures sont prises à 40 cm su sol.

	EXT	MNV	MV
R^2	0.99	1.00	1.00
EBM (°C)	-1.52	-1.52	-1.41
RMSE (°C)	1.66	1.57	1.46

TABLE 20 – Indicateurs statistiques sur les températures d’air entre la journée individuelle et la moyenne des journées ensoleillées.

	Écart (MNV - EXT)	Écart (MV - MNV)
R^2	0.90	0.88
EBM (°C)	0.01	0.10
RMSE (°C)	0.41	0.26

TABLE 21 – Indicateurs statistiques sur les écarts de températures d’air.

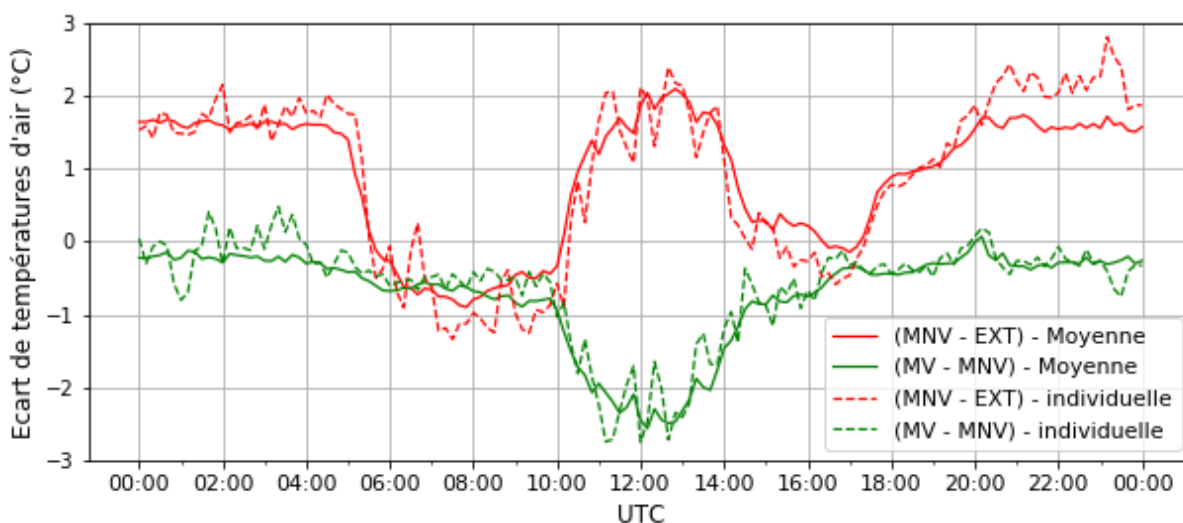


FIGURE 54 – Évolutions journalières des écarts de températures d'air entre la modalité non-végétalisée et l'extérieur de la rue (MNV - EXT) d'une part, et entre la modalité végétalisée et la modalité non-végétalisée (MV - MNV) d'autre part, pour la journée individuelle du 29 juillet 2020 (Individuelle) et pour la journée moyenne des 12 journées ensoleillées (Moyenne). Les mesures sont prises à 40 cm su sol.

5.3 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons analysé les principales variables qui interviennent dans la création du microclimat. Sur base d'une journée individuelle ensoleillée, il a été constaté que la rue canyon :

- crée une surchauffe urbaine de 2.8 °C (valeur maximale) pendant la nuit ;
- crée un rafraîchissement matinal de 1.2 °C (valeur maximale) ;
- permet de réduire le niveau de stress thermique en début de matinée et en fin d'après-midi,

et que la végétation permet :

- d'annuler la surchauffe urbaine et de refroidir l'air dans la rue ;
- de réduire d'environ 18 °C les pics de températures de sol ;
- de réduire d'environ 7 °C les pics de températures des murs Est et Ouest ;

- de réduire l'UTCI de 8 °C et fait donc passer le niveau stress thermique dans la rue du domaine fort au domaine modéré.

Concernant l'impact de l'échelle réduite de la rue, la conservation du rapport d'aspect de la rue, des propriétés thermiques et optiques et des épaisseurs des murs entraînent une conservation des transferts radiatifs et des flux conductifs. Le nombre de Richardson n'étant cependant pas conservé, les effets de tirage thermique sont donc réduits par rapport aux effets d'inertie sur notre maquette par rapport à l'échelle réelle. En revanche, nous faisons l'hypothèse que le flux de chaleur sensible sera peu impacté si le régime de convection reste de même nature (convection mixte ou forcée) puisque les températures de parois sont conservées. La convection naturelle sera en revanche moins bien représentée par notre dispositif. Le bilan énergétique dans notre rue étant quasiment le même que celui qui serait obtenu à l'échelle 1 en raison de la conservation des flux, les résultats obtenus à notre échelle sont transposables à l'échelle 1.

L'analyse des résultats obtenus pour un ensemble de journées ensoleillées avec plusieurs directions de vents montre que la journée individuelle ensoleillée étudiée dans la première partie de ce chapitre est représentative de l'ensemble des journées ensoleillées étudiées dans la deuxième partie de ce chapitre. Cette analyse conforte également le choix d'une modélisation numérique 2D comme nous le verrons dans le prochain chapitre.

Chapitre 6

Simulations numériques

6.1 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Un problème de mécanique des fluides peut être résolu selon trois approches : une approche analytique, une approche expérimentale et une approche numérique. La première permet d'obtenir une solution exacte du problème étudié, mais ne peut être réalisée que pour des problèmes dont la configuration est très simple et avec beaucoup d'hypothèses simplificatrices sur la physique du problème étudié. La deuxième approche est sans doute celle qui permet de mieux représenter la réalité physique, mais elle peut s'avérer complexe à mettre en œuvre et peut rapidement devenir très onéreuse. L'approche numérique peut être moins coûteuse que l'approche expérimentale correspondante. Elle est cependant limitée par la précision des méthodes numériques utilisées et la puissance des ordinateurs. La mécanique des fluides numérique (MFN), plus souvent désignée sous son vocable anglo-saxon Computational Fluid Dynamics (CFD), est un outil de simulation faisant appel à des techniques informatiques et mathématiques avancées pour modéliser des écoulements de fluides afin de prédire les transferts de chaleur, de masse et de quantité de mouvement (Xia and Sun, 2002). Par rapport à la théorie et à l'expérimentation, la CFD permet une compréhension plus détaillée et plus approfondie de l'écoulement, des transferts de masse et des transferts de chaleur. Elle permet aussi de tester différents scénarios, et, est particulièrement utile pour étudier des problèmes dans lesquels il n'est pas possible d'effectuer des mesures précises (Wanot, 1996). L'expérimentation et la modélisation numérique sont souvent complémentaires.

Dans le cadre de cette thèse, ces deux approches ont été menées en parallèle. Les données expérimentales ont permis non seulement de définir les conditions aux limites, mais aussi de valider le modèle numérique qui a été mis en œuvre. Une fois validé, le modèle numérique pourra être utilisé dans des études ultérieures pour simuler différents scénarios.

6.2 Principales étapes de la modélisation

L'objectif d'une simulation numérique CFD est d'obtenir une solution convergée, indépendante du maillage et respectant la physique du problème étudié, afin de pouvoir en tirer un maximum d'informations quantitatives. Pour ce faire, elle doit nécessairement

passer par trois grandes étapes : la définition et la discrétisation du domaine de calcul, la résolution numérique des équations régissant le problème et l'exploitation des résultats.

6.2.1 Définition et discrétisation du domaine de calcul

En mécanique des fluides numérique, le domaine de calcul est la portion de l'espace où la solution numérique est calculée. Après sa définition, le domaine de calcul doit être discrétisé pour permettre la résolution numérique des équations de transport. Dans cette étude, nous choisissons d'étudier que des journées avec un vent incident perpendiculaire à l'axe de la rue, car plus favorables à la formation d'une surchauffe dans la rue ; ce qui justifie l'utilisation d'une modélisation 2D pour notre problème.

6.2.1.1 Définition du domaine de calcul

Le choix du domaine de calcul est essentiel lors d'une simulation numérique. Les dimensions du domaine de calcul dépendent du type de problème étudié. En aérodynamique externe, comme c'est le cas pour notre problème, le domaine de calcul décrit la région autour de la géométrie d'intérêt où la solution de l'écoulement est déterminée. Sa forme et ses dimensions dépendent principalement des caractéristiques aérodynamiques de la géométrie d'intérêt. Le domaine de calcul doit aussi permettre l'étude des phénomènes physiques à des endroits particuliers.

Pour notre cas, la rue canyon est la géométrie d'intérêt. Les dimensions de la portion de l'espace où la solution numérique est calculée doivent donc être définies en fonction d'une dimension qui caractérise la rue canyon. Dans la littérature ([Garcia Sagrado et al., 2002](#); [Xiaomin et al., 2006](#); [Kumar et al., 2009](#); [Moonen et al., 2011](#); [Baik et al., 2007](#)), les dimensions des domaines de calcul dépendent en général de la hauteur physique des bâtiments. Les simulations numériques préliminaires qui ont été réalisées dans le cadre du stage de [Guellal \(2018\)](#) ont montré qu'un décollement important de la couche limite pouvait survenir au-dessus de la rue canyon et une recirculation importante en aval du bâtiment Est. Les dimensions du domaine de calcul ne doivent donc pas être trop faibles pour permettre une bonne prédiction du décollement au-dessus de la rue canyon. Le domaine de calcul doit aussi permettre d'aller au delà de la zone de recollement en aval du

bâtiment Est pour éviter d’avoir un écoulement entrant à la sortie du domaine de calcul, qui pourrait interférer avec la solution numérique et donner des résultats non réalistes ou erronés. Les dimensions du domaine de calcul ne doivent pas être trop importantes non plus pour éviter des temps de calcul prohibitifs. La prise en compte de tous les éléments évoqués précédemment nous a conduit à retenir le domaine de calcul représenté sur la FIGURE 55. Ce domaine de calcul est inspiré de celui utilisé par [Battista et al. \(2015\)](#) : il mesure $5H$ au-dessus des bâtiments, $15H$ en amont du bâtiment Ouest et $15H$ en aval du bâtiment Est, où H correspond à la hauteur des bâtiments. Le domaine de calcul dans lequel sont résolues les différentes équations inclut les bâtiments (murs, toits, air) dont les caractéristiques sont également indiquées sur la FIGURE 55. Pour prendre en compte

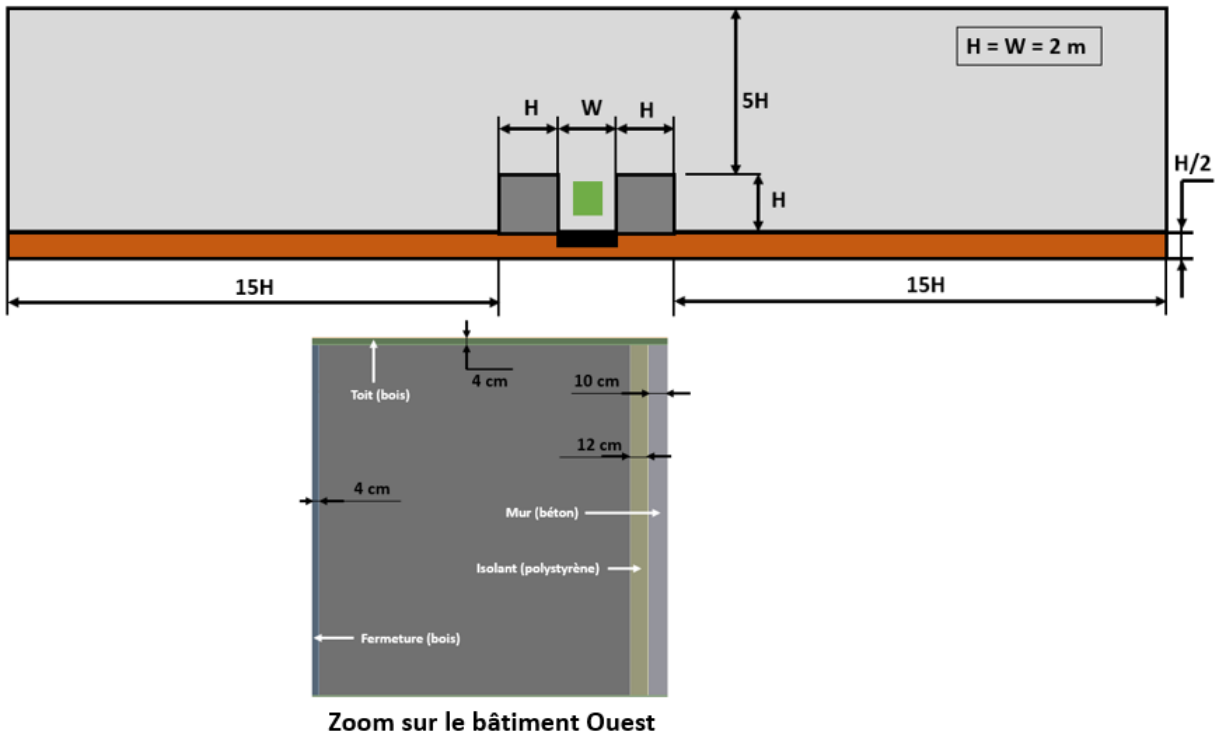


FIGURE 55 – Définition du domaine de calcul.

la course complète du soleil, nous avons, contrairement à [Battista et al. \(2015\)](#), étendu jusqu'à $15H$ la distance en amont du bâtiment Ouest. En effet, une limite du logiciel fait que le rayonnement de courtes longueurs d'onde incident ne peut être imposé que sur la

partie haute du domaine. Il est donc important d’avoir un domaine suffisamment étendu dans la direction horizontale, et symétrique par rapport à la rue, pour simuler la totalité de la course du soleil à l’échelle de la journée et pour représenter de façon adéquate le rayonnement solaire incident lorsque les rayons du soleil sont inclinés par rapport au zénith (début de matinée et fin d’après-midi). Un milieu poreux dont les dimensions sont précisées dans la section 6.3.2 a également été introduit à l’intérieur de la rue pour représenter les arbres.

6.2.1.2 Discrétisation du domaine de calcul

Le choix d’un grand domaine de calcul par rapport à l’objet d’étude est recommandé pour l’étude, par une simulation numérique de type CFD, des problèmes d’aérodynamique externe. Cependant, le surdimensionnement du domaine de calcul peut conduire à un nombre de points de calcul élevé. Des simulations numériques préliminaires ont donc été lancées afin de s’assurer que le domaine de calcul retenu pour nos simulations numériques n’était pas surdimensionné.

Comme montré sur la FIGURE 57, un maillage structuré a été choisi parce que ce type de maillage est bien adapté à la géométrie relativement simple de la rue canyon qui comporte des blocs rectangulaires. Un tel maillage offre également l’avantage de réduire la diffusion numérique par rapport à un maillage non structuré. Pour établir le maillage, trois densités de maillage ont été successivement testées en augmentant progressivement la densité des points de calcul d’un facteur 2 jusqu’à obtenir une indépendance vis-à-vis des résultats. Cette étude a été réalisée sur le cas minéral, sans représentation du houppier d’arbres. On peut constater sur la FIGURE 56 que le profil de la composante verticale de la vitesse du vent sur l’axe horizontal transversal passant par le centre de la rue n’a pratiquement pas évolué entre le deuxième maillage (400026 nœuds) et le troisième maillage (800052 nœuds). L’indépendance vis-à-vis du maillage est donc obtenue à partir de 400026 points de calcul dans l’ensemble du domaine. Le maillage est affiné près des parois car de forts gradients de vitesse et de température sont attendus à ces endroits. Le raffinement du maillage près des parois permet également de réduire le nombre de points de calcul nécessaires pour atteindre la convergence en maillage et de réduire le temps de

calcul. Les principales informations sur le maillage sont données dans la TABLE 22.

Nombre total d'éléments dans le domaine de calcul	404469
Nombre total de nœuds dans le domaine de calcul	400026
Nombre total de mailles à l'intérieur de la rue	4900
Taille moyenne des mailles à l'intérieur de la rue	2.5 cm
Hauteur de la première maille à l'intérieur de la rue	2.0 cm

TABLE 22 – Principales informations sur le maillage.

À l'intérieur de la rue, 70×70 éléments de maillage ont été choisis. La hauteur du premier élément de maillage sur une paroi verticale est d'environ 2 cm. Cette hauteur a été choisie pour des valeurs Y^+ autour de 30. Cela garantit une simulation numérique physiquement acceptable dans les zones proches des murs. Pour le sol, le maillage a été affiné près de la surface en contact avec l'air et est devenu grossier à mesure que l'on descendait en profondeur : 4 mailles uniformes ont été prises dans l'épaisseur de l'asphalte, 10 mailles uniformes sur l'épaisseur du gravier et 30 éléments non-uniformes (resserrés vers le haut et relâchés vers le bas) sur l'épaisseur restante du sol. Situé au centre de la rue (et donc loin des zones à forts gradients), le milieu poreux a été maillé comme le reste de la zone à l'intérieur de la rue. Il est essentiellement constitué de mailles de 2.5 cm.

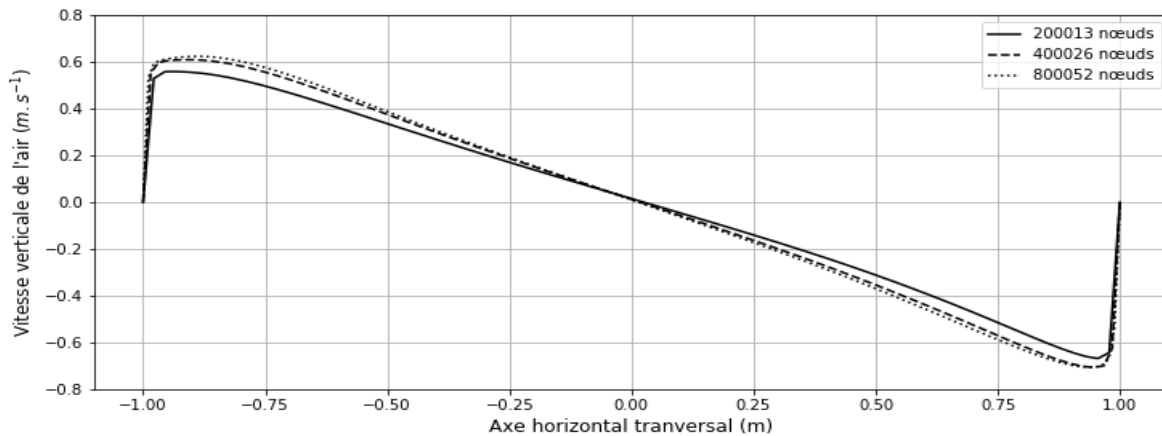


FIGURE 56 – Étude de convergence en maillage.

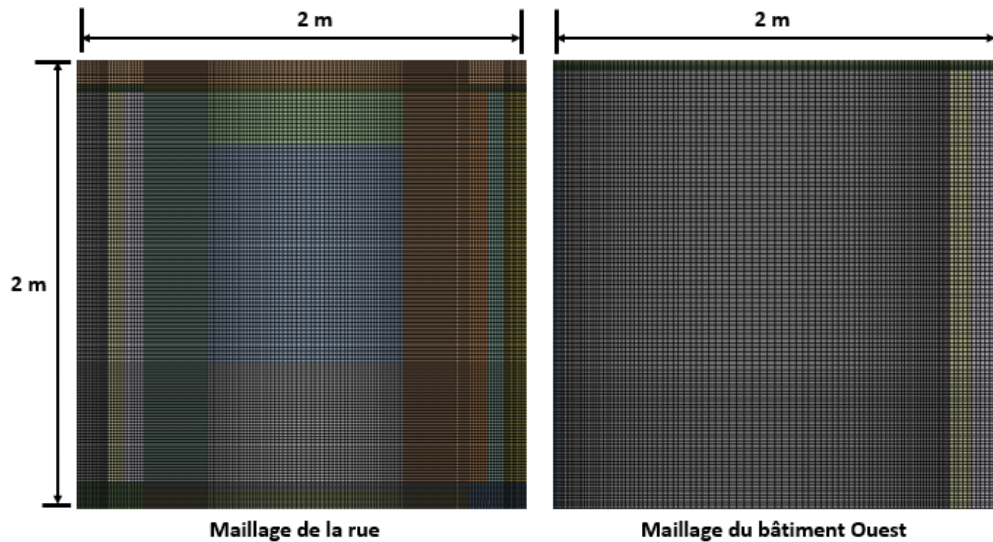


FIGURE 57 – Maillage de la rue et du bâtiment Ouest.

6.2.2 Paramétrage numérique et résolution des équations

Les simulations numériques ont été réalisées en plusieurs étapes :

- La première série de simulations était purement aéraulique. Elle avait principalement pour objectif de permettre la définition du domaine de calcul, l'établissement d'un maillage adapté, le choix du profil de vent incident à imposer en entrée du domaine de calcul, le choix des méthodes de résolution numérique de la vitesse et de la pression, le choix du modèle de turbulence etc.
- Dans la deuxième série de simulations numériques, un forçage thermique artificiel sur les murs des bâtiments et sur le sol a été introduit pour tester la prise en compte des transferts thermiques. La loi des gaz parfait a été introduite pour tenir compte de l'impact de la température sur la masse volumique de l'air.
- Les aspects radiatifs n'ont été introduits qu'à partir de la troisième étape par l'activation du sous-modèle radiatif dont le principe a été décrit dans la section 3.4. Les résultats de cette simulation seront présentés plus loin dans ce chapitre et constitueront les résultats numériques pour la modalité non-végétalisée de la rue.
- Le végétal n'a été introduit qu'à la dernière étape grâce à un sous-modèle de culture et une légère modification de la géométrie du domaine de calcul à l'intérieur de la

rue pour introduire le milieu poreux. Les résultats issus de cette simulation seront également présentés dans ce chapitre et représenteront les résultats numériques pour la modalité végétalisée de la rue canyon. La calibration et l'évaluation de la qualité du sous-modèle de culture seront réalisées avec des données expérimentales mesurées dans la modalité végétalisée **A** de la rue canyon.

Pour les méthodes numériques, le schéma "Second Order Upwind" a été choisi pour la discrétisation spatiale de toutes les variables résolues autres que la pression. Ce schéma est en effet réputé pour être plus précis que les autres schémas disponibles sous FLUENT, même s'il nécessite une attention particulière sur le maillage afin de ne pas faire l'objet d'instabilités (Isaev and Lysenko, 2004; Jia et al., 2019; Liu et al., 2019). Pour l'interpolation de la pression, c'est le schéma "Body Force Weighted" qui a été activé en raison de sa rapidité. Concernant le couplage entre la pression et la vitesse, le schéma "Coupled" a été retenu pour sa robustesse et pour la rapidité de sa convergence (Basha et al., 2019). Après une étude de convergence, les valeurs des résidus ont toutes été fixées à 10^{-6} .

6.2.2.1 Propriétés physiques et optiques des matériaux

Comme indiqué dans le **Chapitre 4**, notre dispositif expérimental est constitué de plusieurs matériaux. Les propriétés thermiques et optiques des différents matériaux ayant une grande influence sur les phénomènes microclimatiques qui se produisent à l'intérieur de la rue canyon (surchauffe urbaine, refroidissement matinal...), il est nécessaire de les définir. Les principales propriétés physiques utilisées lors des simulations numériques pour l'asphalte, le béton, le sol et le bois sont renseignées dans la TABLE 23. Pour les propriétés optiques des matériaux opaques (les éléments solides), sur les courtes longueurs d'onde, il est à noter que l'albédo se renseigne dans le logiciel FLUENT comme le complémentaire de l'émissivité externe sur les courtes longueurs d'ondes. Étant relativement variables en fonction du type de béton, les valeurs choisies pour les propriétés physiques du béton ont fait l'objet d'une réflexion minutieuse. Du point de vue radiatif, les propriétés optiques (coefficient d'absorption et coefficient d'extinction du rayonnement courte longueur d'onde incident) n'ont été renseignées que pour les milieux semi-transparents (air et milieu poreux).

	Air	Asphalte	Béton	Sol	Bois
Masse volumique (kg.m ⁻³)	1.225	1045	2500	1700	700
Chaleur spécifique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1006	1575	1000	1700	381
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0.0242	1.2	1.2	1.7	0.07
Albédo	-	0.1	0.7	0.23	0.4
Emissivité (grandes longueurs d'onde)	-	0.93	0.93	0.95	0.95

TABLE 23 – Propriétés thermiques et optiques des différents matériaux, sources : bilan-thermique-28.fr, www.atomer.fr.

6.2.2.2 Conditions aux limites et initiales

Les conditions aux limites permettent de définir les données d'entrée d'une simulation numérique. Elles permettent de relier le modèle numérique à son environnement. Les conditions aux limites peuvent être en régime stationnaire ou en régime instationnaire. Les conditions aux limites en régime stationnaire (ou régime permanent) persistent dans le temps tandis que celles en régime instationnaire (ou régime transitoire) peuvent évoluer au cours d'une simulation numérique. En entrée du domaine de calcul, un profil en loi de puissance a été imposé pour la composante horizontale de la vitesse du vent. La loi de puissance est une loi classique qui a été utilisée par des auteurs comme [Gromke et al. \(2008\)](#); [Kim and Baik \(1999\)](#); [Madalozzo et al. \(2014\)](#) pour modéliser la distribution des vitesses dans la couche limite atmosphérique. L'expression générale du profil de vitesse en loi puissance s'écrit :

$$u(y) = u_{ref} \left(\frac{y}{y_{ref}} \right)^\alpha \quad (99)$$

où u est la composante horizontale moyenne de la vitesse du vent en (m.s⁻¹), y est la coordonnée spatiale verticale en (m), y_{ref} est la hauteur de référence en (m) et u_{ref} la composante horizontale de la vitesse du vent à $y = y_{ref}$ en (m.s⁻¹). L'ajustement de l'exposant α du profil vertical de la vitesse du vent montrée sur la FIGURE 58 a été réalisé à partir de données expérimentales acquises entre le mois de février et de mai 2019 (sur 5 points de mesure, voir FIGURE 23(a)) avec le vent incident d'Ouest soufflant perpendiculairement à la rue, c'est-à-dire à 270° ±22.5°, et en conditions neutres

(avec $-0.03 < Ri < 0.03$, sur la base de la différence de température entre 10 m et 0.4 m du sol, et de la vitesse du vent à 10 m de hauteur, Ri est le nombre de Richardson). Pour pouvoir imposer les conditions aux limites relatives au rayonnement incident, une

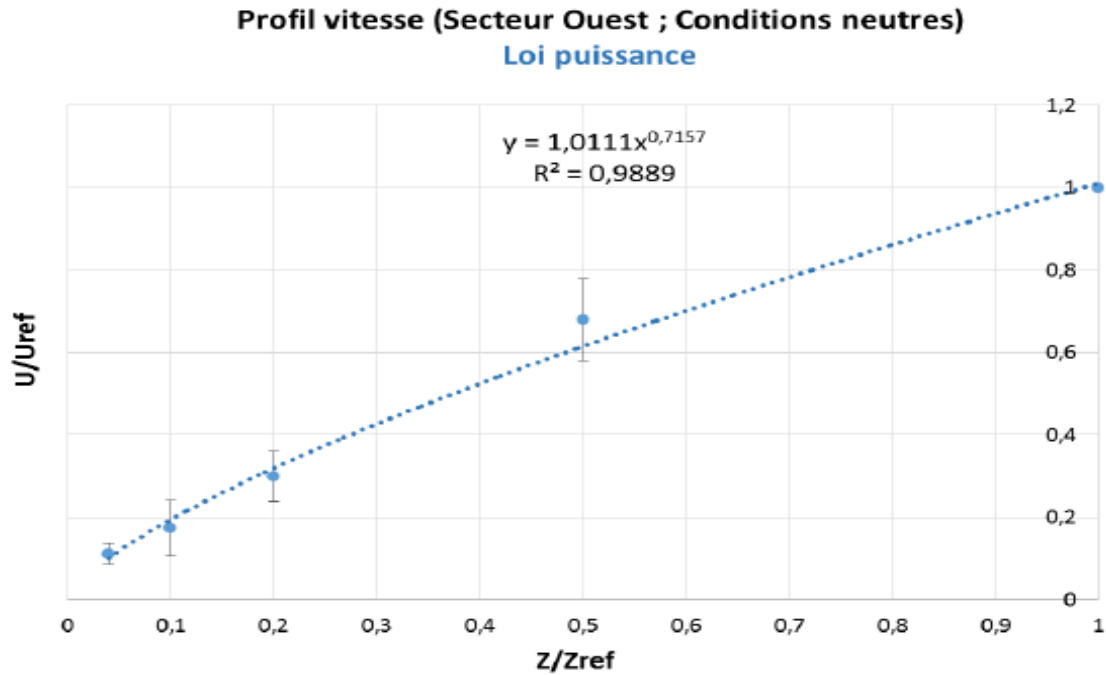


FIGURE 58 – Profil vertical du vent incident.

limite du logiciel fait que nous avons été obligés de définir la frontière supérieure du domaine de calcul comme étant une paroi non-glissante se déplaçant à la vitesse du vent à cette même hauteur (à $y = 12$ m). À la sortie du domaine de calcul, tous les gradients ont été supposés nuls à l'exception du gradient de pression. Toutes les parties solides en contact avec l'air ont été considérées comme des murs non-glissants. Du point de vue thermique, une température de l'air uniforme (mais variable dans le temps) a été imposée en entrée et sur la limite supérieure du domaine de calcul. Cette donnée a été mesurée expérimentalement grâce à une sonde TRH installée sur le mât Nord à hauteur de 2 m. Une condition de flux de chaleur nul a été imposée sur la limite inférieure du domaine de calcul (partie inférieure du sol située à 1 m de profondeur) et sur les côtés latéraux du sol. Quant au rayonnement, des rayonnements incidents courtes longueurs

d'onde et grandes longueurs d'onde (provenant des données expérimentales mesurées par le bilanmètre CNR1 placé dans la modalité non-végétalisée à 2.1 m du sol) ont été imposés sur la limite supérieure du domaine de calcul. Une température de ciel calculée à partir du rayonnement grande longueur d'onde a également été imposée sur les cotés latéraux (entrée et sortie) du domaine de calcul. Les coordonnées de la position du soleil ont été déterminées à partir de données (élévation et azimut du soleil) téléchargées depuis le site : SunEarthTools.com. Une projection de ces données sur un plan 2D a été réalisée.

6.2.2.3 Relaxation et critères de convergence

Lorsque le maillage est trop grossier ou que les conditions aux limites ne sont pas bien adaptées, la solution numérique peut diverger ou produire des résultats erronés. La non-linéarité des équations de transport résolues peut également conduire à une instabilité de la solution numérique. Pour y remédier, on introduit généralement un facteur de sous-relaxation (nombre compris entre 0 et 1), qui réduit la variation de ϕ produite lors de chaque itération. Le choix des facteurs de sous-relaxation est important. En effet, une faible valeur (proche de 0) du facteur de sous-relaxation peut réduire les instabilités (ou oscillations) mais ralentir la convergence des calculs. Inversement, une valeur plus élevée (proche de 1) du facteur de sous-relaxation peut accélérer la convergence des calculs, mais conduire à des instabilités numériques. Les valeurs des facteurs de sous-relaxation pour les différentes équations résolues sont renseignées dans la TABLE 24. Le choix des valeurs a fait l'objet de plusieurs tests. Les valeurs qui ont été retenues constituent un bon compromis entre stabilité et convergence des calculs.

Équation	Facteur de sous-relaxation
Vitesse	0.5
Pression	0.3
Masse volumique	1
Énergie cinétique turbulente	0.8
Taux de dissipation turbulente	0.8
Viscosité turbulente	0.8
Eau	1
Énergie	1
Ordonnées discrètes	1

TABLE 24 – Facteurs de sous-relaxation utilisés.

6.2.2.4 Résolution des équations

Un certain nombre d'équations ont été résolues pour étudier un ensemble de variables telles que la vitesse de l'air, la température de l'air, le transport de la fraction massique de vapeur d'eau et le rayonnement. Les principales équations résolues ont toutes été présentées dans le **Chapitre 3**. L'écoulement dans le domaine de calcul se produisant majoritairement loin d'une paroi, il convient de préférer le modèle de turbulence $k - \varepsilon$ au modèle $k - \omega$ (qui est mieux adapté pour des écoulements proches parois avec un développement de gradients de pression adverses) pour résoudre la turbulence. Le modèle $k - \varepsilon$ RNG est réputé être le plus approprié pour la résolution d'écoulements avec d'importantes recirculations. Ce modèle de turbulence a également été utilisé par des auteurs tels que [Ai and Mak \(2017\)](#); [Baik et al. \(2012, 2007\)](#); [Kwak et al. \(2013\)](#) pour étudier les écoulements d'air dans une rue canyon. La plupart des modèles de turbulence proposés dans les logiciels CFD ne sont valables que dans le cœur de l'écoulement, c'est-à-dire dans l'écoulement loin des parois. Une approche est donc nécessaire pour rendre ces modèles de turbulence applicables dans l'écoulement près des parois. Le logiciel ANSYS FLUENT offre plusieurs options pour le traitement des zones proches des parois. Parmi celles-ci, nous avons choisi l'option "Enhanced wall treatment", qui est la plus appropriée

pour résoudre les écoulements de fluides à faible vitesse et/ou les écoulements à forts gradients de pression entraînant un important décollement de la couche limite comme c'est le cas dans notre problème.

6.3 Simulations numériques

Les simulations numériques qui ont été réalisées dans le cadre de cette thèse sont de type CFD. Par rapport aux modèles globaux (modèle reposant sur une résolution numérique de variables moyennées dans l'espace), les simulations numériques de type CFD permettent une analyse plus fine des différentes variables étudiées. Les simulations numériques ont été réalisées grâce au logiciel commercial ANSYS FLUENT (version : 2020R2).

6.3.1 Choix de la journée étudiée

L'intégration du végétal dans le modèle CFD implique la connaissance des caractéristiques de celui-ci. Les caractéristiques du milieu poreux (LAI, LAD, coefficient d'extinction) ayant été mesurées aux alentours du 24 juillet 2020, il convient de retenir pour les simulations numériques une journée qui ne soit pas très éloignée de cette date. L'analyse des données expérimentales de la campagne de mesures de 2020 a permis d'identifier une série de trois journées consécutives (28, 29 et 30 juillet 2020) avec un fort ensoleillement. Les évolutions journalières du rayonnement solaire incident mesurées expérimentalement pour ces trois journées sont données sur la FIGURE 59. D'autre part, la modélisation numérique 2D qui a été retenue dans le cadre de cette thèse implique la modélisation d'une journée avec un vent incident perpendiculaire à la rue canyon. Les roses des vents des journées du 28, du 29 et du 30 juillet 2020 sont présentées sur la FIGURE 60. On peut clairement y voir que les vents étaient majoritairement d'Ouest pour la journée du 28 juillet 2020, majoritairement de Nord pour la journée du 29 juillet, et majoritairement d'Est pour la journée du 30 juillet 2020. La journée du 29 juillet 2020, bien qu'elle soit très ensoleillée, n'a pas été retenue en raison du fait que les journées à vents incidents parallèles à l'axe de la rue ne sont adaptées pour une approche de modélisation 2D. La journée du 30 juillet 2020 aurait pu être retenue pour la CFD parce qu'elle est très ensoleillée avec une direction du vent incident perpendiculaire à l'axe de la rue, mais la vitesse du vent est assez importante, ce qui n'est pas très favorable à l'observation du phéno-

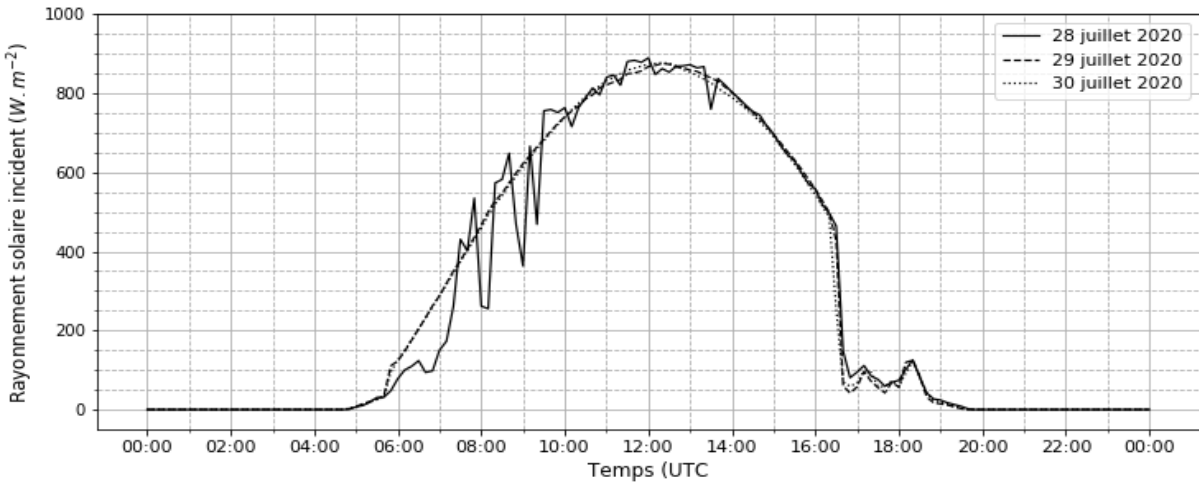


FIGURE 59 – Évolutions journalières du rayonnement solaire incident pour les journées du 28, 29 et 30 juillet 2020.

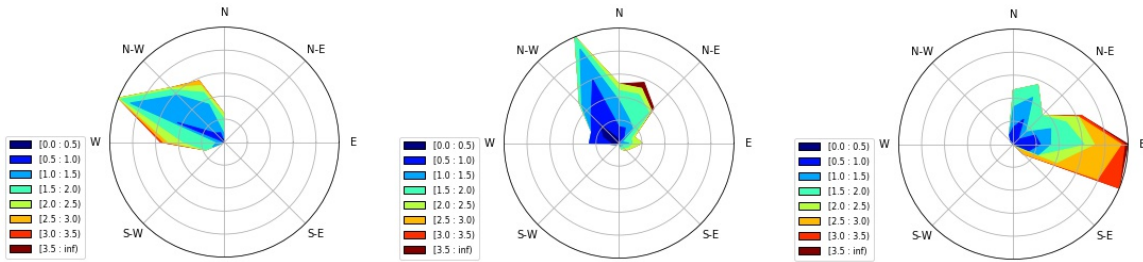


FIGURE 60 – Roses des vents pour les journées du 28, 29 et 30 juillet 2020 mesurées à 10 m du sol sur le mat Ouest.

mène de surchauffe urbaine. La journée du 28 juillet 2020 est donc la meilleure journée radiative (ensoleillée avec des vents faibles) pouvant être modélisée par une approche 2D, parce que présentant des vents incidents majoritairement perpendiculaires à l'axe de la rue et faibles.

6.3.2 Dimensions du milieu poreux

La détermination des dimensions du milieu poreux présentées sur la FIGURE 61 ont été choisies sur base de relevés expérimentaux présentés dans la section 4.3.3.6 et dans

l'Annexe H. Le milieu poreux est supposé homogène et mesure 1.1 m de hauteur et 1.2 m de largeur. Il est situé à 0.4 m de chaque mur et à 0.6 m du sol.

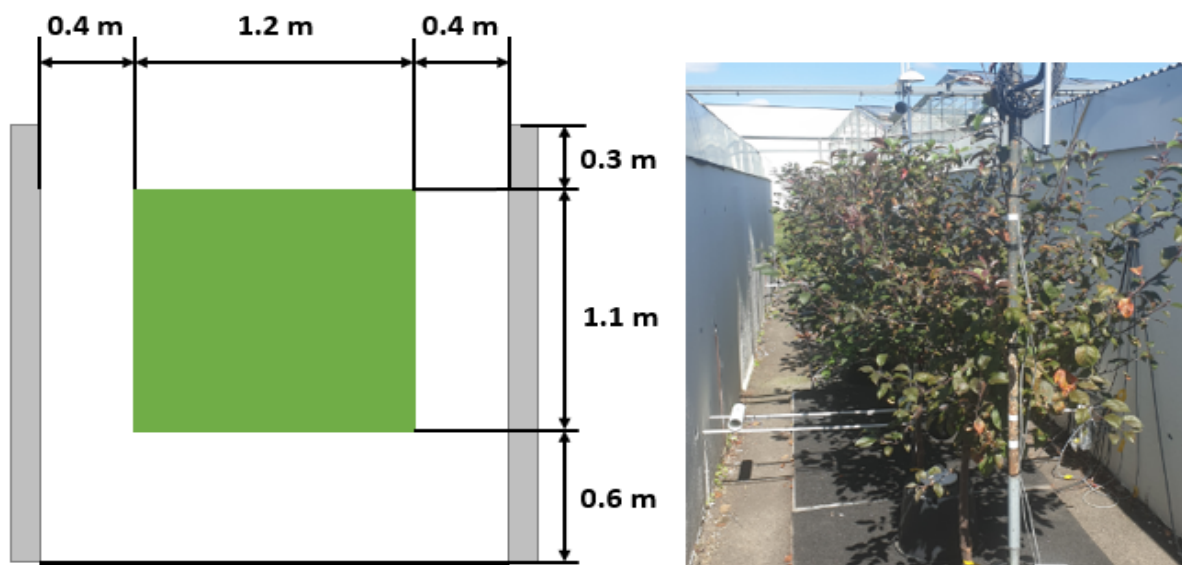


FIGURE 61 – Dimensions du milieu poreux.

6.3.3 Caractéristiques du milieu poreux

Les simulations numériques ont été réalisées en assimilant les arbres à un milieu poreux modifiant localement l'écoulement de l'air, et échangeant des flux de chaleur latente et sensible avec leur environnement immédiat. Dans le logiciel ANSYS FLUENT, un milieu poreux est principalement caractérisé par sa porosité, son coefficient de traînée (qui dépend de la densité foliaire) et son coefficient d'extinction du rayonnement incident.

6.3.3.1 Porosité et propriétés physiques du milieu poreux

Le choix de la valeur de la porosité n'a pas été aisé. En effet, il ne nous a pas été possible de mettre en place une méthode expérimentale permettant de la mesurer. Des simulations numériques préliminaires ont cependant montré que la valeur de la porosité n'avait pas une grande influence sur les résultats numériques. En revanche, pour définir

les propriétés thermiques équivalentes du milieu poreux, nous avons, comme pour [Morille \(2012\)](#); [Bouhoun Ali \(2016\)](#); [Boulard et al. \(2017\)](#), retenu la valeur de 0.9 pour la porosité. La valeur de la porosité indique que le milieu poreux est constitué de fluide (et donc d'air) à 90%. Pour déterminer ses propriétés thermiques équivalentes du milieu poreux, nous avons supposé, comme pour [Boulard and Wang \(2002\)](#), que la partie restante du milieu poreux était constituée d'eau à 83% et de matière sèche à 17%. Toute propriété thermique du milieu poreux est déterminée comme suit :

$$i_{poreux} = 0.9 \times i_{air} + 0.1 \times 0.83 \times i_{eau} + 0.1 \times 0.17 \times i_{bois} \quad (100)$$

avec i_{air} la propriété thermique équivalente de l'air, i_{eau} la propriété thermique équivalente de l'eau, et i_{bois} la propriété thermique équivalente du bois. Les propriétés thermiques du milieu poreux sont données dans la TABLE 25.

	Air	Eau	Bois	Poreux
Masse volumique (kg.m ⁻³)	1.184	997.05	700	95.7207
Chaleur spécifique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1006.58	4181.66	2310	1292.26
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0.0260	0.6069	0.1730	0.0767
Viscosité dynamique (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)	1.83e ⁻⁵	8.92e ⁻⁴	-	9.05e ⁻⁵

TABLE 25 – Propriétés thermiques équivalentes du milieu poreux [Boulard et al. \(2017\)](#).

6.3.3.2 Coefficient de traînée

Tout objet se déplaçant dans un fluide subit de la part de ce dernier une force qui s'oppose à son mouvement. Inversement, tout objet fixe dans un fluide en mouvement génère une action qui s'oppose au mouvement du fluide. La résultante des efforts qui ralentissent l'objet ou le fluide en mouvement est appelée la traînée. L'intensité de la force de traînée dépend du coefficient de traînée qui, lui-même, est toujours associé à une surface particulière. Pour les cultures modélisées par un milieu poreux, l'effet de traînée produit par l'écoulement d'air à travers le milieu poreux peut être modélisé en fonction de la densité foliaire (LAD) et du carré de la vitesse de l'air (voir équation (51) dans le **Chapitre 3**). [Molina-Aiz et al. \(2006\)](#) ont réalisé une étude en soufflerie pour déterminer

le coefficient de traînée de quatre cultures horticoles et ont obtenu les valeurs suivantes : 0.26 pour la tomate, 0.23 pour le poivron, 0.23 pour l’aubergine et 0.22 pour le haricot. La proximité des valeurs obtenues pour les quatre cultures suggère que l’effet de la forme et de la taille des feuilles n’est pas significatif sur la valeur du coefficient de traînée. Comme dans l’étude de [Hong et al. \(2018\)](#) sur la pulvérisation de pesticides dans un verger de pommiers, nous avons utilisé la valeur de 0.25 pour le coefficient de traînée.

6.3.3.3 Surface foliaire, LAI et LAD

Une taille des arbres à 170 cm du sol a été réalisée le 23 juillet 2020 pour rabattre les arbres en-dessous de la hauteur des murs. Le LAD a été déterminé le 24 juillet 2020 car on dispose à la fois des mesures de surface foliaire et du volume de peuplement (dimensions du houppier) à cette date. Nous ferons l’hypothèse que les valeurs du LAI et du LAD estimés pour le 24 juillet 2020 (et présentées dans la TABLE 26) n’ont quasiment pas varié pour les journées qui ont immédiatement suivi cette date.

	Modalité A	Modalité B
Surface foliaire (m ²)	7.78	6.06
LAI (m ² .m ⁻²)	2.49	1.91
LAD (m ² .m ⁻³)	2.26	1.88

TABLE 26 – Valeurs de la surface foliaire, du LAI et du LAD dans les modalités végétalisées A et B estimées le 24 juillet 2020.

6.3.3.4 Coefficient d’extinction du rayonnement

Le rayonnement photosynthétiquement actif (rayonnement PAR) est un rayonnement dont les longueurs d’ondes sont comprises entre 400 et 700 μm. C’est cette fraction du rayonnement global qui est utilisée par les végétaux dans le processus de la photosynthèse. Pour modéliser la décroissance du rayonnement PAR dans le couvert végétal, nous avons utilisé la loi de Beer-Lambert. Cette loi s’écrit :

$$B(y) = B_0 e^{-\eta \cdot LAD \cdot y} \quad (101)$$

Les feuilles des arbres ayant des propriétés optiques différentes en fonction des longueurs d'onde, nous savons que le rayonnement PAR et le rayonnement global ne pénètrent pas de la même manière dans un couvert végétal. Nous négligeons cependant ces différences d'atténuation par le feuillage et faisons l'hypothèse que le coefficient d'extinction pour le rayonnement PAR est le même que celui pour le rayonnement global. Il existe une relation de proportionnalité entre le rayonnement global et le rayonnement PAR en l'absence de couvert végétal et qui dépend de la latitude. L'exploitation de nos données expérimentales a montré que le rayonnement PAR mesuré à 2 m du sol (au-dessus du couvert végétal) représente environ 44% du rayonnement global incident mesuré à la même hauteur dans la modalité non-végétalisée, ce qui est conforme avec la littérature d'après (Britton and Dodd, 1976). Pour l'atténuation du rayonnement global (R_g), on peut donc écrire :

$$R_g(y) \approx R_{g_0} e^{-\eta.LAD.y} \quad (102)$$

Nous obtenons finalement :

$$\frac{R_g(y)}{R_{g_0}} \approx \frac{B(y)}{B_0} = e^{-\eta.LAD.y} \quad (103)$$

y est la profondeur de pénétration dans le couvert végétal en (m), $B(y)$ est le rayonnement PAR incident à la profondeur de pénétration y en ($W.m^{-2}$), B_0 est le rayonnement PAR incident mesuré au-dessus du houppier en ($W.m^{-2}$), $R_g(y)$ est le rayonnement global incident à la profondeur de pénétration y en ($W.m^{-2}$), R_{g_0} est le rayonnement global incident mesuré au-dessus du houppier en ($W.m^{-2}$), LAD est la densité foliaire en ($m^2.m^{-3}$), η est le coefficient d'extinction (sans dimension).

Pour déterminer le produit ($\eta.LAD$), nous avons étudié l'atténuation du rayonnement PAR incident à midi solaire (l'élévation du soleil pour la journée du 23 juillet 2020 à Angers était de 62.37° à 12 heures UTC) dans le couvert végétal pour toutes les journées ensoleillées de la campagne de mesure 2020 situées après la taille du 23 juillet 2020, jusqu'au 5 août 2020. Le choix d'utiliser les données à 12 :00 UTC pour étudier l'atténuation du rayonnement global incident dans le houppier est justifié par le fait que les capteurs de PAR linéaires étaient positionnés sur un plan vertical (mais décalés les uns par rapport aux autres pour ne pas se faire d'ombre). La FIGURE 62 et la FIGURE 63

présentent l'atténuation du rayonnement PAR incident dans le couvert végétal dans la modalité A et dans la modalité B respectivement. Globalement, la décroissance du rayonnement PAR incident dans le couvert végétal suit une loi exponentielle comme le stipule la loi de Beer-Lambert. Nous pouvons néanmoins constater que l'ajustement est meilleur dans la modalité B. Cela s'explique par le fait que le couvert végétal est plus homogène dans la modalité B qu'il ne l'est dans la modalité A, et que la loi de Beer-Lambert s'y applique mieux surtout au niveau de l'arbre dans lequel étaient les capteurs PAR. Dans la modalité A, le feuillage de l'arbre L au niveau duquel étaient disposés les capteurs de PAR linéaires était beaucoup plus clairsemé entre 150 cm et 200 cm du sol. Notons enfin que les valeurs des R^2 sont légèrement surévaluées car le passage de la loi d'ajustement par le point de coordonnées (0 ; 1) a été imposé par l'adimensionnement du rayonnement global incident. Connaissant maintenant les valeurs du produit $\eta.LAD$ grâce aux lois d'ajustement présentées sur la FIGURE 62 et sur la FIGURE 63 et les valeurs des LAD pour les deux modalités végétalisées, nous pouvons déduire les valeurs du coefficient d'extinction du rayonnement PAR incident pour chaque modalité. Les valeurs du coefficient d'extinction du rayonnement PAR incident dans les modalités végétalisées A et B sont données dans la TABLE 27. [Poblete-Echeverría et al. \(2015\)](#) avaient obtenu des valeurs de coefficient d'extinction comprises entre 0.25 et 0.95 pour un pommier. La modification du coefficient d'extinction peut s'expliquer par le fait, qu'ici, non seulement nous travaillons avec un génotype de pommier particulier, mais en plus nous avons conduit les arbres de façon à obtenir des houppiers très ramifiés sur une faible hauteur.

	Modalité A	Modalité B
Coefficient d'absorption (m^{-1})	2.943	3.688
LAD ($m^2.m^{-3}$)	2.26	1.88
Coefficient d'extinction (-)	1.30	1.96

TABLE 27 – Propriétés du couvert végétal dans les modalités A et B.

6.3.3.5 Les UDF (User Defined Functions) utilisées

Comme indiqué dans la section 3.6.2, la prise en compte des effets écophysologiques du végétal se traduit par l'ajout de termes sources dans les équations d'énergie et de transport

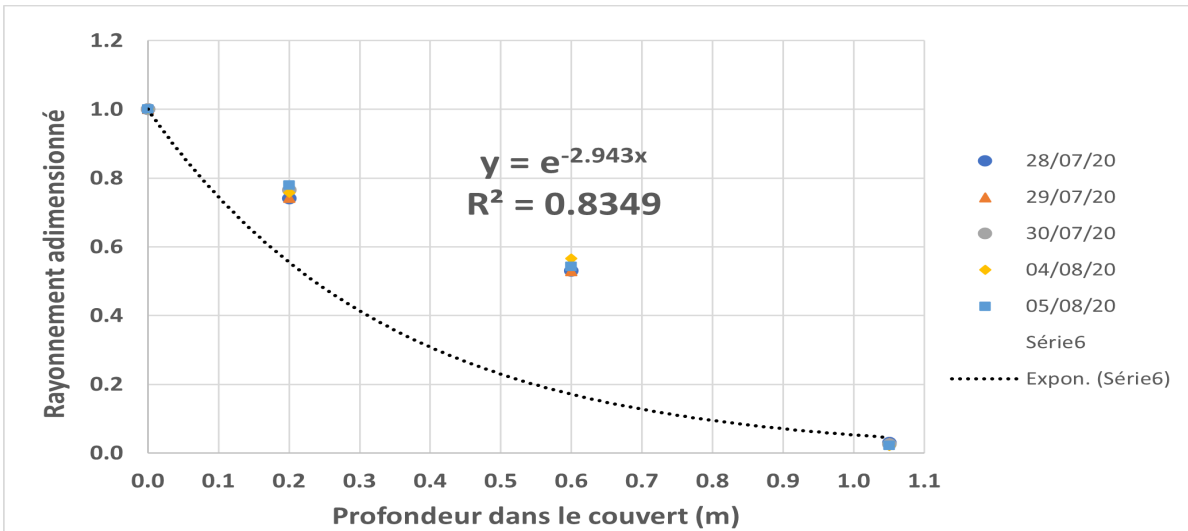


FIGURE 62 – Décroissance du rayonnement PAR dans le couvert végétal de la modalité végétalisée **A** pour les journées ensoleillées situées après la taille du 23 juillet 2020.

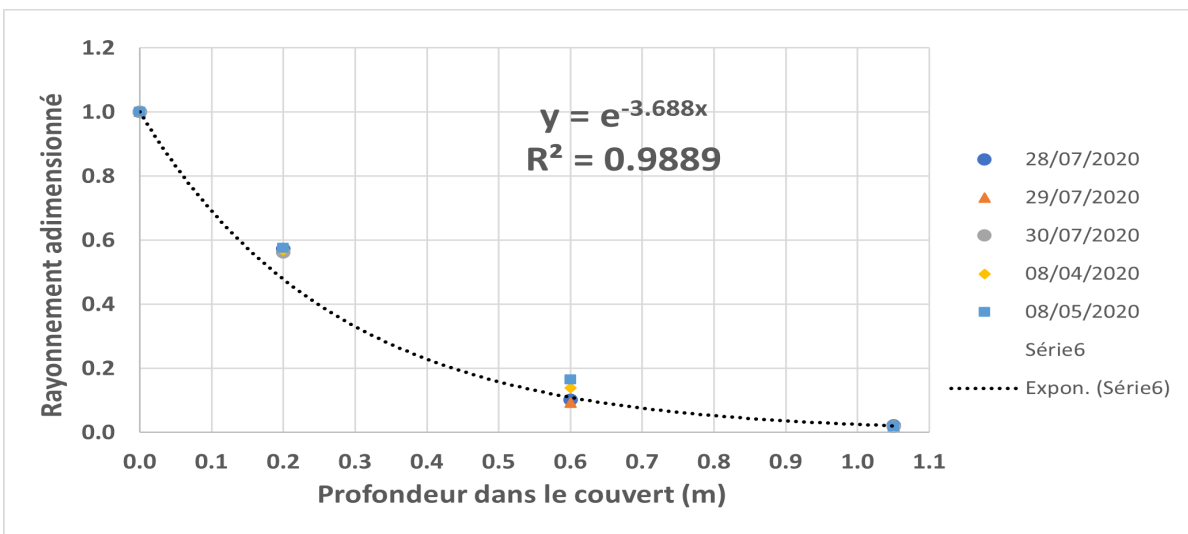


FIGURE 63 – Décroissance du rayonnement PAR dans le couvert végétal de la modalité végétalisée **B** pour les journées ensoleillées situées après la taille du 23 juillet 2020.

de la vapeur d'eau. Les termes sources de flux de chaleur sensible et de flux de chaleur latente qui doivent être ajoutés dans l'équation de l'énergie sont déterminés à partir

d'un bilan énergétique réalisé sur le couvert végétal. Ce bilan énergétique fait cependant intervenir une variable, en l'occurrence la température de feuille, qui n'est pas directement accessible dans le logiciel. Pour remédier à cette limite du logiciel, nous avons utilisé des

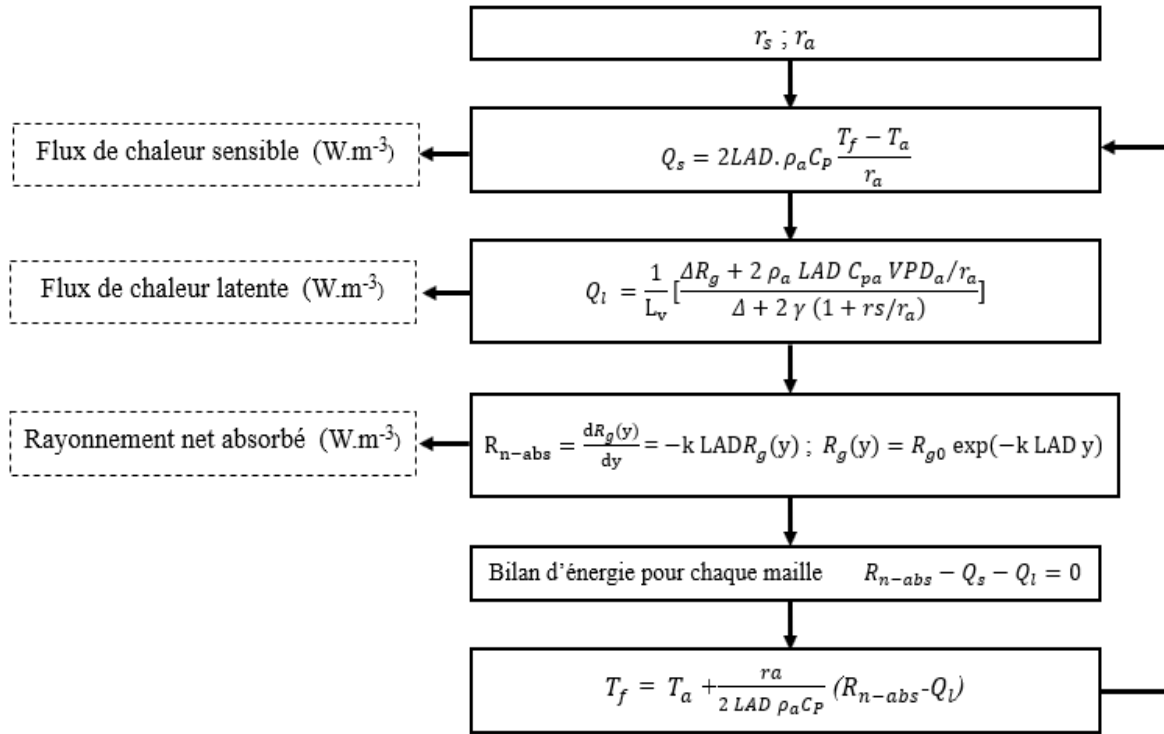


FIGURE 64 – Routine spécifique au bilan énergétique sur le couvert végétal : les encadrés en ligne discontinue représentent les communications entre la routine et le code Fluent, source : [Bouhoun Ali \(2016\)](#).

UDF (User-defined function) pour calculer les différents termes sources qui ont été ajoutés dans le milieu poreux (FIGURE 64). Le logiciel FLUENT offre en effet la possibilité à son utilisateur de définir des besoins précis grâce à l'usage d'UDF. L'initialisation du domaine de calcul, la définition du coefficient d'absorption des différents matériaux et la définition du profil de vitesse en loi puissance en entrée du domaine de calcul ont toutes été réalisées grâce aux UDF données dans l'**Annexe K**.

6.3.4 Évaluation de la qualité du modèle numérique

Un des principaux avantages d'une simulation numérique CFD par rapport à une expérimentation est la possibilité de mener des analyses comparatives basées sur différents scénarios (Toparlar et al., 2015). Une analyse CFD permet aussi de visualiser les variables pertinentes dans tout le domaine de calcul (Toparlar et al., 2015; Molina-Aiz et al., 2010; Allegrini et al., 2014; Toparlar et al., 2017). Cependant, la nécessité d'appliquer des hypothèses pour simplifier la physique (généralement complexe) des phénomènes étudiés fait qu'une simulation numérique doit nécessairement passer par une étape de validation pour avoir plus de crédibilité. Comme cela a été vu dans le **Chapitre 2**, le manque de validation par des données expérimentales est une de principales limitations dont souffrent certains modèles numériques.

Dans ce travail de thèse, la qualité du modèle numérique sera évaluée avec des données expérimentales mesurées en milieu extérieur, dans une rue canyon échelle réduite. L'introduction d'un milieu poreux à l'intérieur de la rue pour modéliser l'impact aérodynamique des arbres, l'ajout des termes de flux de chaleur latente et de flux de chaleur sensible dans l'équation de conservation de l'énergie, et l'ajout de la quantité d'eau transpirée par les arbres dans l'équation de transport de la fraction massique de la vapeur d'eau ont permis d'intégrer dans le modèle numérique l'impact du végétal sur les transferts d'eau et d'énergie. Nous choisissons de procéder à l'évaluation de la qualité du modèle numérique en considérant trois variables : la température des parois, la température de l'air et l'humidité absolue de l'air. Ces variables sont en effet représentatives de l'ensemble des variables étudiées. Pour chacune de ces trois variables, nous donnerons pour la modalité non-végétalisée (MNV) et pour la modalité végétalisée (MV) des indicateurs statistiques comme le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'écart de biais moyen (EBM) entre les valeurs numériques et les valeurs expérimentales. Les formules utilisées pour calculer l'EBM et le RMSE sont :

$$EBM = \frac{\sum (y_{num} - y_{exp})}{m} \quad (104)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_{num} - y_{exp})^2}{m}} \quad (105)$$

y_{num} est la valeur évaluée par le modèle numérique, y_{exp} est la valeur expérimentale mesurée, m est le nombre de valeurs utilisées.

Comme cela a été vu sur les données expérimentales, l'interception du rayonnement solaire incident par une paroi se traduit par une augmentation de la température de celle-ci. Ce phénomène est bien reproduit par le modèle numérique. Les évolutions journalières des températures du sol, du mur Est et du mur Ouest sont présentées respectivement sur la FIGURE 65. Comme cela est clairement visible sur les différentes courbes, les valeurs relativement élevées du coefficient de détermination (supérieures à 0.88 pour la température du sol, supérieures à 0.80 pour la température du mur Est, supérieures à 0.74 pour le mur Ouest) entre les valeurs numériques et expérimentales, aussi bien pour la modalité non-végétalisée que pour la modalité végétalisée, confirment que la dynamique temporelle de la température du sol est globalement bien reproduite par le modèle numérique. En revanche, comme nous pouvons aussi le voir sur les graphes, les valeurs assez élevées de l'erreur quadratique moyenne (supérieures à 1.99 °C pour la température du sol, supérieures à 1.33 °C pour la température du mur Est, supérieures à 0.90 °C pour la température du mur Ouest) les valeurs positives de l'écart de biais moyen indiquent que les températures de parois sont surestimées par le modèle numérique. La FIGURE 66 présente les évolutions journalières des températures d'air (numériques et expérimentales) prises à 40 cm du sol, dans la modalité non-végétalisée (MNV) et dans la modalité végétalisée (MV). Comme pour les températures de parois, les indicateurs statistiques présentés dans la TABLE 28 montrent que le modèle numérique reproduit bien la dynamique temporelle de la température de l'air (R^2 supérieur à 0.93), mais avec une surestimation assez importante des valeurs numériques (RMSE supérieurs à 2.28 °C, et EBM positifs).

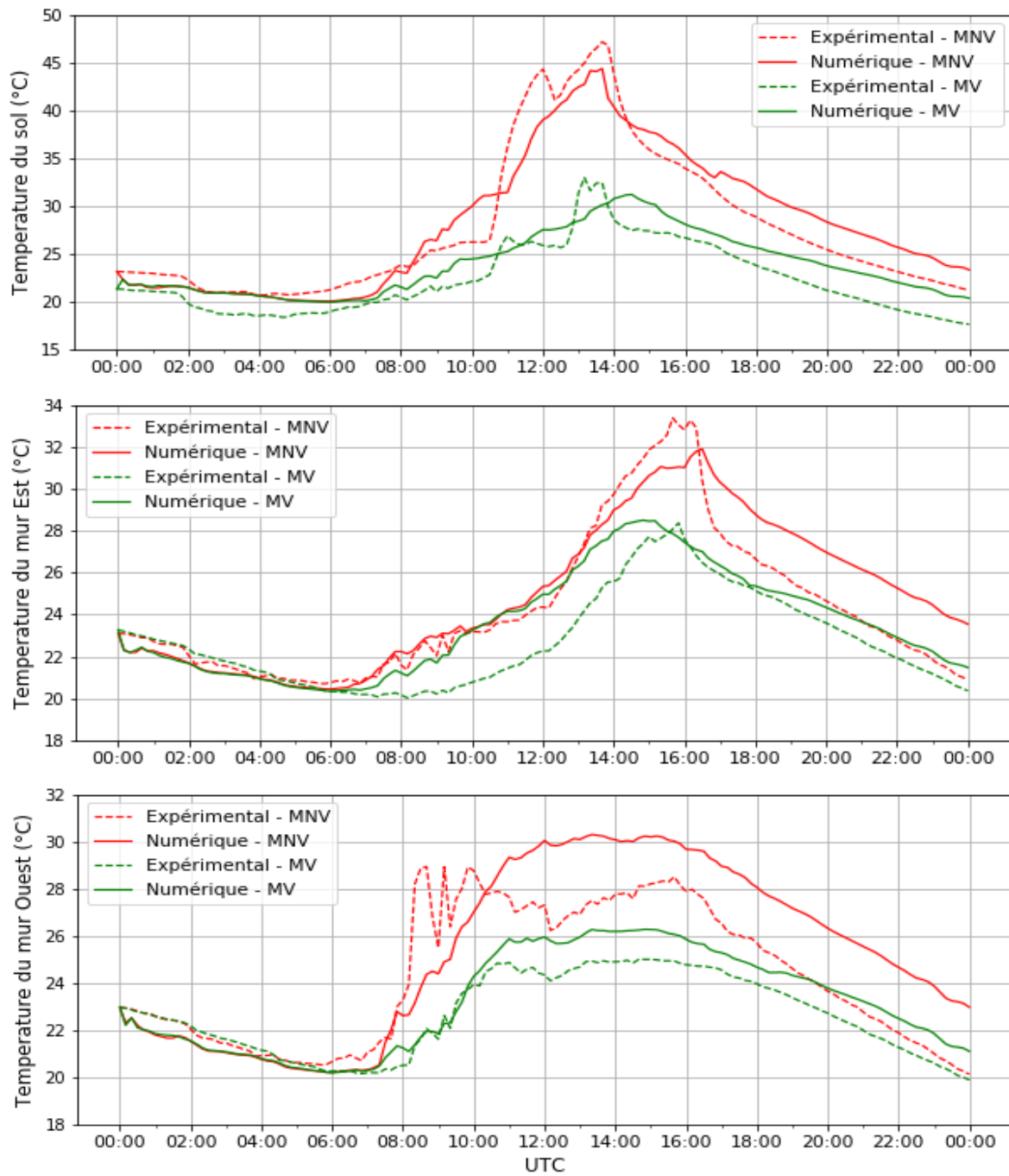


FIGURE 65 – Évolutions journalières des températures de parois dans la modalité non-végétalisée (MNV) et dans la modalité végétalisée de la rue (MV).

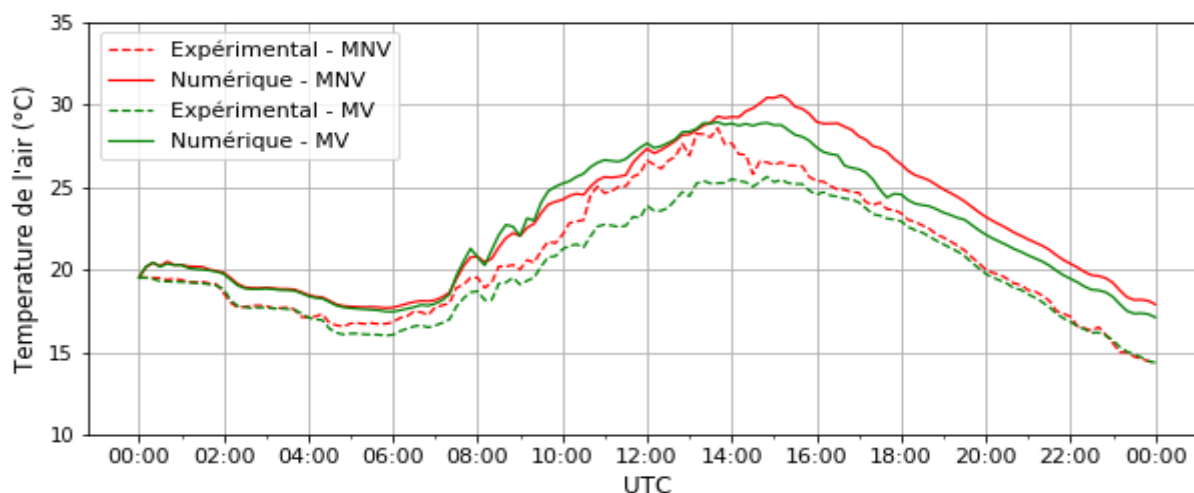


FIGURE 66 – Évolutions journalières de la température de l'air à 40 cm du sol dans la modalité non-végétalisée (MNV) et dans la modalité végétalisée de la rue (MV).

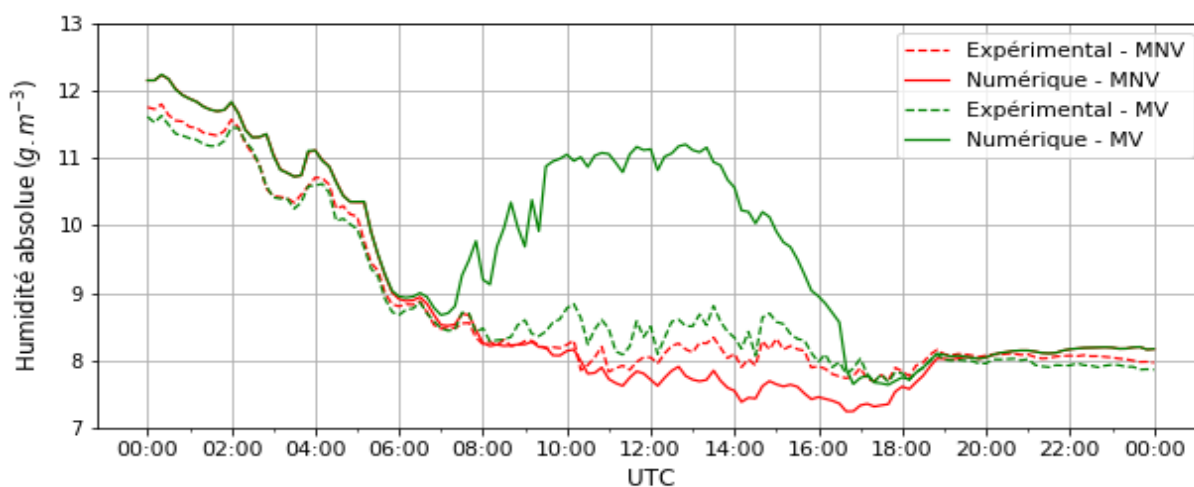


FIGURE 67 – Évolutions journalières de l'humidité absolue de l'air à 1.5 m du sol dans la modalité non-végétalisée (MNV) et dans la modalité végétalisée de la rue (MV).

La qualité du sous-modèle de culture qui a été intégré au logiciel pour la prise en compte du végétal peut aussi être évaluée sur les valeurs des humidités absolues de l'air. En effet, celles-ci sont fortement impactées par plusieurs variables (transpiration des arbres, tem-

pérature de feuille, résistance stomatique, résistance aérodynamique) qui sont calculées dans le sous-modèle de culture. Sur la FIGURE 67, nous pouvons clairement observer que l'humidité absolue de l'air dans le houppier est beaucoup surestimée par le modèle numérique. Comme on peut aussi le voir sur la FIGURE 67, les indicateurs statistiques présentés dans la TABLE 28 montrent que les erreurs sont quasiment liées au sous-modèle de culture (RMSE et EBM ayant des valeurs faibles dans la modalité non-végétalisée et des valeurs assez fortes dans la modalité végétalisée).

		MNV	MN
Température du Sol	R ²	0.90	0.88
	EBM (°C)	0.42	1.56
	RMSE (°C)	2.39	1.99
Température du mur Est	R ²	0.85	0.80
	EBM (°C)	0.60	0.78
	RMSE (°C)	1.47	1.33
Température du mur Ouest	R ²	0.74	0.90
	EBM (°C)	1.03	1.55
	RMSE (°C)	2.12	0.90
Température de l'air à 40 cm	R ²	0.93	0.95
	EBM (°C)	1.99	2.37
	RMSE (°C)	2.28	2.59
Humidité absolue à 150 cm	R ²	0.98	0.57
	EBM (g.m ⁻³)	-0.03	0.88
	RMSE (g.m ⁻³)	0.32	1.28

TABLE 28 – Indicateurs statistiques sur les écarts entre les valeurs numériques et expérimentales dans la modalité non-végétalisée (MNV) et dans la modalité végétalisée (MV).

La qualité de simulation du sous-modèle de culture peut également être évaluée grâce au bilan énergétique réalisé sur le couvert végétal et grâce à la température de feuille qui

en est issue. Les évolutions journalières des différents termes du bilan énergétique (qui sont indirectement des sorties du sous-modèle de culture) présentées sur la FIGURE 68 montrent que celui-ci est conservé à chaque instant. Le rayonnement net absorbé par les arbres est intégralement converti en flux de chaleur latente et en flux de chaleur sensible. La température de feuille est revanche surestimée par le modèle (FIGURE 69).

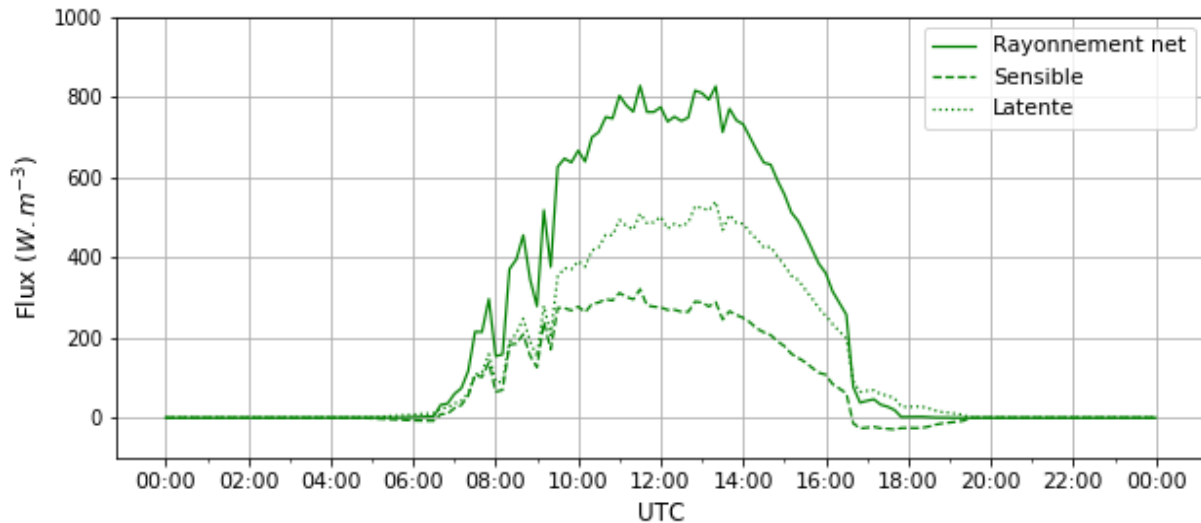


FIGURE 68 – Évolutions journalières des termes du bilan énergétique dans le houppier.

L'évolution journalière de la transpiration des arbres est montrée sur la FIGURE 70. Elle permet de voir que la transpiration des arbres est étroitement corrélée au rayonnement solaire incident. La transpiration est cependant surestimée par le modèle numérique car son cumul sur la journée (qui est de 5.5 L d'eau) est supérieur à la transpiration calculée par le bilan hydrique l'irrigation apportée aux arbres pendant les expériences (qui est de 1.97 L d'eau en moyenne par arbre).

6.3.5 Impact des arbres sur le rayonnement incident

Les champs du rayonnement courtes longueurs d'onde incident présentés sur la FIGURE 71 permettent de voir que la course journalière du soleil a bien été intégrée par le modèle numérique. L'ombrage dans la rue provoqué par les murs d'une part, et par les arbres d'autre part, y est clairement visible. Quant au rayonnement grandes longueurs d'onde

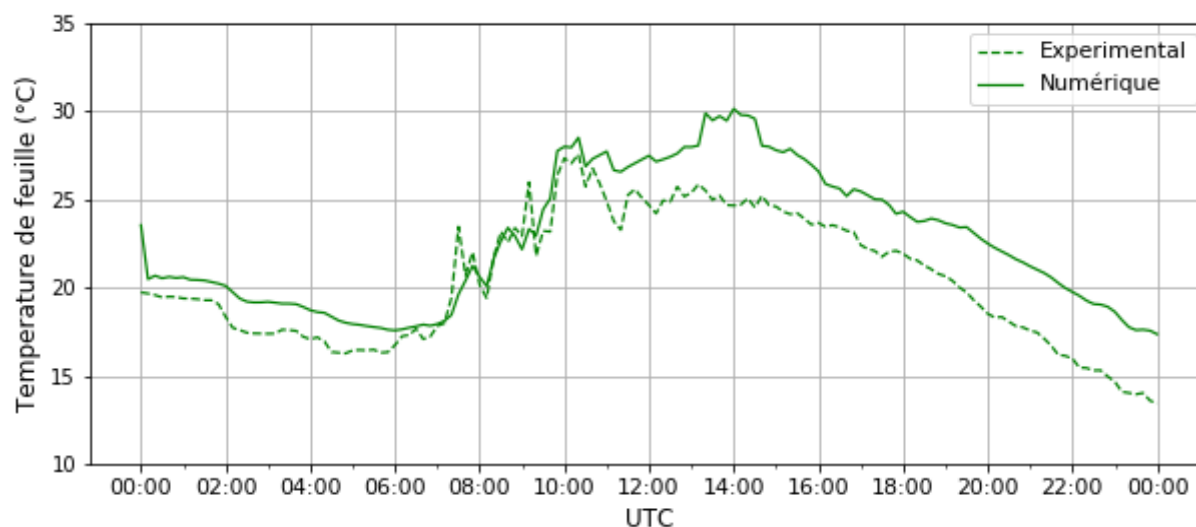


FIGURE 69 – Évolution journalière des températures de feuille. La valeur numérique est une valeur intégrée sur l'ensemble du houppier

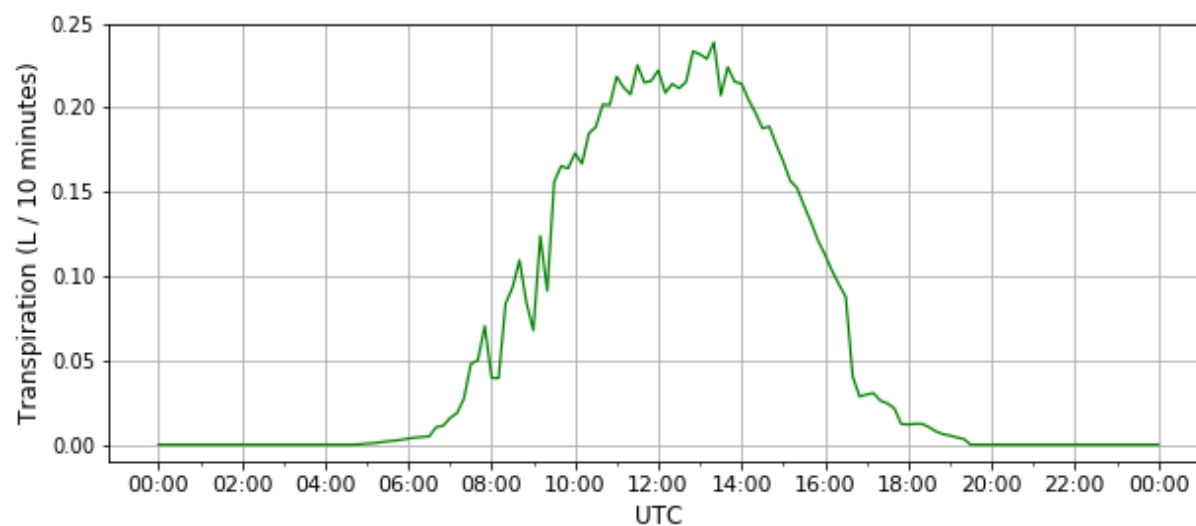


FIGURE 70 – Évolution journalière de la transpiration simulée.

incident, la FIGURE 72 montre qu'il n'est pas impacté par les arbres. Sur les FIGURE 71 et FIGURE 72, les valeurs numériques du rayonnement dans les différentes cellules semblent surestimées. Cela est lié au fait qu'il peut y avoir dans une cellule

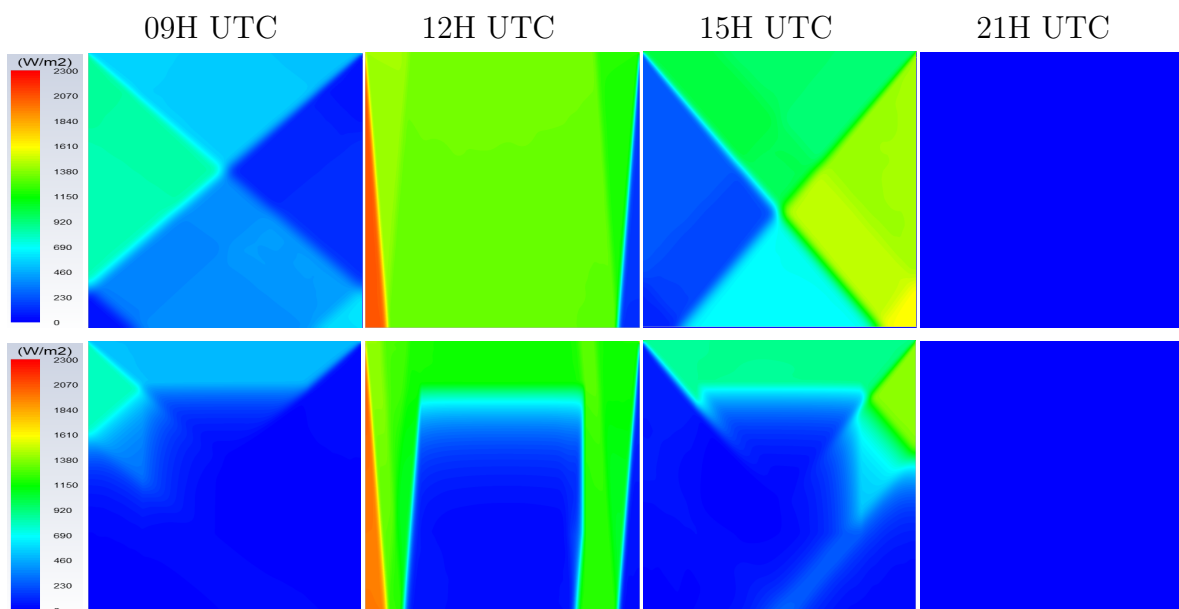


FIGURE 71 – Champs de rayonnement courtes longueurs d’onde à l’intérieur de la rue dans la modalité non-végétalisée (au-dessus) et dans la modalité végétalisée (en dessous).

plusieurs point de calcul pour le rayonnement en raison de la discrétisation angulaire que nécessite le modèle DO. Les valeurs affichées par le logiciel FLUENT sont donc des cumuls sur toute la cellule (issue du maillage cartésien) des valeurs du rayonnement sur les différents points de calcul (issus de la discrétisation angulaire).

6.3.6 Impact des arbres sur la température de l’air

Le rayonnement solaire a un impact sur les températures de parois qui, à leur tour, ont un impact sur la température de l’air dans la rue. Les champs de températures d’air montrés sur la FIGURE 73 permettent de voir que, plus une paroi intercepte du rayonnement courtes longueurs d’onde (provenant directement du soleil ou indirectement par réflexion des autres parois), plus les particules fluides à proximité de celle-ci sont chauffées.

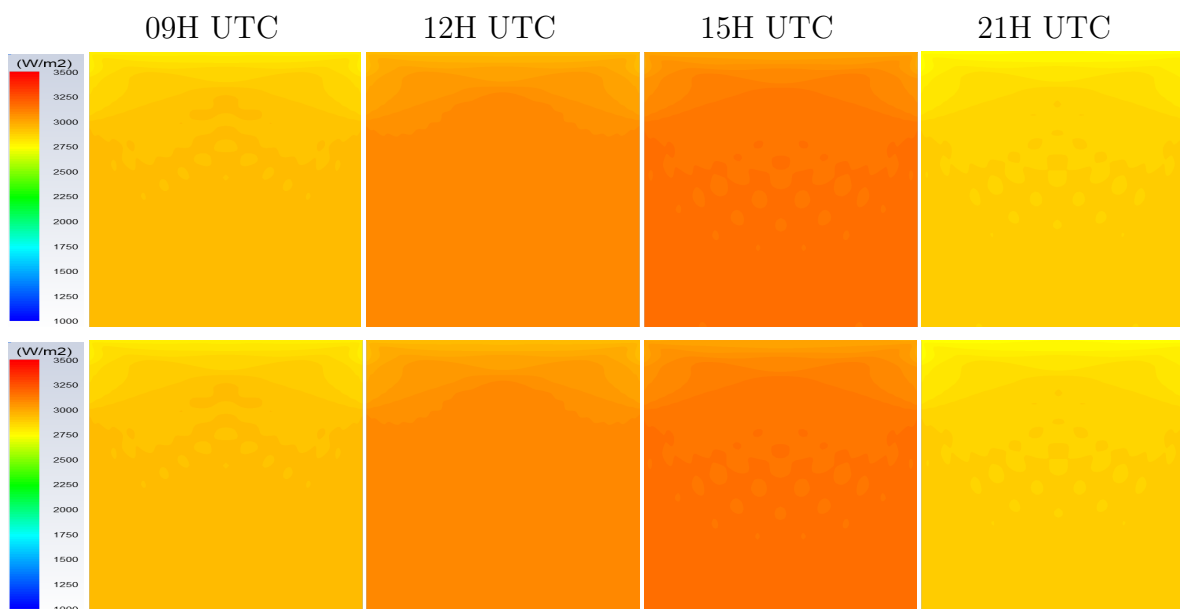


FIGURE 72 – Champs de rayonnement grandes longueurs d’onde à l’intérieur de la rue dans la modalité non-végétalisée (au-dessus) et dans la modalité végétalisée (en dessous).

6.3.7 Impact des arbres sur la vitesse de l’air

Le nombre de Richardson a été défini dans le **Chapitre 5**. Les champs du module de la vitesse du vent à l’intérieur de la rue canyon dans la modalité non-végétalisée et dans la modalité végétalisée sont présentés sur la FIGURE 76. Dans la modalité non-végétalisée de la rue canyon, à 09 :00 UTC, comme l’indiquent les valeurs du nombre de Richardson ($Ri = -0.17$ dans la modalité non-végétalisée, et $Ri = 0.00$ dans la modalité végétalisée), l’écoulement de l’air à l’intérieur de la rue canyon est toujours en régime de convection mixte dans les deux modalités. Les effets thermiques (qui ne sont pas encore très importants) n’ont pas beaucoup d’impact sur l’écoulement de l’air. Le vortex principal à l’intérieur de la rue se forme principalement sous l’effet du vent incident (FIGURE 75). À 12 :00 UTC ($Ri = -0.36$ dans la modalité non-végétalisée, et $Ri = 0.00$ dans la modalité végétalisée), les effets thermiques sont toujours modérés (même s’ils sont plus importants dans la modalité non-végétalisée en raison des températures de parois plus élevées que celles dans la modalité végétalisée). La convection thermique est toujours

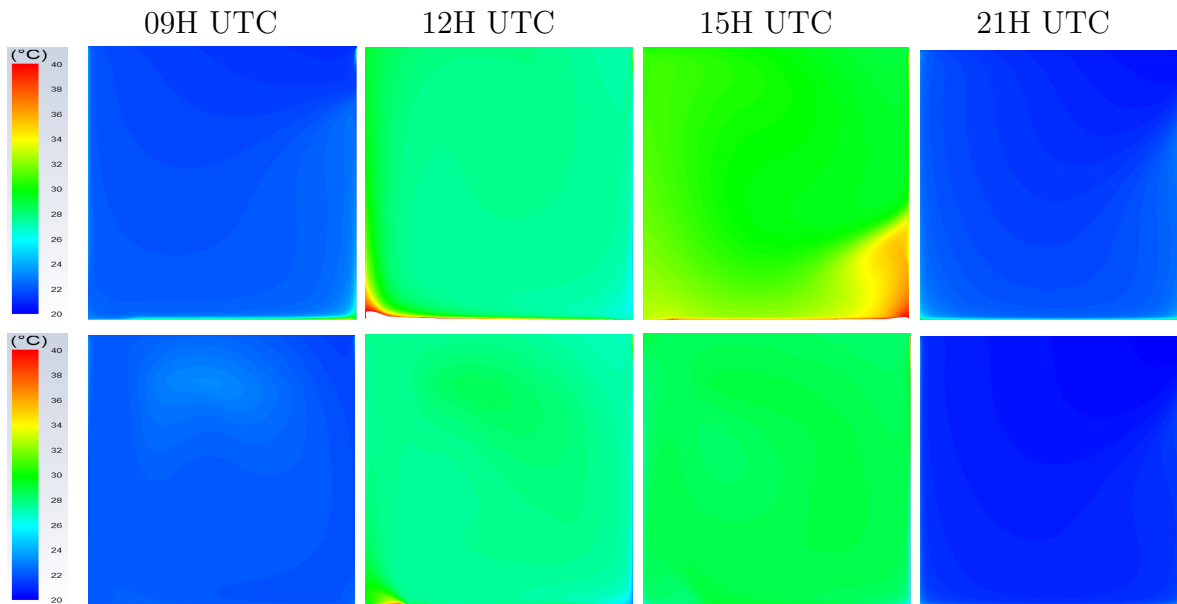


FIGURE 73 – Champs de températures d’air à l’intérieur de la rue canyon dans la modalité non-végétalisée (au-dessus) et dans la modalité végétalisée (en dessous).

en régime mixte. Le soleil se trouvant au Zénith et chauffant donc principalement le sol, les particules fluides en contact avec celui-ci deviennent plus légères (parce que chauffées) et renforcent le vortex principal qui se forme à l’intérieur de la rue sous l’effet du vent incident. Pour la même raison que pour la température du sol, la température du mur Ouest (qui est maintenant importante en raison de son exposition au soleil durant toute la matinée) renforce également la formation d’un vortex principal central à l’intérieur de la rue. À 15 :00 ($Ri = -0.25$ dans la modalité non-végétalisée, et $Ri = -0.06$ dans la modalité végétalisée), les effets thermiques restent toujours modérés dans la rue, et la convection thermique y est toujours en régime mixte. En revanche, la chauffe du mur Est (qui est maintenant exposé au soleil) modifie l’écoulement de l’air auprès de celui-ci. En effet, la chauffe des particules fluides en contact avec le mur Est conduit celles-ci à remonter la paroi chaude, et donc à s’opposer à la circulation du vent à l’intérieur de la rue canyon. À 21 :00 UTC ($Ri = -0.20$ dans la modalité non-végétalisée, et $Ri = -0.11$ dans la modalité végétalisée), le soleil s’est couché, et les effets thermiques deviennent faibles, voire nuls. La convection thermique reste en revanche en régime mixte, et le vortex

central à l'intérieur de la rue se rétablit sans aucune contrainte liée à la thermique.

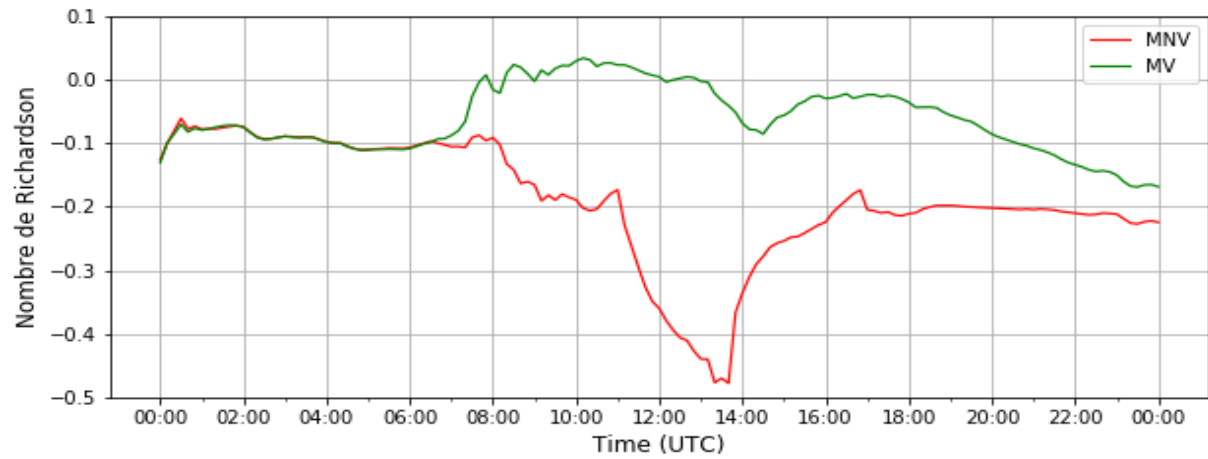


FIGURE 74 – Évolutions journalières du nombre de Richardson dans la modalité non-végétalisée (MNV) et dans la modalité végétalisée de la rue (MV).

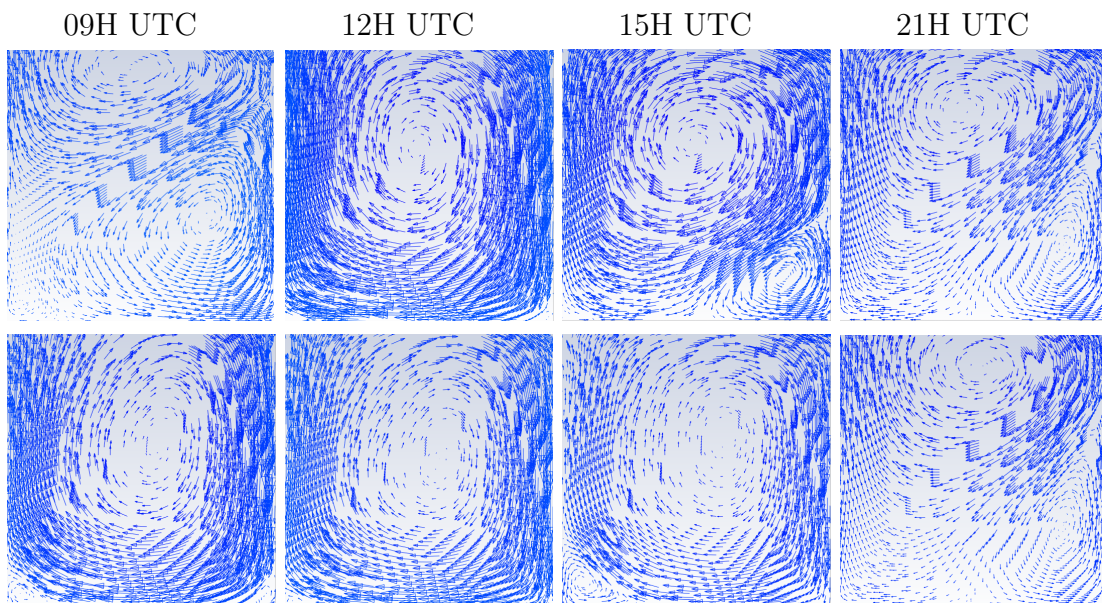


FIGURE 75 – Champs de vecteurs vitesse à l'intérieur de la rue canyon dans la modalité non-végétalisée (au-dessus) et dans la modalité végétalisée (en dessous).

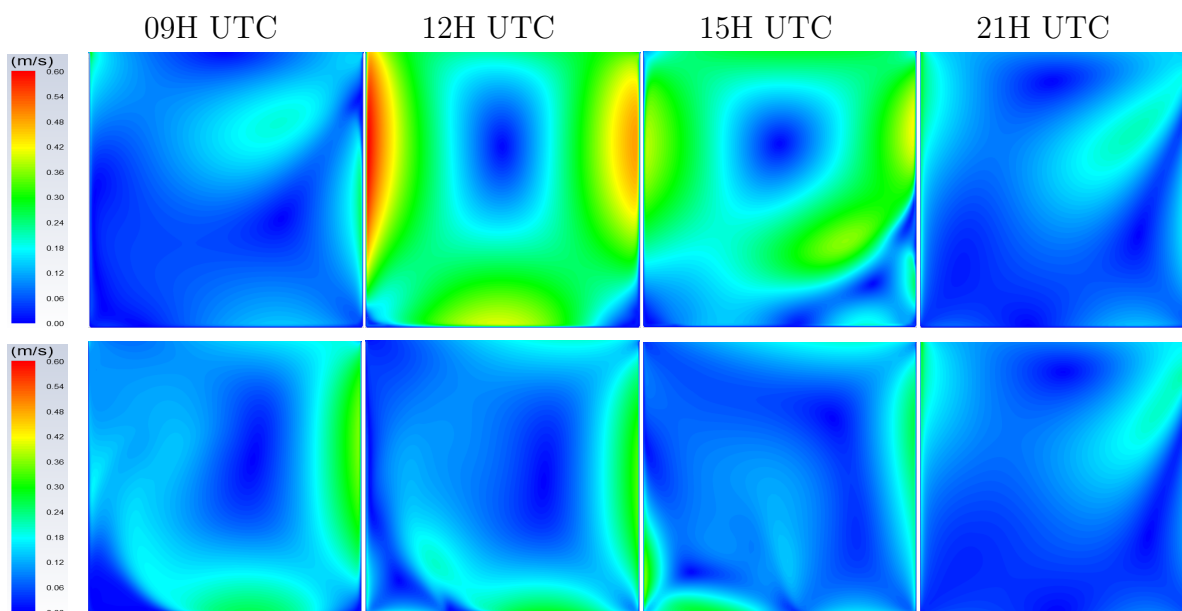


FIGURE 76 – Champs du module de la vitesse du vent à l’intérieur de la rue canyon dans la modalité non-végétalisée (au-dessus) et dans la modalité végétalisée (en dessous).

Pour étudier l’impact des arbres sur la vitesse du vent à l’intérieur de la rue canyon, nous nous intéressons aux profils du module de la vitesse du vent à l’intérieur de la rue sur l’axe horizontal transversal passant par le point central de la rue et sur l’axe vertical passant par le point central de la rue. Sur l’axe horizontal transversal passant par le point central, la FIGURE 77 montre, et c’est également visibles sur les champs des vecteurs vitesse (FIGURE 75) et sur les champs du module de la vitesse (FIGURE 76), que les arbres n’ont pas un grand impact sur le module de la vitesse du vent au coeur du houppier (on peut néanmoins voir que les particules d’air sont légèrement accélérées à proximité des murs). En revanche, sur l’axe vertical passant par le point central de la rue, la vitesse de l’air est clairement impactée par la présence des arbres (milieu poreux).

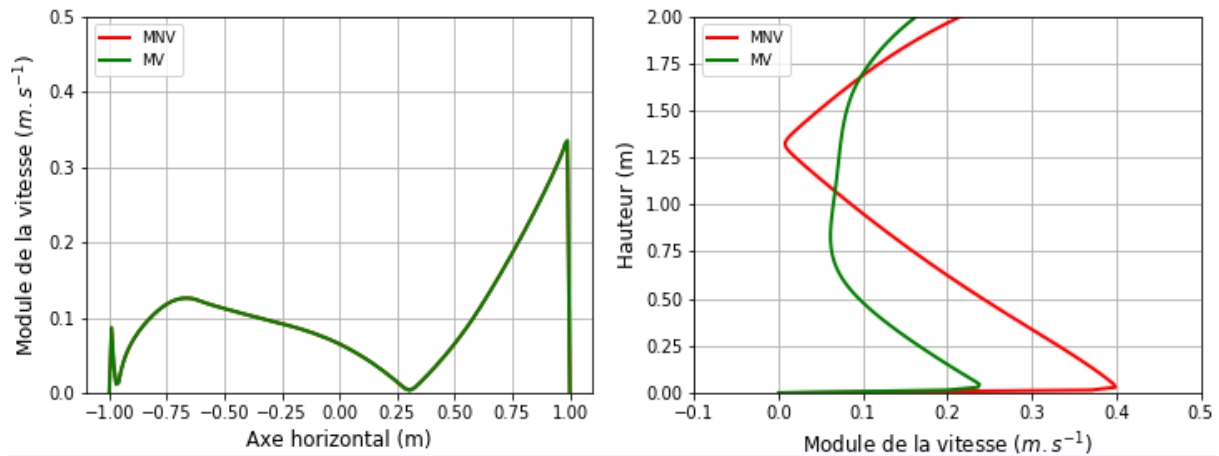


FIGURE 77 – Profil du module de la vitesse du vent à l’intérieur de la rue sur l’axe horizontal transversal passant par le point central de la rue (à gauche) et sur l’axe vertical passant par le point central de la rue (à droite). Les résultats sont représentés sont issus du modèle numérique (à 12 H UTC).

6.3.8 Impact des arbres sur l’humidité de l’air

Les champs de température de feuille dans le houppier, de transpiration dans le houppier, d’humidité absolue de l’air à l’intérieur de la rue et d’humidité relative de l’air à l’intérieur de la rue sont présentés respectivement sur la FIGURE 78, FIGURE 79, FIGURE 80 et FIGURE 81. On peut y constater que la température de feuille n’est pas homogène dans le houppier et qu’elle peut atteindre des valeurs très élevées (jusqu’à 50 °C) sur la partie supérieure du houppier. La surestimation de la transpiration par le modèle numérique est clairement visible sur les humidités absolues qui peuvent atteindre des valeurs élevées au centre du houppier. L’humidité absolue et la température ayant des effets inverses sur l’humidité relative, on peut constater sur les champs d’humidité relative de l’air que l’effet de la surchauffe du houppier et l’effet de la surestimation de la transpiration des arbres par le modèle numérique se compensent pour donner des valeurs d’humidités relatives qui semblent être correctes (qui collent avec les données expérimentales).

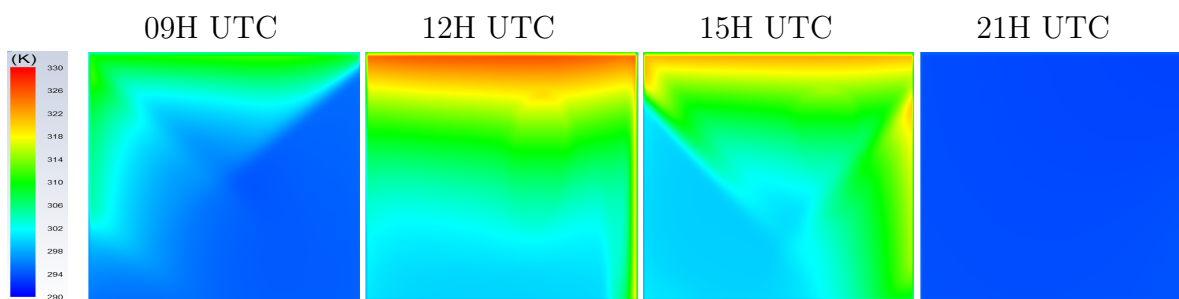


FIGURE 78 – Champs de températures de feuille dans le houppier.

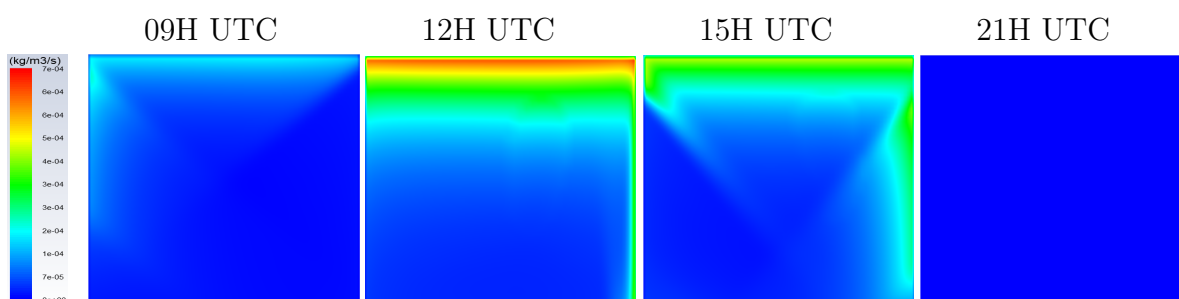


FIGURE 79 – Champs de transpiration dans le houppier.

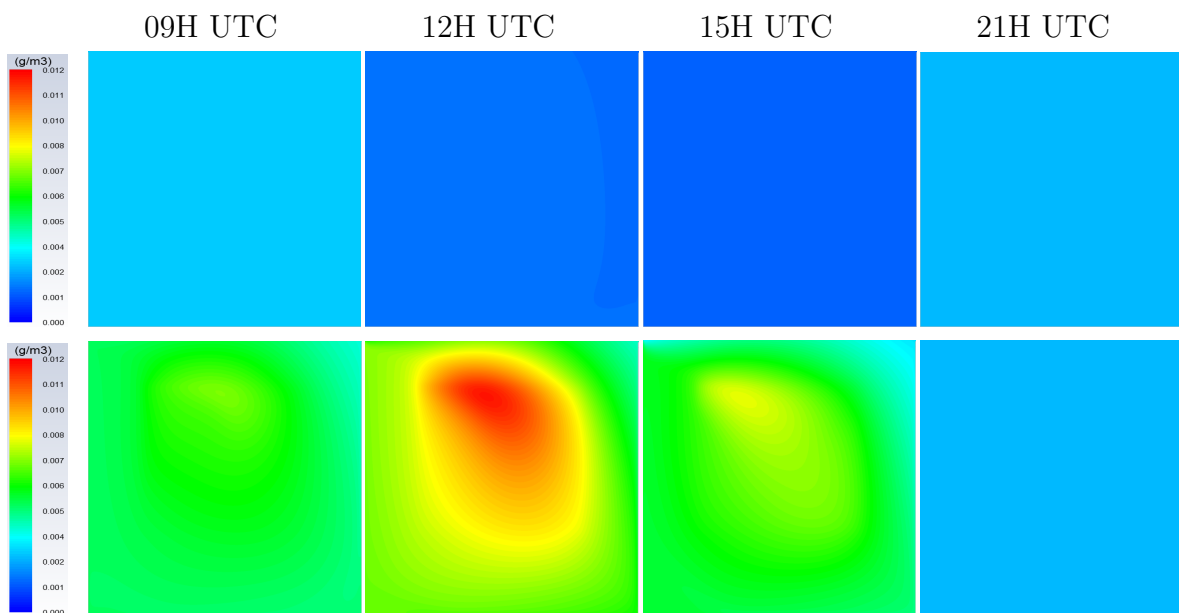


FIGURE 80 – Champs d’humidités absolues à l’intérieur de la rue canyon dans la modalité non-végétalisée (au-dessus) et dans la modalité végétalisée (en dessous).

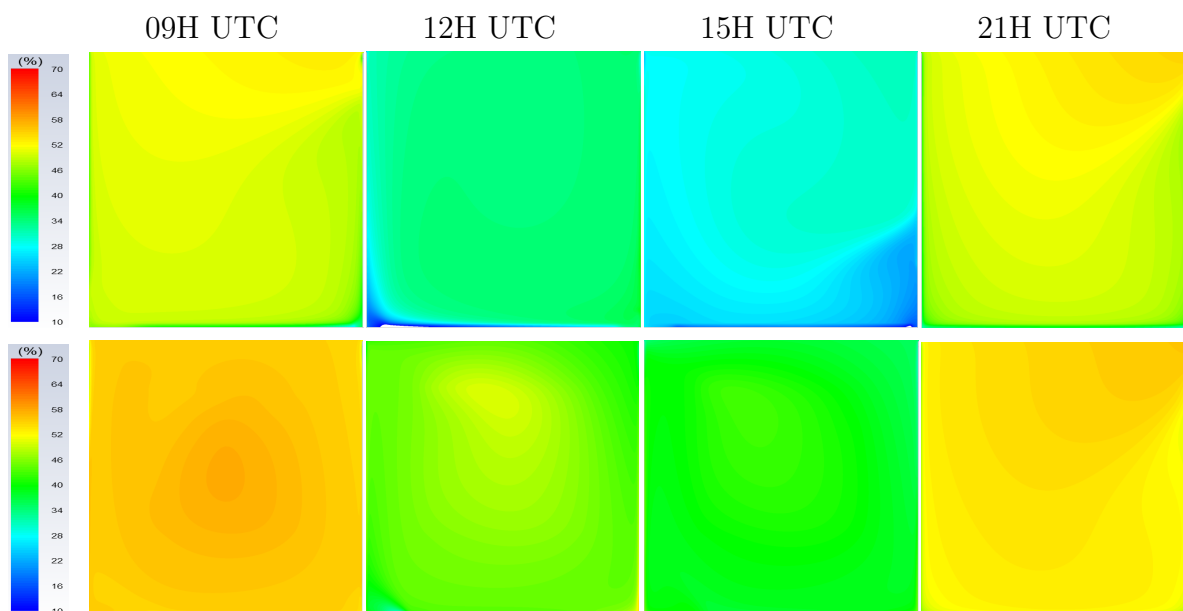


FIGURE 81 – Champs d’humidités relatives de l’air à l’intérieur de la rue canyon dans la modalité non-végétalisée (au-dessus) et dans la modalité végétalisée (en dessous).

6.4 Synthèse

En conclusion, nous avons constaté que le modèle numérique fournit des résultats acceptables pour certaines variables (vitesse du vent, températures de l’air, températures de parois) et des résultats en désaccord avec les données expérimentales pour d’autres variables telles que la température de feuille, la transpiration végétale et l’humidité absolue de l’air. Pour les températures de parois, on observe des écarts faibles au début de la simulation numérique mais qui s’amplifient avec l’ensoleillement avant d’atteindre une valeur maximale (et constante pour le reste de la simulation) de l’ordre de 5 °C vers la mi-journée. Si les dynamiques lentes sont globalement bien reproduites dans le modèle microclimatique, les dynamiques rapides le sont moins probablement en raison d’une surestimation de l’inertie des matériaux. L’utilisation de propriétés thermiques et optiques mesurées dans la rue pourrait réduire les écarts observés entre les valeurs expérimentales et numériques. La surestimation de la transpiration végétale (et donc de l’humidité absolue de l’air) est une conséquence de la surestimation de la température de

feuille dans le sous-modèle de culture. En effet, le flux de chaleur latente dépend de la température de feuille (via l'humidité absolue de la feuille) qui, elle, est issue d'un bilan énergétique réalisé sur le végétal. Une erreur pourrait être liée au coefficient d'extinction du rayonnement qui, expérimentalement, a été calé sur le rayonnement PAR, alors que, numériquement, nous avons considéré l'ensemble du spectre courtes longueurs d'onde. Le facteur d'extinction est peut-être également surestimé dans le modèle numérique du fait qu'il a été déterminé à partir de mesures de rayonnement réalisées au midi solaire avec des feuilles qui semblent assez horizontales, alors que le matin ou l'après-midi, le rayonnement direct va toucher ces feuilles avec un angle plus rasant.

Chapitre 7

Conclusion et perspectives

Ce travail de thèse s’inscrivait dans un contexte de changement climatique global et de l’intérêt que portent les chercheurs pour la compréhension du microclimat en milieu urbain. La lutte contre la multiplication des vagues de chaleur en ville est devenue un véritable défi. Le rôle des arbres dans la réduction des températures d’air en ville a clairement été démontré dans de nombreuses études. Les services climatiques rendus par les arbres dépendent en revanche de nombreux paramètres souvent non-contrôlés en ville, comme la disponibilité en eau dans le sol. L’objectif de cette thèse était d’étudier, par une expérimentation en échelle réduite en milieu extérieur et par une approche de climat distribué de type CFD, l’impact du milieu urbain sur le microclimat d’une part, et l’impact d’arbres en confort hydrique sur le microclimat urbain d’autre part. Cette thèse trouve sa principale originalité sur le fait qu’elle fournit une vue d’ensemble de plusieurs variables (vent, rayonnement, températures de parois, températures d’air, transpiration, humidités...) et phénomènes intervenant dans le microclimat urbain. Cela a permis d’évaluer l’importance relative de chaque variable ou phénomène, et a donc contribué à faire progresser la compréhension de l’impact de la végétation à l’échelle microclimatique, dans des conditions rencontrées en milieu urbain. Une autre originalité de ce travail de thèse réside dans le fait que le sol était instrumenté pour permettre le contrôle de son statut hydrique, tandis que cette information est rarement disponible dans les études de climatologie urbaine. L’étude des mécanismes (flux d’eau pour la transpiration, prise en compte de l’influence des variables climatiques sur la résistance climatique, suivi de la température de feuille) à l’interface entre les compartiments du continuum sol-plante-atmosphère est également une originalité de ce travail de thèse.

Des campagnes de mesures ont été réalisées sur une rue canyon à l’échelle $((1/5)^e)$, avec deux parties arborées et une partie non-arborée, orientée Nord-Sud, et installée en milieu extérieur sur le site de l’Institut Agro, à Angers, France. Le continuum sol-plante-atmosphère était instrumenté en capteurs pour permettre l’accès à la quasi-totalité des variables dont dépend le microclimat. Pour contrôler le statut hydrique du sol et s’assurer que les arbres étaient en confort hydrique, des capteurs ont été installés dans le compartiment racinaire. Des mesures relatives au végétal (surface foliaire, de températures de feuille, de résistance stomatique et d’interception du rayonnement...) ont été réalisées pour caractériser les arbres. Le compartiment atmosphérique a été instrumenté

de manière à permettre aussi l'accès aux données permettant d'évaluer le confort humain thermique à hauteur d'homme. Le dispositif expérimental était aussi destiné à fournir des données permettant d'alimenter et de valider le modèle numérique qui a été mis en œuvre. Du point de vue numérique, le développement d'un modèle allant d'une simulation purement aéraulique en régime stationnaire à une simulation en régime instationnaire intégrant tous les phénomènes ayant un impact sur le microclimat à l'intérieur de la rue canyon (aéraulique, thermique, rayonnement, transport de vapeur d'eau, intégration du végétal) a été mis en œuvre de manière progressive. La turbulence a été traitée par l'activation du modèle $k - \varepsilon$ RNG. Le rayonnement a été résolu par le biais du modèle aux ordonnées discrètes avec une distinction entre le rayonnement courtes longueurs d'onde et le rayonnement grandes longueurs d'onde (modèle bi-bandes). La prise en compte du végétal a été opérée par un sous-modèle de culture prenant en compte la force de traînée exercée par le végétal sur l'air (qui induit une perte de charge dans le végétal), le bilan énergétique sur le houppier, et la perte de vapeur d'eau par le végétal. L'amélioration de certaines fonctions standard du logiciel FLUENT (comme imposer un profil de vitesse en loi puissance en entrée du domaine de calcul, initialisation du domaine de calcul) et la réalisation de calculs bien spécifiques à notre problème (comme le calcul de la température de feuille, calcul des termes source...) ont été entreprises grâce à des routines spécifiques.

Comme indiqué dans le **Chapitre 5**, ce travail de thèse est probablement parmi les premières études dans lesquelles des arbres d'alignement sont utilisés comme solution de végétalisation dans une rue canyon en milieu extérieur à échelle réduite. Cela a rendu difficile la confrontation de nos résultats expérimentaux avec la littérature. Cependant, malgré des solutions de végétalisation et des configurations de rues parfois différentes, nous avons observé pour les différentes variables climatiques qui ont été mesurées des tendances qui sont en accord avec celles observées dans la littérature. Les données expérimentales ont permis de constater que, pour une journée ensoleillée, la rue et les bâtiments qui la composent peuvent intercepter 32% de l'énergie solaire incidente sur la rue, créer une surchauffe pouvant atteindre de 2.8 °C pendant la nuit et de 2.4 °C pendant le jour, réduire les valeurs de l'UTCI jusqu'à 8 °C. Quant aux arbres, les résultats expérimentaux ont montré que, pour une journée ensoleillée, ils peuvent intercepter jusqu'à 53% du rayonnement incident sur la rue, réduire jusqu'à 2.7 °C la température

de l'air à l'intérieur de la rue, réduire jusqu'à 18 °C la température du sol, réduire jusqu'à 8 °C l'UTCI. Le modèle numérique reproduit correctement la dynamique temporelle de certaines variables (température de l'air, température de parois, température de feuille), surestime les valeurs numériques des températures de parois et de la température de l'air et surestime fortement les valeurs numériques de la température de feuille, de la transpiration et de l'humidité absolue. La surestimation de certaines variables par le modèle est probablement liée aux limites d'une modélisation bi-dimensionnelle et à la difficulté à rendre compte avec précision des propriétés thermiques et radiatives des différents matériaux.

Plusieurs stages ont été réalisés dans le cadre de cette thèse. Entre mars et septembre 2019, [Sabri \(2019\)](#) a effectué un stage portant sur la caractérisation expérimentale du microclimat en milieu urbain végétalisé. Ce premier stage a surtout servi à mettre au point le protocole expérimental en 2019, et à mettre en évidence la nécessité d'améliorer certains points du protocole qui ont ainsi pu être pris en compte pendant la campagne de mesures de 2020. C'est également dans le cadre de ce premier stage qu'a été déterminé le coefficient d'ajustement (α) de la loi en puissance du profil théorique du vent incident qui a été utilisé dans le modèle numérique. Un deuxième stage portant sur la caractérisation expérimentale des services climatiques rendus par des arbres en milieu urbain en confort hydrique a été réalisé par [Manteau \(2020\)](#) entre mai et septembre 2020. Entre autres travaux réalisés, ce stage a notamment permis le suivi du bilan hydrique des arbres pour le calcul de la transpiration, et le calcul d'indices de confort thermique qui a conduit à la publication de l'article ([Mballo et al., 2021](#)). Entre mars et septembre 2020, [Boukouya \(2020\)](#) a effectué un stage sur l'effet du milieu urbain sur l'écophysiologie et le développement des arbres. C'est dans le cadre de ce troisième stage qu'ont été déterminées les caractéristiques du milieu poreux (dimensions, LAI, LAD) ayant permis la modélisation numérique des arbres. Entre avril et septembre 2021, [Kerbaa \(2021\)](#) a effectué un stage principalement axé sur le volet numérique. Ayant porté sur une simulation 3D du climat dans une rue canyon, les résultats de ce stage n'ont pas été utilisés dans cette thèse, mais ont permis de faire un premier pas sur le prolongement de son volet numérique.

Au niveau de la valorisation scientifique, l'exploitation des données expérimentales de la

campagne de mesures de 2020 a permis la publication d'un article portant sur l'impact d'arbres en confort hydrique sur le microclimat à l'intérieur d'une rue canyon en échelle réduite installée en milieu extérieur dans le journal **Urban climate** (Mballo et al., 2021). L'article a été soumis en novembre 2020 et accepté avril 2021. Un acte de congrès sur l'influence du rayonnement solaire sur les champs d'écoulement et de températures d'air (Mballo et al., 2020) a été rédigé et soumis pour un symposium en Russie. Quand il sera complètement validé, le modèle numérique sera utilisé pour étudier l'influence de différents paramètres tels que le rapport d'aspect, l'orientation de la rue par rapport au vent et à la course du soleil, les propriétés physiques des matériaux (conductivité thermique, chaleur spécifique...), les propriétés radiatives de la surface (albédo), ou les propriétés du couvert végétal (LAI, LAD, coefficient d'extinction du rayonnement incident, dimensions du houppier) sur les bénéfices climatiques des arbres, afin d'aider à la prise de décision des urbanistes. Cette étude fera l'objet d'une publication.

Concernant les perspectives, ce travail de thèse peut être amélioré notamment sur le plan numérique en :

- utilisant des propriétés thermiques et optiques mesurées sur la rue plutôt que celles de la littérature.
- mettant en œuvre une simulation 3D afin de reproduire correctement la turbulence et les phénomènes radiatifs.
- validant le sous-modèle de culture sur des jeux de données plus importants.
- utilisant, pour le sous-modèle de culture, d'autres jeux de données pour les paramètres qui interviennent dans le calcul de la température de feuille comme la densité foliaire, le coefficient d'extinction du rayonnement incident, la résistance stomatique.

La réflexion sur la transposition des résultats en échelle réelle est également à poursuivre. Deux thèses sont actuellement en cours de réalisation dans l'unité EPHor de l'Institut Agro et s'inscrivent principalement dans le prolongement des travaux qui ont été engagés durant cette thèse. Outre la mise en œuvre d'un modèle numérique 3D, la thèse de **Thierry (2021)**, en collaboration entre l'unité EPHor et l'université Gustave Eiffel, ajoutera une partie restriction hydrique avec, en plus, des comparaisons inter-espèces sur la

base de données acquises dans la ville de Paris. Des résultats sur l'impact de la restriction hydrique ont déjà été obtenus dans le cadre du stage de [Maturana \(2021\)](#) en appui à de la thèse de [Thierry \(2021\)](#). Les résultats ont montré qu'une restriction hydrique modérée impactait fortement la transpiration, mais peu les bénéfices climatiques. Cela est cohérent avec la balance transpiration/ombrage qui était établie dans le **Chapitre 5**. Le prolongement de cette thèse sur les aspects écophysologiques sera abordé dans le cadre de la thèse de [Canonne \(2021\)](#), encadrée en collaboration par EPHOR, UMR IRHS et UMR PIAF. Cette thèse se penchera sur la complémentarité entre la rue canyon et un dispositif multi-espèces (à échelle réduite) qui reste à construire, permettant de comparer le comportement de différentes espèces soumises aux mêmes conditions environnementales.

Aux aménageurs d'espaces verts, nous recommandons d'utiliser :

- une végétation haute (un arbre par exemple) pour pouvoir bénéficier des effets d'ombrage qui sont particulièrement intéressants pour réduire le stress thermique.
- une rangée d'arbres centrale pour les rues orientées Nord-Sud car cette disposition semble être la plus optimale pour maximiser l'ombrage sur l'ensemble de la journée.

Bibliographie

- Aboelata, A. (2020). Vegetation in different street orientations of aspect ratio (H/W 1 :1) to mitigate UHI and reduce buildings' energy in arid climate. *Building and Environment*, 172 :106712.
- ADEME (2015). Aménager avec la nature en ville. Technical report.
- ADEME (2017). Diagnostic de la surchauffe urbaine. Technical report.
- Ai, Z. and Mak, C. (2017). CFD simulation of flow in a long street canyon under a perpendicular wind direction : Evaluation of three computational settings. *Building and Environment*, 114 :293–306.
- Akbari, H. (1992). Cooling our Communities. A Guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing. page 246.
- Allegrini, J. (2018). A wind tunnel study on three-dimensional buoyant flows in street canyons with different roof shapes and building lengths. *Building and Environment*, 143 :71–88.
- Allegrini, J., Dorer, V., and Carmeliet, J. (2013). Wind tunnel measurements of buoyant flows in street canyons. *Building and Environment*, 59 :315–326.
- Allegrini, J., Dorer, V., and Carmeliet, J. (2014). Buoyant flows in street canyons : Validation of CFD simulations with wind tunnel measurements. *Building and Environment*, 72 :63–74.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., and Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. *Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations*, 56 :26–40.

- Amrom, V. (2018). Lois de paroi pour les écoulements turbulents présentant des gradients de pression adverses. Technical report.
- Andreou, E. (2014). The effect of urban layout, street geometry and orientation on shading conditions in urban canyons in the Mediterranean. *Renewable Energy*, 63 :587–596.
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research : a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1) :1–26. _eprint : <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/joc.859>.
- Asaeda, T., Ca, V. T., and Wake, A. (1996). Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmospheric Environment*, 30(3) :413–427.
- Athamena, K., Sini, J.-F., Rosant, J.-M., and Guilhot, J. (2018). Numerical coupling model to compute the microclimate parameters inside a street canyon : Part II : Experimental validation of air temperature and airflow. *Solar Energy*, 170 :470–485.
- Avissar, R., Avissar, P., Mahrer, Y., and Bravdo, B. A. (1985). A model to simulate response of plant stomata to environmental conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 34(1) :21–29.
- Bacholle, C., Leclerc, B., and Coppin, Y. (2006). Inventaire des pratiques en France Etat de l’art des connaissances liées aux impacts de ces pratiques. page 4.
- Baik, J.-J., Kang, Y.-S., and Kim, J.-J. (2007). Modeling reactive pollutant dispersion in an urban street canyon. *Atmospheric Environment*, 41(5) :934–949.
- Baik, J.-J., Kwak, K.-H., Park, S.-B., and Ryu, Y.-H. (2012). Effects of building roof greening on air quality in street canyons. *Atmospheric Environment*, 61 :48–55.
- Balczó, M. (2014). Wind tunnel measurement of surface wind conditions around buildings using the sand erosion technique.

- Basha, N., Kovacevic, A., and Rane, S. (2019). User defined nodal displacement of numerical mesh for analysis of screw machines in FLUENT. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, 604(1) :012012.
- Bassam, M. (2007). Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. page 330.
- Battista, G., Evangelisti, L., Guattari, C., and Vollaro, R. D. L. (2015). On the Influence of Geometrical Features and Wind Direction over an Urban Canyon Applying a FEM Analysis. *Energy Procedia*, 81 :11–21.
- Blackman, K., Perret, L., Savory, E., and Piquet, T. (2015). Field and wind tunnel modeling of an idealized street canyon flow. *Atmospheric Environment*, 106 :139–153.
- Blom, J. (1968). The Influence of Changes in Surface Roughness on the Development of the Turbulent Boundary Layer in the Lower Layers of the Atmosphere.
- Bouhoun Ali, H. (2016). *Impact d'une restriction hydrique sur des cultures sous serre : Expérimentation et modélisation des bilans d'énergie et de masse (eau)*. PhD thesis, Agrocampus Ouest.
- Boukouya, A. (2020). Effet du milieu urbain sur l'écophysologie et le développement des arbres. Technical report, INRAE Pays de la Loire.
- Boulard, T., Baille, A., Mermier, M., and Villette, F. (1991). Mesures et modélisation de la résistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomates de serre. *Agronomie*, 11(4) :259–274.
- Boulard, T., Roy, J.-C., Pouillard, J.-B., Fatnassi, H., and Grisey, A. (2017). Modelling of micrometeorology, canopy transpiration and photosynthesis in a closed greenhouse using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 158 :110–133.
- Boulard, T. and Wang, S. (2002). Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34(1-3) :173–190.

- Bourbia, F. and Awbi, H. (2004). Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate. *Renewable Energy*, 29(2) :249–262.
- Bournet, P. E., Ould Khaoua, S. A., and Boulard, T. (2007). Numerical prediction of the effect of vent arrangements on the ventilation and energy transfer in a multi-span glasshouse using a bi-band radiation model. *Biosystems Engineering*, 98(2) :224–234.
- Bouyer, J. (2009). *Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*. phdthesis, Université de Nantes.
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., and Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities : A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3) :147–155.
- Bozonnet, E., Allard, F., Chazelas, M., Guarracino, G., and Musy, M. (2011). Du bâtiment à la ville, du microclimat à la demande énergétique. page 23.
- Britton, C. M. and Dodd, J. D. (1976). Relationships of photosynthetically active radiation and shortwave irradiance. page 7.
- Bröde, P., Fiala, D., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., and Havenith, G. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int J Biometeorol*, page 14.
- Buccolieri, R., Santiago, J.-L., Rivas, E., and Sanchez, B. (2018). Review on urban tree modelling in CFD simulations : Aerodynamic, deposition and thermal effects. *Urban Forestry & Urban Greening*, 31 :212–220.
- Błażejczyk, K., Kuchcik, M., Błażejczyk, A., Milewski, P., and Szmyd, J. (2014). Assessment of urban thermal stress by UTCI – experimental and modelling studies : an example from Poland. *DIE ERDE – Journal of the Geographical Society of Berlin*, 145(1-2) :16–33. Number : 1-2.
- Cannavo, P., Guénon, R., Galopin, G., and Vidal-Beaudet, L. (2018). Technosols made with various urban wastes showed contrasted performance for tree development during a 3-year experiment. *Environmental Earth Sciences*, 77(18) :650.

- Cannavo, P., Vidal-Beaudet, L., and Grosbellet, C. (2014). Prediction of long-term sustainability of constructed urban soil : impact of high amounts of organic matter on soil physical properties and water transfer. *Soil Use and Management*, 30(2) :272–284.
- Canonne, D. (2021). *Comment choisir des essences d’arbres adaptées aux épisodes de sécheresse et de chaleur en ville pour garantir leur pérennité et atténuer l’effet d’îlot de chaleur urbain ?* PhD thesis, Institut Agro, Angers, France.
- Cantat, O. (2004). L’îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, (191) :75–102.
- Cha, H.-J. and Song, T.-H. (2000). Discrete Ordinates Interpolation Method Applied to Irregular Three-Dimensional Geometries. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, 24(6) :814–821. Publisher : The Korean Society of Mechanical Engineers.
- Chen, G., Wang, D., Wang, Q., Li, Y., Wang, X., Hang, J., Gao, P., Ou, C., and Wang, K. (2020). Scaled outdoor experimental studies of urban thermal environment in street canyon models with various aspect ratios and thermal storage. *Science of The Total Environment*, 726 :138147.
- Chen, X.-L., Zhao, H.-M., Li, P.-X., and Yin, Z.-Y. (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 104(2) :133–146.
- Cheng, W. C., Liu, C.-H., and Leung, D. Y. C. (2009). On the comparison of the ventilation performance of street canyons of different aspect ratios and Richardson number. *Building Simulation*, 2(1) :53–61.
- Cheung, P. K. and Jim, C. Y. (2018). Comparing the cooling effects of a tree and a concrete shelter using PET and UTCI. *Building and Environment*, 130 :49–61.
- Choudhury, B. J. and Idso, S. B. (1985). An empirical model for stomatal resistance of field-grown wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 36(1) :65–82.

- Colombert, M. (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. page 541.
- Correa, E., Ruiz, M. A., Canton, A., and Lesino, G. (2012). Thermal comfort in forested urban canyons of low building density. An assessment for the city of Mendoza, Argentina. *Building and Environment*, 58 :219–230.
- Cousteix, J. (1989). *Turbulence et couche limite*. Cépaduès-éditions. Google-Books-ID : 2iVeKAAACAAJ.
- Coutts, A. M., White, E. C., Tapper, N. J., Beringer, J., and Livesley, S. J. (2016). Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(1-2) :55–68.
- Currie, B. A. and Bass, B. (2008). Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystems*, 11(4) :409–422.
- Damour, G. (2008). *Bases théoriques et approches expérimentales de la modélisation des effets de la contrainte hydrique sur les échanges gazeux foliaires du manguier et du litchi*. PhD thesis, Université de la Réunion.
- Damour, G., Simonneau, T., Cochard, H., and Urban, L. (2010). An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant, Cell & Environment*, 33(9) :1419–1438.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon : exposition et application ...* Victor Dalmont. Google-Books-ID : DOwbgyt_MzQC.
- Djedjig, R. (2013). *Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain*. PhD thesis, Université de La Rochelle.
- Djedjig, R., Bozonnet, E., and Belarbi, R. (2015a). Analysis of thermal effects of vegetated envelopes : Integration of a validated model in a building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 86 :93–103.
- Djedjig, R., Bozonnet, E., and Belarbi, R. (2015b). Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10(1) :34–44.

- Djedjig, R., Bozonnet, E., and Belarbi, R. (2016). Modeling green wall interactions with street canyons for building energy simulation in urban context. *Urban Climate*, 16 :75–85.
- Doya, M., Bozonnet, E., and Allard, F. (2012). Experimental measurement of cool facades' performance in a dense urban environment. *Energy and Buildings*, 55 :42–50.
- Eliasson, I. (1996). Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmospheric Environment*, 30(3) :379–392.
- Escourrou, G. (1991). Le climat et la ville. Editions Nathan.
- FAO56 (2006). FAO Irrigation and Drainage Paper. page 333.
- Fatnassi, H., Boulard, T., Poncet, C., and Chave, M. (2006). Optimisation of Greenhouse Insect Screening with Computational Fluid Dynamics. *Biosystems Engineering*, 93(3) :301–312.
- Fernando, H. (2010). Fluid Dynamics of Urban Atmospheres in Complex Terrain. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 42(1) :365–389.
- Fernholz, H. H. and Finley, P. J. (1996). The incompressible zero-pressure-gradient turbulent boundary layer : An assessment of the data. *Progress in Aerospace Sciences*, 32(4) :245–311.
- Fiala, D. (2010). Physiological modeling for technical clinical and research applications. *Frontiers in Bioscience*, S2(3) :939–968.
- Frazza, L. (2015). Utilisation conjointe de lois de parois et modèles bas-Reynolds. page 104.
- Garcia Sagrado, A. P., van Beeck, J., Rambaud, P., and Olivari, D. (2002). Numerical and experimental modelling of pollutant dispersion in a street canyon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(4-5) :321–339.
- Gebert, L., Coutts, A., and Tapper, N. (2019). The influence of urban canyon microclimate and contrasting photoperiod on the physiological response of street trees and the

- potential benefits of water sensitive urban design. *Urban Forestry & Urban Greening*, 40 :152–164.
- Georgakis, C. and Santamouris, M. (2006). Experimental investigation of air flow and temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes. *Energy and Buildings*, 38(4) :367–376.
- Gillner, S., Vogt, J., Tharang, A., Dettmann, S., and Roloff, A. (2015). Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites. *Landscape and Urban Planning*, 143 :33–42.
- Givoni, B. (1978). L’homme, l’architecture et le climat.
- Granate, P., Coelho, P. J., and Roger, M. (2016). Radiative heat transfer in strongly forward scattering media using the discrete ordinates method. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 172 :110–120.
- Gromke, C., Blocken, B., Janssen, W., Merema, B., van Hooff, T., and Timmermans, H. (2015). CFD analysis of transpirational cooling by vegetation : Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. *Building and Environment*, 83 :11–26.
- Gromke, C., Buccolieri, R., Di Sabatino, S., and Ruck, B. (2008). Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations – Evaluation of CFD data with experimental data. *Atmospheric Environment*, 42(37) :8640–8650.
- Guellal, A. (2018). Stage de fin d’études : Simulation numérique du climat dans une rue canyon. Technical report, Agrocampus Ouest, Unité EPHor.
- Guidelines VDI 3783, B. . (2000). *Environmental meteorology - Physical modelling of flow and dispersion processes in the atmospheric boundary layer - Application of wind tunnels*.
- Harman, I. N., Barlow, J. F., and Belcher, S. E. (2004). Scalar fluxes from urban street canyons part II : model. *Boundary-Layer Meteorology*, 113(3) :387–410.

- Havenith, G. (2005). Temperature Regulation, Heat Balance and Climatic Stress. In Kirch, W., Bertollini, R., and Menne, B., editors, *Extreme Weather Events and Public Health Responses*, pages 69–80. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Holmer, B. and Eliasson, I. (1999). Urban–rural vapour pressure differences and their role in the development of urban heat islands. *International Journal of Climatology*, 19(9) :989–1009.
- Hong, S.-W., Zhao, L., and Zhu, H. (2018). CFD simulation of pesticide spray from air-assisted sprayers in an apple orchard : Tree deposition and off-target losses. *Atmospheric Environment*, 175 :109–119.
- Hu, L. H., Huo, R., and Yang, D. (2009). Large eddy simulation of fire-induced buoyancy driven plume dispersion in an urban street canyon under perpendicular wind flow. *Journal of Hazardous Materials*, 166(1) :394–406.
- Huang, Y.-d., Zeng, N.-b., Liu, Z.-y., Song, Y., and Xu, X. (2016). Wind tunnel simulation of pollutant dispersion inside street canyons with galleries and multi-level flat roofs. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 28(5) :801–810.
- Hunter, L. J., Johnson, G. T., and Watson, I. D. (1992). An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 26(4) :425–432.
- Hussain, M. and Lee, B. E. (1980). A wind tunnel study of the mean pressure forces acting on large groups of low-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 6(3) :207–225.
- Idczak, M., Mestayer, P., Rosant, J.-M., Sini, J.-F., and Violleau, M. (2007). Micro-meteorological Measurements in a Street Canyon during the Joint ATREUS-PICADA Experiment. *Boundary-Layer Meteorology*, 124(1) :25–41.
- Irmak, S. and Mutiibwa, D. (2009). On the Dynamics of Stomatal Resistance : Relationships between Stomatal Behavior and Micrometeorological Variables and Performance of Jarvis-Type Parameterization. *Transactions of the ASABE*, 52 :1923–1939.

- Isaev, S. A. and Lysenko, D. A. (2004). Testing of the Fluent Package in Calculation of Supersonic Flow in a Step Channel. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 77(4) :857–860.
- Jamei, E., Rajagopalan, P., Seyedmahmoudian, M., and Jamei, Y. (2016). Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54 :1002–1017.
- Jarvis, P. G. (1976). The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 273(927) :593–610.
- Jia, F., Ims, J., Wang, Z. J., Kopriva, J., and Laskowski, G. M. (2019). Evaluation of Second- and High-Order Solvers in Wall-Resolved Large-Eddy Simulation. *AIAA Journal*, 57(4) :1636–1648. Publisher : American Institute of Aeronautics and Astronautics
_eprint : <https://doi.org/10.2514/1.J057232>.
- Kastendeuch, P., Najjar, G., and Ringenbach, N. (2006). Modélisation du bilan radiatif et d'énergie d'un canyon urbain à Strasbourg. *Climatologie*, (Volume 3).
- Kastner-Klein, P., Berkowicz, R., and Britter, R. (2004). The influence of street architecture on flow and dispersion in street canyons. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87(1-3).
- Kastner-Klein, P., Fedorovich, E., and Rotach, M. (2001). A wind tunnel study of organised and turbulent air motions in urban street canyons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89(9) :849–861.
- Kellnerová, R., Kukačka, L., Jurčáková, K., Uruba, V., and Jaňour, Z. (2012). PIV measurement of turbulent flow within a street canyon : Detection of coherent motion. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104-106 :302–313.
- Kerbaa, A. (2021). Simulation 3D du climat dans une rue canyon. Technical report, Intitut Agro, Unité EPHor.

- Kichah, A., Bournet, P.-E., Migeon, C., and Boulard, T. (2012). Measurement and CFD simulation of microclimate characteristics and transpiration of an Impatiens pot plant crop in a greenhouse. *Biosystems Engineering*, 112 :22–34.
- Kim, J.-J. and Baik, J.-J. (1999). A numerical study of thermal effects on flow and pollutant dispersion in urban street canyons. *Journal of applied meteorology*, 38(9) :1249–1261.
- Kim, J.-J. and Baik, J.-J. (2001). Urban street-canyon flows with bottom heating. *Atmospheric Environment*, 35(20) :3395–3404.
- Kuddus, M. A. and Rahman, A. (2015). Affect of Urbanization on Health and Nutrition. *International Journal of Statistics and Systems*, 10 :165–175.
- Kumar, P., Garmory, A., Ketzel, M., Berkowicz, R., and Britter, R. (2009). Comparative study of measured and modelled number concentrations of nanoparticles in an urban street canyon. *Atmospheric Environment*, 43(4) :949–958.
- Kwak, K.-H., Baik, J.-J., and Lee, K.-Y. (2013). Dispersion and photochemical evolution of reactive pollutants in street canyons. *Atmospheric Environment*, 70 :98–107.
- Kántor, N., Gulyás, , and Gal, C. (2017). Relevance of urban trees and sun shades regarding summertime heat stress reduction – a field surveys from Pécs, Hungary. University of Szeged, Department of Climatology and Landscape Ecology, Szeged, 6722.
- Lauzet, N. (2019). *Prise en compte cumulée du réchauffement climatique et des surchauffes urbaines en phase amont de conception frugale des bâtiments centrée sur le confort des occupants : des propositions méthodologiques*. phd, Lorient.
- Lemonsu, A., Grimmond, C. S. B., and Masson, V. (2004). Modeling the Surface Energy Balance of the Core of an Old Mediterranean City : Marseille. *Journal of Applied Meteorology*, 43 :16.
- Li, X.-X., Leung, D. Y. C., Liu, C.-H., and Lam, K. M. (2008a). Physical Modeling of Flow Field inside Urban Street Canyons. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(7) :2058–2067.

- Li, X.-X., Liu, C.-H., and Leung, D. Y. C. (2008b). Large-Eddy Simulation of Flow and Pollutant Dispersion in High-Aspect-Ratio Urban Street Canyons with Wall Model. *Boundary-Layer Meteorology*, 129(2) :249–268.
- Liang, W., Huang, J., Jones, P., Wang, Q., and Hang, J. (2018). A zonal model for assessing street canyon air temperature of high-density cities. *Building and Environment*, 132 :160–169.
- Liu, C.-H., Barth, M. C., and Leung, D. Y. C. (2004). Large-Eddy Simulation of Flow and Pollutant Transport in Street Canyons of Different Building-Height-to-Street-Width Ratios. *Journal of Applied Meteorology*, 43(10) :1410–1424.
- Liu, H.-Y., Gao, X.-W., and Xu, B.-B. (2019). An implicit free element method for simulation of compressible flow. *Computers & Fluids*, 192 :104276.
- Llaguno-Munitxa, M., Bou-Zeid, E., and Hultmark, M. (2017). The influence of building geometry on street canyon air flow : Validation of large eddy simulations against wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 165 :115–130.
- Louka, P., Vachon, G., Sini, J.-F., Mestayer, P. G., and Rosant, J.-M. (2002). Thermal Effects on the Airflow in a Street Canyon – Nantes’99 Experimental Results and Model Simulations. *Water, Air and Soil Pollution : Focus*, 2(5) :351–364.
- Madalozzo, D., Braun, A., Awruch, A., and Morsch, I. (2014). Numerical simulation of pollutant dispersion in street canyons : Geometric and thermal effects. *Applied Mathematical Modelling*, 38(24) :5883–5909.
- Manteau, M. (2020). Caractérisation expérimentale des services climatiques rendus par des arbres en milieu urbain en confort hydrique. Technical report, Institut Agro, Unité EPHor, Angers, France.
- Maturana, L. (2021). Caractérisation expérimentale des services climatiques rendus par des arbres en milieu urbain en restriction hydrique. Technical report, Institut Agro, Unité EPHor, Angers, France.

- Mazria, E. (1981). *Le guide de l'énergie solaire passive*.
- Mballo, S., Herpin, S., Demotes-Mainard, S., and Bournet, P.-E. (2020). Influence of solar radiation on flow and temperature fields within a canyon street. St. Petersburg, Russia.
- Mballo, S., Herpin, S., Manteau, M., Demotes-Mainard, S., and Bournet, P. E. (2021). Impact of well-watered trees on the microclimate inside a canyon street scale model in outdoor environment. *Urban Climate*, 37 :100844.
- Mehdi, L., Pietro, F. D., Selmi, W., and Weber, C. (2017). Les services écosystémiques urbains, vers une multifonctionnalité des espaces verts publics : revue de littérature. *Environnement Urbain*, 11 :23.
- Mestayer, P. G. and Brunet, Y. (2015). Impact de la végétation urbaine sur la qualité de l'air. *Innovations Agronomiques*, 45 :35.
- Molina-Aiz, F. D., Fatnassi, H., Boulard, T., Roy, J. C., and Valera, D. L. (2010). Comparison of finite element and finite volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 72(2) :69–86.
- Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., Álvarez, A. J., and Madueño, A. (2006). A Wind Tunnel Study of Airflow through Horticultural Crops : Determination of the Drag Coefficient. *Biosystems Engineering*, 93(4) :447–457.
- Monteith, J. and Unsworth, M. (2013). *Principles of Environmental Physics : Plants, Animals, and the Atmosphere*. Academic Press. Google-Books-ID : EhLtk6hkLogC.
- Moonen, P., Dorer, V., and Carmeliet, J. (2011). Evaluation of the ventilation potential of courtyards and urban street canyons using RANS and LES. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(4) :414–423.
- Morille, B. (2012). Elaboration d'un modèle de climat distribué à l'échelle de l'abri et de la plante en cultures ornementales sous serre : analyse des transferts de masse et de chaleur, bilans énergétiques. page 288.

- Morille, B., Migeon, C., and Bournet, P. E. (2013). Is the Penman–Monteith model adapted to predict crop transpiration under greenhouse conditions? Application to a New Guinea Impatiens crop. *Scientia Horticulturae*, 152 :80–91.
- Musy, M. (2014). Une ville verte, les rôles du végétal en ville. Editions Quæ.
- Najjar, G., Kastendeuch, P. P., Ringenbach, N., Colin, J. R., Stoll, M. P., Nerry, F., Bernard, J., Hatten, A. D., Luhache, R., and Viville, D. (2005). Bilans radiatif et d'énergie dans un canyon urbain. *Climatologie*, (Volume 2) :41–57.
- Nakamura, Y. and Oke, T. R. (1988). Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment (1967)*, 22(12) :2691–2700.
- Niachou, K., Livada, I., and Santamouris, M. (2008). Experimental study of temperature and airflow distribution inside an urban street canyon during hot summer weather conditions. Part II : Airflow analysis. *Building and Environment*, 43(8) :1393–1403.
- Nowak, D. J., McHale, P. J., Ibarra, M., Crane, D., Stevens, J. C., and Luley, C. J. (1998). Modeling the Effects of Urban Vegetation on Air Pollution. In Gryning, S.-E. and Chaumerliac, N., editors, *Air Pollution Modeling and Its Application XII*, NATO • Challenges of Modern Society, pages 399–407. Springer US, Boston, MA.
- Oke, T. R. (1988). *Boundary layer climates*. OCLC : 51200739.
- Oke, T. R. and Maxwell, G. B. (1975). Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. *Atmospheric Environment (1967)*, 9(2) :191–200.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., and Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R., Jaffal, I., and Trabelsi, A. (2011). Assessment of green roof thermal behavior : A coupled heat and mass transfer model. *Building and Environment*, 46(12) :2624–2631.
- Park, M., Hagishima, A., Tanimoto, J., and Narita, K.-i. (2012). Effect of urban vegetation on outdoor thermal environment : Field measurement at a scale model site. *Building and Environment*, 56 :38–46.

- Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. CRC Press, Boca Raton.
- Pavageau, M. and Schatzmann, M. (1999). Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon. *Atmospheric Environment*, page 11.
- Perret, L., Blackman, K., and Savory, E. (2016). Combining Wind-Tunnel and Field Measurements of Street-Canyon Flow via Stochastic Estimation. *Boundary-Layer Meteorology*, 161(3) :491–517.
- Pigeon, G., Legain, D., Durand, P., and Masson, V. (2007). Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). *International Journal of Climatology*, 27(14) :1969–1981.
- Piscia, D., Montero, J. I., Baeza, E., and Bailey, B. J. (2012). A CFD greenhouse night-time condensation model. *Biosystems Engineering*, 111(2) :141–154.
- Poblete-Echeverría, C., Fuentes, S., Ortega-Farias, S., Gonzalez-Talice, J., and Yuri, J. A. (2015). Digital Cover Photography for Estimating Leaf Area Index (LAI) in Apple Trees Using a Variable Light Extinction Coefficient. *Sensors*, 15(2) :2860–2872. Number : 2 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Qian, D. L., Mingham, P. C. G., and Causon, P. D. M. (2011). Introductory Finite Volume Methods for PDEs. page 82.
- Qiu, G.-y., Li, H.-y., Zhang, Q.-t., Chen, W., Liang, X.-j., and Li, X.-z. (2013). Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 12(8) :1307–1315.
- Rahman, M. A., Stratopoulos, L. M. F., Moser-Reischl, A., Zölch, T., Häberle, K.-H., Rötzer, T., Pretzsch, H., and Pauleit, S. (2020). Traits of trees for cooling urban heat islands : A meta-analysis. *Building and Environment*, 170 :106606.
- Raupach, M. R., Finnigan, J. J., and Brunet, Y. (1996). Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies : The mixing-layer analogy. page 32.

- Redon, E. (2017). *Modélisation de la végétation urbaine comme régulateur thermique*. phd, Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- Redon, E., Lemonsu, A., and Masson, V. (2020). An urban trees parameterization for modeling microclimatic variables and thermal comfort conditions at street level with the Town Energy Balance model (TEB-SURFEX v8.0). *Geoscientific Model Development*, 13(2) :385–399. Publisher : Copernicus GmbH.
- Redon, E. C., Lemonsu, A., Masson, V., Morille, B., and Musy, M. (2017). Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0. *Geoscientific Model Development*, 10(1) :385–411.
- Ridha, S. (2017a). *Urban heat Island mitigation strategies in an arid climate. In outdoor thermal comfort reachable*. phd, INSA de Toulouse.
- Ridha, S. (2017b). *Urban heat Island mitigation strategies in an arid climate. In outdoor thermal comfort reachable*. phdt, INSA de Toulouse.
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y., and Liu, C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1) :120–128.
- Roache, P. J. (1972). *Computational fluid dynamics*. Hermosa Publishers, Albuquerque, N.M.
- Roberts, S. M., Oke, T. R., Voogt, J. A., Grimmond, C. S. B., and Lemonsu, A. (2003). Energy storage in a european city center. page 4.
- Robitu (2005). Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l'université de Nantes.
- Rotach, M. W. (1995). Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon. *Atmospheric Environment*, 29(13) :1473–1486.

- Rotach, M. W., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, A., Clappier, A., Feddersen, B., Gryning, S.-E., Martucci, G., Mayer, H., Mitev, V., Oke, T. R., Parlow, E., Richner, H., Roth, M., Roulet, Y.-A., Ruffieux, D., Salmond, J. A., Schatzmann, M., and Voogt, J. A. (2005). BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project. *Theoretical and Applied Climatology*, 81(3-4) :231–261.
- Roy, J. C., Boulard, T., Kittas, C., and Wang, S. (2002). PA—Precision Agriculture : Convective and Ventilation Transfers in Greenhouses, Part 1 : the Greenhouse considered as a Perfectly Stirred Tank. *Biosystems Engineering*, 83(1) :1–20.
- Sabatino, S. D., Buccolieri, R., and Salizzoni, P. (2013). Recent advancements in numerical modelling of flow and dispersion in urban areas : a short review. *International Journal of Environment and Pollution*, 52(3/4) :172.
- Sabri, M. (2019). Caractérisation expérimentale du microclimat en milieu urbain végétalisé. Technical report, Agrocampus Ouest, Unité EPHor, Angers, France.
- Sailor, D. J. and Lu, L. (2004). A top–down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmospheric Environment*, 38(17) :2737–2748.
- Salizzoni, P., Soulhac, L., and Mejean, P. (2009). Street canyon ventilation and atmospheric turbulence. *Atmospheric Environment*, 43(32) :5056–5067.
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Koronakis, I., Livada, I., and Asimakopoulos, D. (1999). Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. *Atmospheric Environment*, 33(27) :4503–4521.
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A., and Assimakopoulos, D. (2001). On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Solar Energy*, 70(3) :201–216.
- Savory, E., Perret, L., and Rivet, C. (2013). Modelling considerations for examining the mean and unsteady flow in a simple urban-type street canyon. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 121(1-2) :1–16.

- Seguin, B. (1973). Rugosite du paysage et evapotranspiration potentielle a l'échelle regionale. *Agricultural Meteorology*, 11 :79–98.
- Seguin, B. and Gignoux, N. (1974). Etude experimentale de l'influence d'un reseau de brisevent sur le profil vertical de vitesse du vent. *Agricultural Meteorology*, 13(1) :15–23.
- Shashua-Bar, L. and Hoffman, M. E. (2003). Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees. *Energy and Buildings*, 35(1) :61–68.
- Siegel, R. and Howell, J. (2002). *Thermal Radiation Heat Transfer*. CRC Press. Google-Books-ID : cksIEAAAQBAJ.
- Smaoui, H. (1996). *Modélisation numérique tridimensionnelle de l'hydrodynamisme et des transports sédimentaires en Manche Orientale et dans le Sud de la Mer du Nord*. PhD thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille.
- Snyder, W. H. (1972). Similarity criteria for the application of fluid models to the study of air pollution meteorology. *Boundary-Layer Meteorology*, 3(1) :113–134.
- Stabile, L., Arpino, F., Buonanno, G., Russi, A., and Frattolillo, A. (2015). A simplified benchmark of ultrafine particle dispersion in idealized urban street canyons : A wind tunnel study. *Building and Environment*, 93 :186–198.
- Stanghellini, C. (1987). *Transpiration of greenhouse crops : an aid to climate management*. phd, IMAG, Wageningen. Pages : -.
- Susca, T., Gaffin, S., and Dell'Osso, G. (2011). Positive effects of vegetation : Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*, 159(8-9) :2119–2126.
- Tan, W., Li, C., Wang, K., Zhu, G., Wang, Y., and Liu, L. (2018). Dispersion of carbon dioxide plume in street canyons. *Process Safety and Environmental Protection*, 116 :235–242.
- Tan, Z., Dong, J., Xiao, Y., and Tu, J. (2015). A numerical study of diurnally varying surface temperature on flow patterns and pollutant dispersion in street canyons. *Atmospheric Environment*, 104 :217–227.

- Tapper, N. J. (1990). Urban influences on boundary layer temperature and humidity : Results from Christchurch, New Zealand. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 24(1) :19–27.
- Thierry, J. (2021). *Bénéfices climatiques des arbres en ville : quel impact d'une hausse des températures et d'une réduction des apports en eau*. PhD thesis, Institut Agro, Angers, France.
- Thomasset, R. (2017). *Mieux gérer la ressource en eau en ville pour optimiser les services écosystémiques rendus par les espaces verts*. PhD thesis, Agrocampus Ouest.
- Thorpe, M. R., Warrit, B., and Landsberg, J. J. (1980). Responses of apple leaf stomata : a model for single leaves and a whole tree. *Plant, Cell & Environment*, 3(1) :23–27.
_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1365-3040.ep11580508>.
- Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., and van Heijst, G. (2017). A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80 :1613–1640.
- Toparlar, Y., Blocken, B., Vos, P., van Heijst, G., Janssen, W., van Hooff, T., Montazeri, H., and Timmermans, H. (2015). CFD simulation and validation of urban microclimate : A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam. *Building and Environment*, 83 :79–90.
- Uehara, K., Murakami, S., Oikawa, S., and Wakamatsu, S. (2000). Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons. *Atmospheric Environment*, 34(10) :1553–1562.
- United Nations (2018). *World urbanization prospects : the 2018 revision*. OCLC : 1120698127.
- Vailshery, L. S., Jaganmohan, M., and Nagendra, H. (2013). Effect of street trees on microclimate and air pollution in a tropical city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(3) :408–415.

- Vandentorren, S., Suzan, F., Medina, S., Pascal, M., Maulpoix, A., Cohen, J.-C., and Ledrans, M. (2004). Mortality in 13 French Cities During the August 2003 Heat Wave. *American journal of public health*, 94 :1518–20.
- Vidal-Beaudet, L., Grosbellet, C., Forget-Caubel, V., and Charpentier, S. (2012). Modeling long-term carbon dynamics in soils reconstituted with large quantities of organic matter. *European Journal of Soil Science*, 63(6) :787–797.
- Wang, Q., Li, Y., Hang, J., and Peng, L. (2017). The Diurnal Cycle of Urban Thermal Environment in Scale-model Street Canyons by Outdoor Field Measurement. *Procedia Engineering*, 198 :743–757.
- Wang, X.-w., Luo, J.-y., and Li, X.-p. (2013). CFD Based Study of Heterogeneous Microclimate in a Typical Chinese Greenhouse in Central China. *Journal of Integrative Agriculture*, 12(5) :914–923.
- Wanot, J. (1996). Computational fluid dynamics methods in ship design. R&D projects (1996), Germany.
- Weng, Q., Lu, D., and Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4) :467–483.
- WUCOLS (2000). Estimating Irrigation Water Needs of Landscape Plantings in California, University of California Cooperative extension and California Department of Water resources, 160p.
- Xia, B. and Sun, D.-W. (2002). Applications of computational fluid dynamics (cfd) in the food industry : a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34(1-3) :5–24.
- Xiaomin, X., Zhen, H., and Jiasong, W. (2006). The impact of urban street layout on local atmospheric environment. *Building and Environment*, 41(10) :1352–1363.
- Xiong, Y., Huang, S., Chen, F., Ye, H., Wang, C., and Zhu, C. (2012). The Impacts of Rapid Urbanization on the Thermal Environment : A Remote Sensing Study of Guangzhou, South China. *Remote Sensing*, 4(7) :2033–2056.

- Yang, L., Qian, F., Song, D.-X., and Zheng, K.-J. (2016). Research on Urban Heat-Island Effect. *Procedia Engineering*, 169 :11–18.
- Zhang, L., Zhang, Z., Feng, C., Tian, M., and Gao, Y. (2021). Impact of various vegetation configurations on traffic fine particle pollutants in a street canyon for different wind regimes. *Science of The Total Environment*, 789 :147960.
- Zhang, Y.-W., Gu, Z.-L., Cheng, Y., and Lee, S.-C. (2011). Effect of real-time boundary wind conditions on the air flow and pollutant dispersion in an urban street canyon—Large eddy simulations. *Atmospheric Environment*, 45(20) :3352–3359.

Appendices

Annexe A

Article de conférence

A.1 Influence of solar radiation on flow and temperature fields within a canyon street

S. Mballo^{1,*}, S. Herpin^{1,2}, S. Demotes-Mainard³ and P.E. Bournet^{1,2}

¹EPHor, Institut Agro, SFR 4207 QuaSaV, 49045 Angers, France

²IRSTV, FR CNRS 2488, 44321 Nantes Cedex 3, France

³Univ Angers, Institut Agro, INRAE, IRHS, SFR QUASAV, 49000 Angers, France

*souleymane.mballo@agrocampus-ouest.fr

Abstract : In a context of growing urbanization, understanding the microclimate in urban environment becomes a major issue. Canyon streets are ideal places to observe different phenomena such as vortex flows, heat transfers, absorption and reflection phenomena of solar radiation. Many experimental and numerical studies on street canyon have been undertaken during the last two decades. Several authors demonstrated that the aspect ratio of the street (height/width) together with the relative weight of buoyancy forces against inertia forces have a significant impact on air flow and on the heat transfers that occur inside the street. But only few studies associate both experimental and numerical works and include the resolution of the radiative heat transfers together with aerodynamic. The present study numerically investigates the influence of solar radiation on flow and temperature fields within a canyon street based on an experimental facility and numerical simulations. The numerical simulations were carried out with the CFD simula-

tion software, ANSYS FLUENT, using a two-dimensional unsteady approach and, taking account of radiative transfers and heat transfers in the ground and walls. An outdoor mock-up canyon street (scale 1/5) was considered to provide the boundary conditions and validation data.

A.1.1 Introduction

A recent united nation report ([United Nations, 2018](#)) indicates that there is a growing urbanization in all countries of the world, which is more accentuated in less developed countries. The growth of urbanization leads to a modification of soils used in urban areas : natural surfaces tend to be replaced by artificial surfaces. Urbanization therefore has consequences on thermal comfort of city dwellers. Among these consequences, the most known is the Urban Heat Island (UHI) phenomenon which is defined as the difference in air temperature between an urban area and a neighboring rural area, especially between sunset and sunrise ([Oke and Maxwell, 1975](#); [Yang et al., 2016](#)). The canyon streets are representative places of the urban environment. A canyon street, among other definitions, is a street continuously bordered by tall buildings. Compared to wind-tunnel studies, experiments carried out in a real outdoor environment have the advantage of being able to allow the exact reproduction of physical phenomena at stake. Many experimental studies in outdoor environment have been carried out at reduced scale ([Athamena et al., 2018](#); [Blackman et al., 2015](#); [Doya et al., 2012](#); [Idczak et al., 2007](#); [Perret et al., 2016](#); [Wang et al., 2017](#)), but the geometrical scale reduction factor (1 :2 to 1 :10) is much closer to scale 1 than typical wind-tunnel studies (of the order of 1 :200, see [Perret et al. \(2016\)](#)), allowing a better transposition at full scale, especially of the thermal effects. The increase in surface temperatures due to the solar radiation during the daytime generates buoyancy forces which can significantly change the flow near the walls, particularly under low wind conditions. Buoyancy flows can be assessed by the Richardson number which is defined as the ratio between buoyancy forces and inertia forces.

The purpose of this paper is to analyze the influence of the daily path of the sun, and thus of wall temperatures on the flow and temperatures fields inside the canyon street. The climatic variable distributions were simulated at different moments of the day cor-

responding to different Richardson numbers. Numerical results will be validated with experimental data.

A.1.2 Methodology

A mixed approach combining simulations and experiments has been implemented. Experiments are used on the one hand to provide realistic data for boundary conditions and on the other hand for the validation of numerical results.

A.1.2.1 Experimental setup

A canyon street was built at Agrocampus Ouest site in Angers (47°28' N, 0°33' E), in North-Western France. The experimental installation consists of a 1/5th scale canyon street (FIGURE 82). The street is oriented North-South and prevailing winds are mainly from West, and therefore blow perpendicular to the street. The street is approximately 16 m long and 2 m wide. The two buildings which border it are 2 m high and 2 m wide. It can therefore be described as a "regular Canyon" since its aspect ratio (ratio of the height of the buildings to the width of the street) is 1. The floor of the canyon street consists of a 0.04 m thick layer of asphalt, a 0.25 m thick layer of gravel and a layer of brown soil beyond 0.25 m in depth. The walls of the street are made of 0.1 m thick concrete, covered with white paint. The roofs and external walls of the buildings were constructed with wooden frames. The street is equipped with a set of sensors including temperature, humidity and radiation measurements.

The location of the sensors is shown in FIGURE 83. A 10 m high mast was placed outside the street, 8 m from the West building. 5 wind sensors were installed on the external mast respectively at 0.5 m, 1 m, 2 m, 5 m and 10 m from the ground. The data provided by these wind sensors was used to adjust the velocity profile of the incident wind. This wind profile obtained from experimental data will be used as an input data for the numerical model. An air temperature sensor was installed on the outside mast at 2 m from the ground. A radiation sensor was also installed at 2.2 m above the black asphalt to measure the incident radiation (short and long wavelengths). These temperature and radiation will serve as input of the numerical model. Inside the canyon street, wall temperature and heat



FIGURE 82 – Street canyon on 1/5th scale built on Institut Agro site in Angers, France.

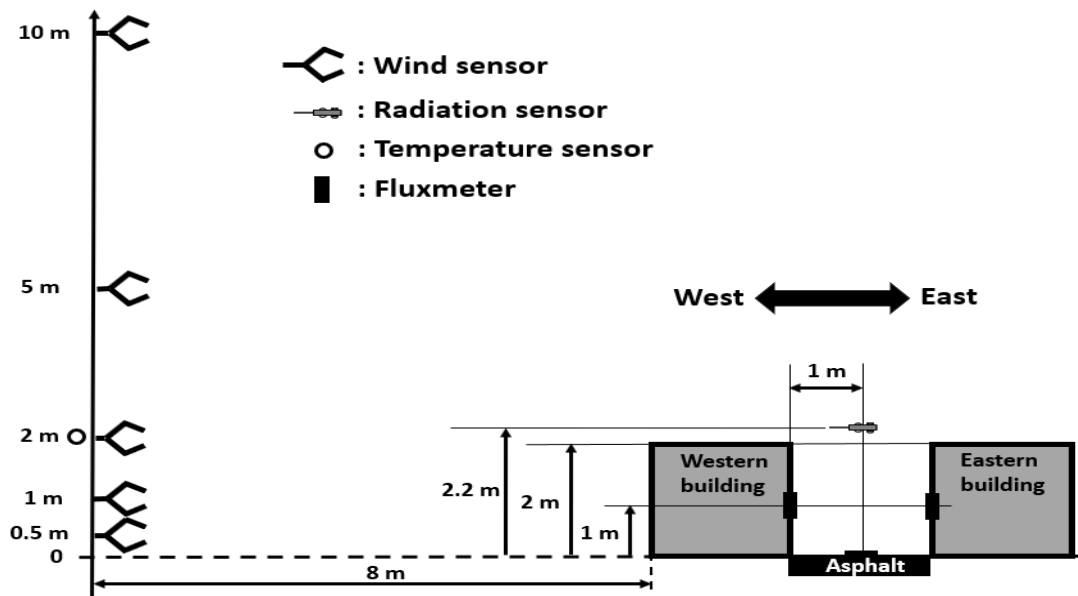


FIGURE 83 – Location of wind, temperature and radiation sensors in and outside the canyon street. The measurement plane is vertical, perpendicular to the buildings and is located 2.4 m from the south end of the street.

flux sensors (fluxmeter) were installed on both walls (at a height of 1 m from the ground) and on the ground (at a distance of 1 m from each of the two walls). The temperatures measured by these sensors will be used for the validation of the numerical model. The

characteristics of the sensors we used are provided in TABLE 29.

Measured variable	Sensor type	Measurement range	Accuracy	Reference, manufacturer
Wind speed & wind direction (street : $z = 0.4 m$)	3D sonic anemometer	0 to 30 $m s^{-1}$ 0-359°	0.08 $m s^{-1}$ $\pm 0.7^\circ$ à 1 $m s^{-1}$	CSAT3, Campbell Scientific Ltd
Wind speed & wind direction (west mast : $z = 10 m$)	2D sonic anemometer	0 to 60 $m s^{-1}$ 0-359°	$\pm 2\%$ at 12 $m s^{-1}$ $\pm 0.3^\circ$ à 12 $m s^{-1}$	Wind Sonic, Gill instrument
Wind speed & wind direction (west mast : $z = 2m$ and $z = 5m$; street : $z = 2m$)	2D sonic anemometer	0.25 to 40 $m s^{-1}$	$\pm 0.13 m s^{-1}$ $\pm 1.5^\circ$	CV7, LCJ
Solar and long wavelength radiation	Net radiometer	-	10%	CNR1, CNR4, and NR-Lite, Kipp & Zonen
Surface temperature	Fluxmeter	-30 to 70 °C	n.c.	Captec
Heat flux	Fluxmeter	Up to 150 kW	$\pm 3\%$	Captec
Air temperature	Platinum probe	-70 to 180 °C	± 0.2 °C	Pt100 HMP337, Vaisala

TABLE 29 – Characteristics of the sensors used for experiments.

A.1.2.2 Numerical approach

The numerical simulations involve the definition of a calculation domain, together with the definition of a mesh in which the conservation equations for mass, momentum and energy are solved. Boundary conditions must also be specified at the edges of the calculation domain. For the day chosen for simulations, the wind rose depicted in FIGURE 84 indicates that the winds came mostly from the West (i.e. perpendicular to the street) and that the wind speed was quite low that day (less than 1.5 m s⁻¹). The wind rose thus justifies the use of a two-dimensional modeling for our problem. The computational domain retained for the simulations is shown in FIGURE 85. This calculation domain is the same as the one used by Battista et al. (2015) i.e. 5H above the buildings, 15H upstream of the West building and 15H downstream of the East building, where H corresponds to the height of the buildings, with the only difference being that the upstream distance was extended up to 15H (compared to Battista et al. (2015) where it was 5H only) in order to correctly take account of the full path of the sun. The computational domain was then discretized.

To establish the mesh, 5 meshes were successively tested by gradually increasing the density of calculation points by a factor of 2 until independency regarding results was obtained. A structured mesh was chosen as it appears to be well suited to the relatively simple geometry of the canyon street which has rectangular blocks. Such a mesh also offers the advantage of reducing numerical diffusion compared to an unstructured mesh. The mesh is refined near the walls because strong speed and temperature gradients are expected at these places. Refining the mesh near the walls makes it also possible to reduce the number of calculation points required to reach convergence in mesh and reduce the calculation CPU time. Inside the street, 70×70 elements were chosen. The height of the first element on a building height is 0.02 m. The height of the first mesh was chosen for Y^+ values around 30. This ensures a physically acceptable numerical simulation in near-wall areas as it corresponds to the validated domain of the power law velocity profile when the k- turbulence model is activated. The final computational domain contains 359227 nodes. For the ground, the mesh was refined near the surface in contact with the air and became coarse as one descended to depth. For the mesh size, 4 cells were defined

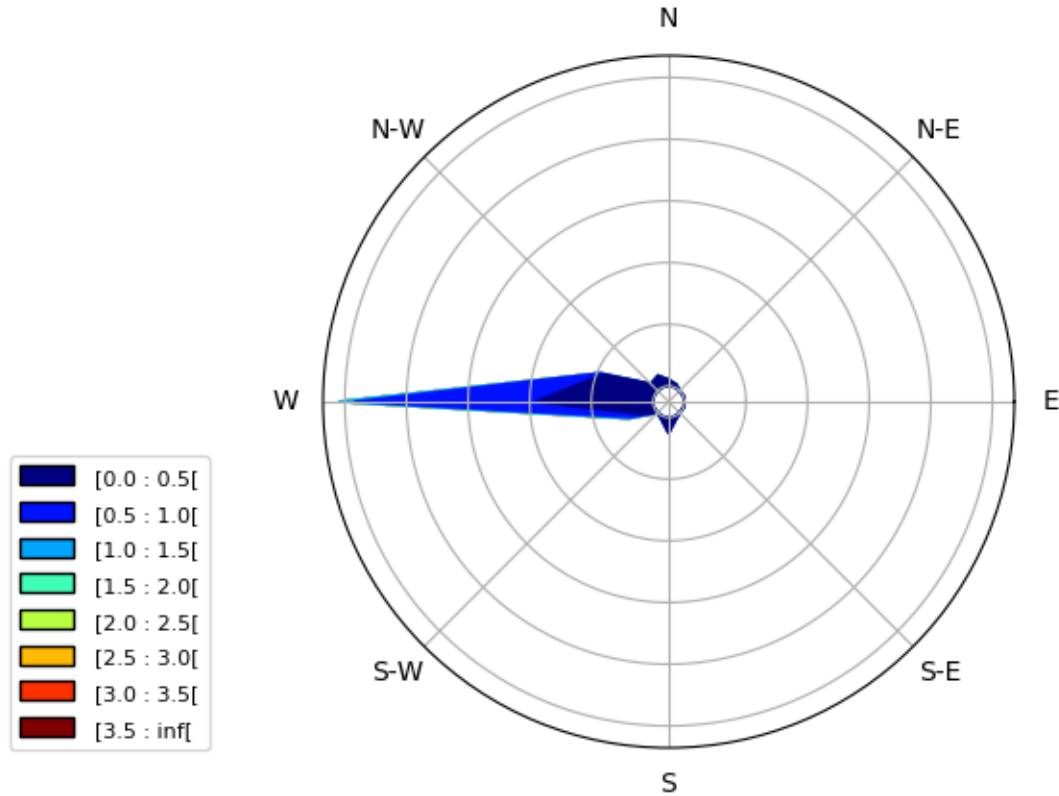


FIGURE 84 – Wind rose for the day of September 11, 2019. Wind speed and direction were measured at 2 m from the ground.

in the thickness of the asphalt and 10 in the thickness of the gravel.

A number of equations has been solved to study a set of variables such as wind speed, air temperature and radiation. The general form for transient-2D equations describing transport phenomena for non-compressible fluids is [Bournet et al. \(2007\)](#) :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \vec{\nabla}_{\varphi} \vec{V} = \vec{\nabla} \cdot (\Gamma_{\varphi} \vec{\nabla} \varphi) + S_{\varphi} \quad (106)$$

where φ represents the concentration of the transported quantity in non-dimensional

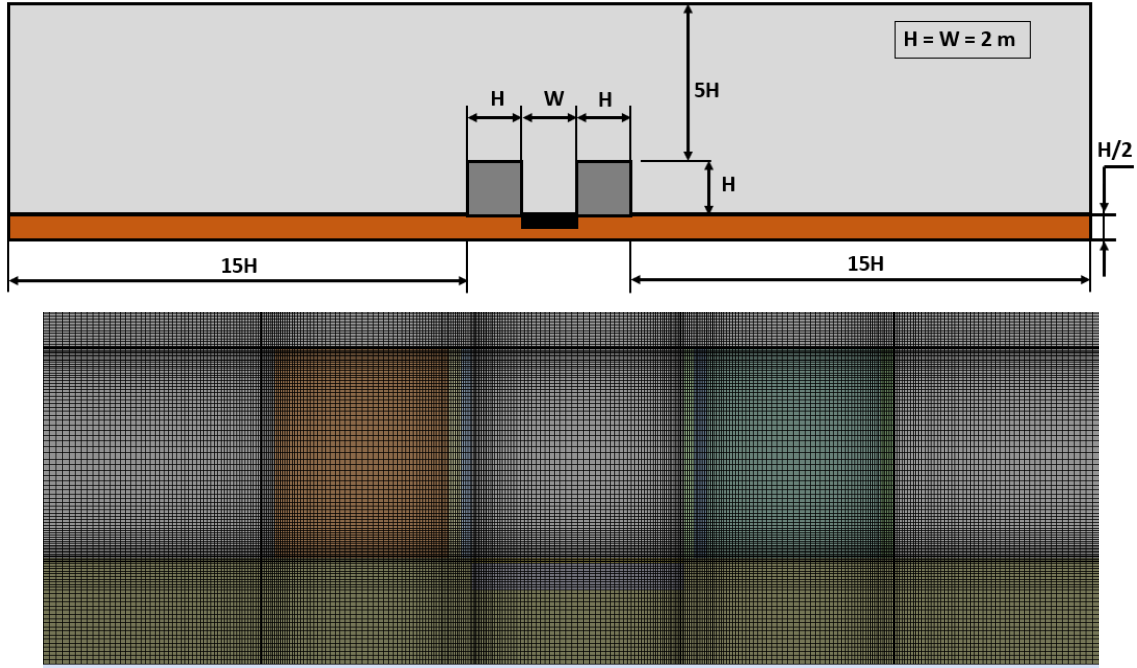


FIGURE 85 – Computational domain and its discretization around the street..

form, namely the mass, the two momentum (Navier-Stokes) and the energy conservation equations. \vec{V} is the velocity vector; Γ_φ is the diffusion coefficient and S_φ is the source term. To study radiative transfers, the Discrete Ordinates (DO) radiation model is used to solve the radiative transfer equation which can be written as :

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (107)$$

where \vec{r} is position vector, \vec{s} is the direction vector, \vec{s}' is the scattering direction vector, s is the path length, a is the absorption coefficient, n is the refractive index, σ_s is the scattering coefficient, σ is the Stefan-Boltzmann constant ($\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-4}$), I is the radiation intensity, T is the local temperature, Φ is a phase function and Ω' is solid angle.

The $k - \epsilon$ RNG turbulence model was used to solve turbulence because it is the most suitable model to solve flows with strong recirculation. This turbulence model was also

used by authors such as [Ai and Mak \(2017\)](#); [Baik et al. \(2012, 2007\)](#); [Kwak et al. \(2013\)](#) to study flows in a canyon street. Most of the turbulence models proposed in CFD software are valid only in the heart of the flow, i.e. in the flow away from the walls. An approach is therefore needed to make these turbulence models applicable near the walls. The ANSYS FLUENT software offers several options for near-wall treatment. Among these, we have chosen the "Enhanced wall treatment" option, which is the most suitable option to solve low velocity fluid flows and/or flows with high pressure gradient leading to a large boundary layer detachment as in our case. The ideal gas law was activated to consider variations in density, and hence buoyancy effects. The thermal and radiative properties of the materials are shown in TABLE 30.

	Air	Asphalt	Concrete	Ground	Wood
Density (kg m ⁻³)	1.225	1045	2500	1700	700
Specific heat (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	1006	1575	1000	1700	381
Thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.024	1.2	1.2	1.7	0.07
Albédo	-	0.1	0.7	0.23	0.4
External emissivity (long wavelenght)	-	1	1	1	1

TABLE 30 – Thermal and radiative properties of the materials. The external emissivity corresponds to the complementarity of albedo of the external surface of the material.

Concerning the boundary conditions, at the entrance of the calculation domain, a power law profile was imposed for the horizontal component of the wind speed. The power law profile is a classical law which has been used by many authors to model physical phenomena in atmospheric flows ([Gromke et al., 2008](#); [Kim and Baik, 1999](#); [Madalozzo et al., 2014](#)). The general expression of the speed profile is written as follows :

$$u(y) = u_{ref} \left(\frac{y}{y_{ref}} \right)^\alpha \quad (108)$$

where u is the mean horizontal component of wind speed, y is the vertical spatial coordinate, y_{ref} is the reference height and u_{ref} the horizontal component of the wind speed at $y = y_{ref}$. The data provided by the 5 wind sensors placed outside the street made it possible to fit the exponent ($\alpha = 0.7$) of the power law for the incident wind profile. The

fitting was realized using experimental data with the incident wind blowing perpendicular to the street i.e. at $270^\circ \pm 22.5^\circ$, and in neutral conditions (with $-0.03 < Ri < 0.03$, based on the temperature difference between 10 m and 0.4 m from the ground, and the wind velocity at 10 m height).

A condition of symmetry was imposed at the top of the computational domain. At the exit of the calculation domain, all gradients were assumed to be equal to zero except the pressure gradient. The lower limits of the computational domain were considered as non-sliding walls. From the thermal point of view, a uniform temperature was imposed at the inlet and at the upper boundary of the computational domain. A zero heat flux condition was imposed at the bottom and on the lateral sides of the floor. As for the radiation, short wavelength and long wavelength incident radiation was imposed on the upper boundary of the computational domain. A sky temperature calculated from the longwave radiation was also imposed on the lateral sides of the computational domain. The coordinates of the sun position were determined from the data (elevation and azimuth of the sun) that were downloaded from the sunearthtools website [SunEarthTools.com](https://sunearthtools.com). A projection of these data on a 2D plane was made.

A.1.3 Validation of numerical results

The daily evolutions of the incident radiation and the outside air temperature used for numerical simulations are shown in FIGURE 86. To validate the numerical model, numerical results were compared with experimental data recorded during the experimental field survey. To do this, the data of September 11, 2019 was used for the boundary conditions. The daily evolutions of the air and wall temperatures obtained for the numerical simulation are compared with experimental data in FIGURE 87. The daily evolutions of wall temperatures observed experimentally are well reproduced by the numerical model. As for the experimental data, it is also numerically observed that there is a temperature peak on the west wall in the morning (while the sun is in East and thus heats the west wall), a temperature peak on the ground at around 13 :00 UTC (while the sun is at Zenith and thus heats the ground) and a temperature peak on the east wall in the afternoon (while the sun is in west and thus heats the east wall). The reflection by the walls of

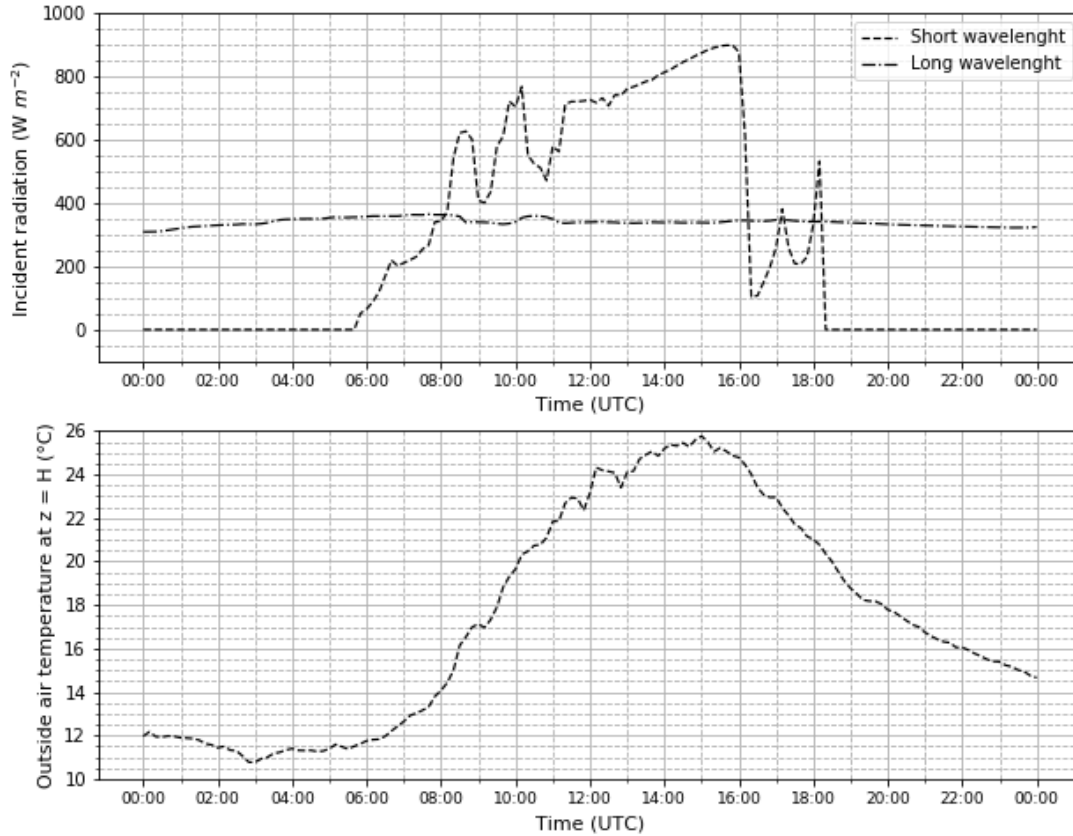


FIGURE 86 – Daily evolutions of boundary conditions used for numerical simulations, derived from experimental data (measured on September 11, 2019).

solar radiation is also well reproduced numerically since the temperature on the west wall continues to rise even during the afternoon. Despite an average over the whole day of the differences between the experimental and numerical values of 2.6 $^{\circ}C$ for the east wall, of 3.3 $^{\circ}C$ for west wall, of 1.9 $^{\circ}C$ for the air inside the street (measured at a height of 2 m), and of 6.4 $^{\circ}C$ for ground and the air on the one hand, the main daily temporal evolutions of observed temperatures are rather well predicted by the model. As numerical modeling is only an approximation of reality with a certain margin of error, we will use this model to numerically study the physical phenomena occurring inside the canyon street. The numerical results will however be interpreted considering the differences that exist between the experimental data and the numerical values.

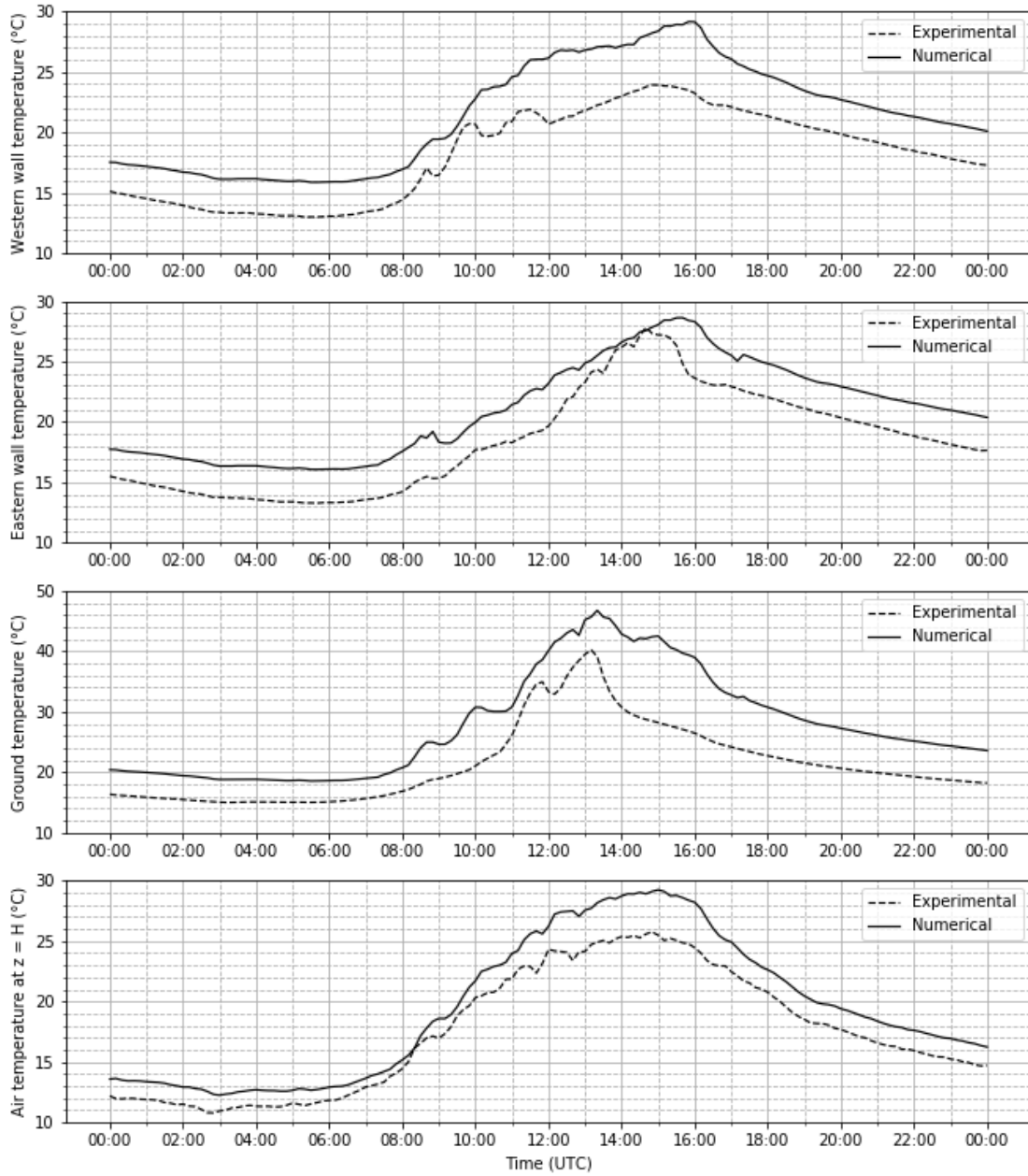


FIGURE 87 – Daily evolutions of air and surface temperatures.

A.1.4 Discussion

The increase in surface temperatures due to the solar radiation during the daytime generates buoyancy forces which can significantly change the flow near the walls, particularly under low wind conditions. Buoyancy flows can be described by the Richardson number which is defined as the ratio between buoyancy forces and inertia forces. The Richardson number is calculated by using the following formula :

$$R_i = -gH \frac{T_w - T_0}{T_0} \frac{1}{U_0^2} \quad (109)$$

where T_w is the greatest calculated wall temperature between the two walls and the ground in (K) at a given time, T_0 the air temperature in (K) calculated at the central point of the street (at 1 m from the ground) ; g the acceleration of gravity in ($m s^{-2}$) ; H is the height of buildings in (m) and U_0 is the wind speed imposed at the entrance of the calculation domain at 10 m from the ground in ($m s^{-1}$).

Convection is natural for Richardson numbers below -10, mixed for Richardson numbers between -10 and -1 and forced for Richardson numbers above -1. The Richardson number was calculated at each time step (every 10 minutes) of the numerical simulation and its daily evolution is shown in FIGURE 88. From this figure, it can be seen that the airflow in

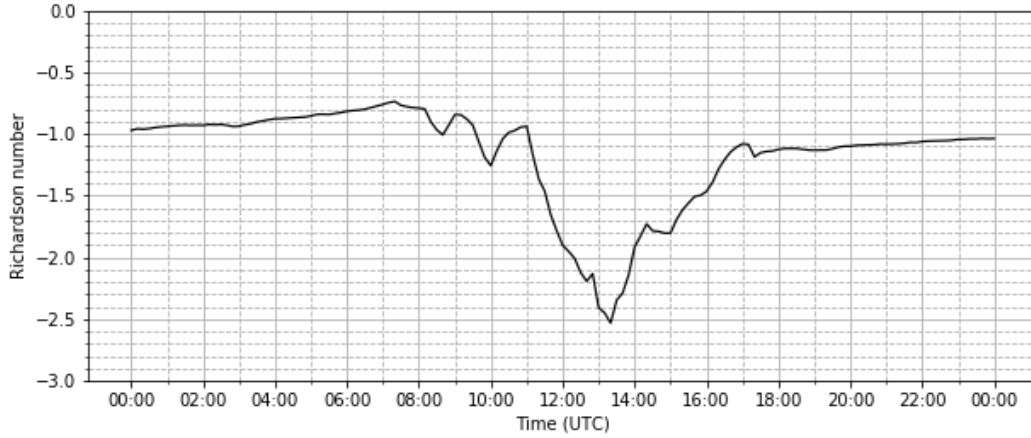


FIGURE 88 – The daily evolution of Richardson number for the simulated day.

the canyon street was in a natural convection regime during the whole day. The flow was

also thermally unstable since all values of the Richardson number are negative. Particle velocity vector fields, velocity vector module fields and temperature fields at different moments are shown in FIGURE 89. The results obtained from numerical modelling clearly show that the position of the sun has an impact on wall temperatures and can generate thermal effects that can be favorable to airflow in some cases and unfavorable to the establishment of a main central vortex in other cases.

At 09 :00 UTC ($Ri = - 0.85$) : The walls are not yet very hot ; the convection regime is forced. The vortex is formed by the wind. The west wall begins to heat up, creating an upward air movement along this wall that significantly strengthens the vortex.

At 12 :00 UTC ($Ri = - 1.90$) : The convection regime is mixed. The sun is at Zenith, so it is the ground that sees its temperature rise. The thermal effects, which are now important, are added to the aerualic effects. The main vortex inside the street always keeps the same direction of rotation, but the fluid particles in contact with the hot ground are slightly accelerated.

At 15 :00 UTC ($Ri = - 1.80$) : We are always in mixed convection regime. The sun is now positioned to the West, so it is the east wall that receives most of the incident solar radiation. Because of the relatively high albedo values of the walls (the walls are covered with white paint), the east wall reflects some of the radiation it receives from the sun back to the west wall facing it. The temperatures of the two walls (east and west) therefore increase (the temperature rises faster for the east wall) and tend to induce ascendant motion of the air next to the walls. A small contra-rotating vortex begins to form at the bottom of the canyon street, next to the east wall.

A.1.5 Conclusion

The objective of this work was to help better understand, through CFD numerical modeling, the influence of the path of the sun on the distribution of velocity and temperature fields within a canyon street. Experimental data acquired in an outdoor environment on a 1/5th scale canyon street were used as input and as validation data of the numerical

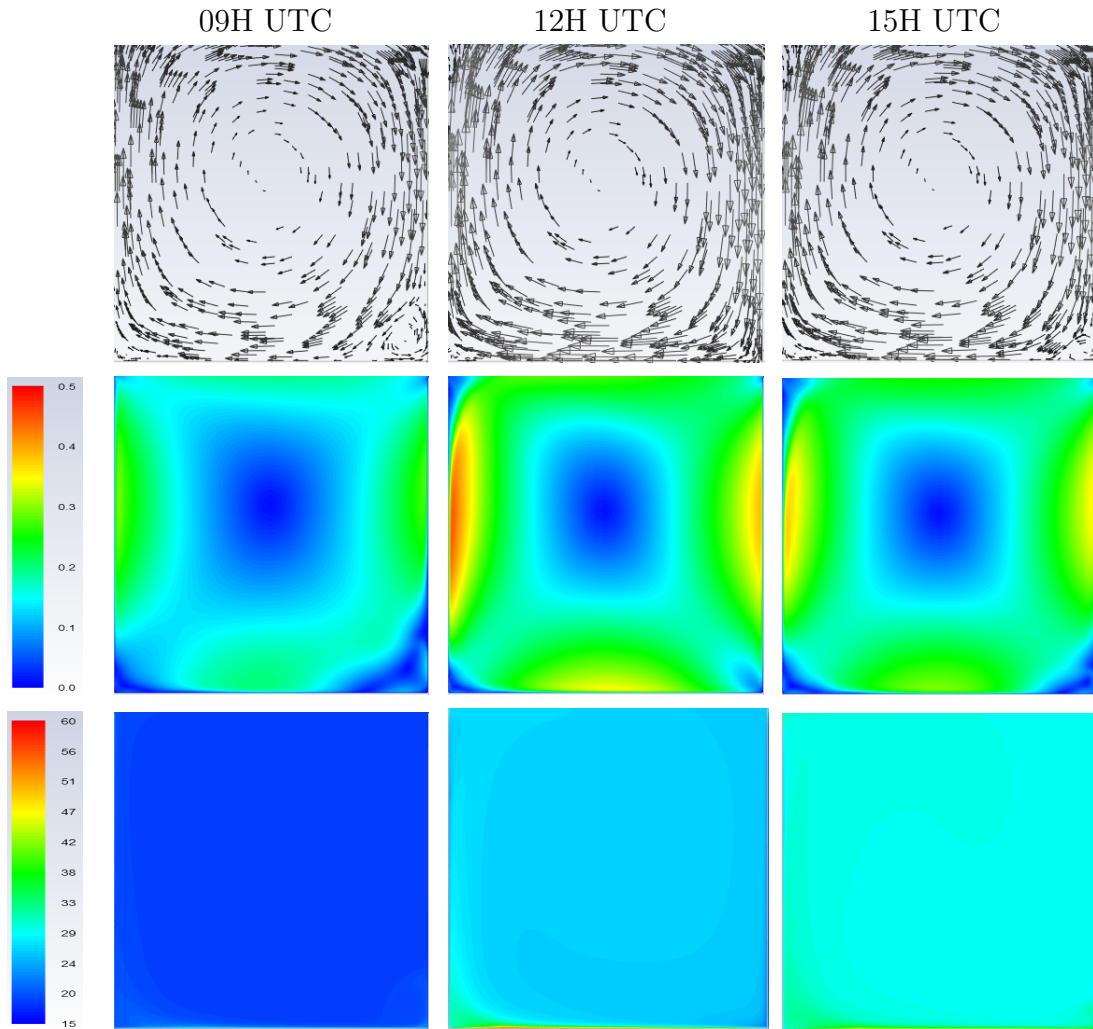


FIGURE 89 – Velocity vector (top), velocity magnitude (middle) and air temperature (bottom) distributions at different moments.

model. The results were presented for different Richardson numbers. From midnight until sunrise, a main vortex is formed inside the street, which rotates in the direction of the incident wind. During the morning, the sun heats the west side of the street and induces thermal effects that reinforce the rotation of the central main vortex. During the afternoon, solar radiation are mainly intercepted by the east wall, but reflection phenomena

cause all the walls of the street to be heated and induce thermal effects, which again reinforce the main central vortex. In the late afternoon and during the first half of the night, the restitution to the environment of the heat that has been stored by the materials during the day takes place more on the east side of the street than on the west side of the street because the east wall is slightly warmer than the west wall. Three-dimensional numerical modelling will be considered as a next step of this work to better take the sun path and incident wind conditions into account. A transposition of the numerical results into real scale will also be made.

Annexe B

Etalonnage des sondes en eau ECH20

Calcul de l'humidité de la terre et du compost : L'humidité du sol a été déterminée par la méthode gravimétrique. Pour ce faire, trois étapes ont été suivies (TABLE 31). D'abord, nous avons pris un échantillon de sol humide et avons fait une première pesée. La masse de l'échantillon humide est donc connue. Ensuite, nous avons placé l'échantillon humide dans un four chauffé à 105 °C pendant au moins 48 heures pour faire évaporer toute l'eau contenu dans l'échantillon. Enfin, nous avons sorti l'échantillon du four et avons fait une dernière pesée de l'échantillon pour déterminer sa masse sèche.

Détermination de la densité de la terre et celle du compost : Le principe consistait à remplir entièrement un cylindre dont le volume est de 977 cm^3 par de la terre ou par du compost en fonction de la densité que qu'on souhaitait déterminer. Le cylindre rempli a ensuite été pesé grâce à une balance d'une haute précision (précision au millième) afin de connaître la masse de la substance (terre ou compost) contenue dans le volume de 977 cm^3 . La densité était donc obtenue en faisant le rapport de la masse mesurée par le volume du cylindre (TABLE 32).

Détermination des proportions de masse : Les volumes de terre et de compost étant respectivement de 60% et de 40% du volume total, il est possible de calculer les propor-

tions de masse de ces deux matériaux (TABLE 33) à partir des densités déterminées à l'étape précédente.

Détermination de l'humidité initiale théorique du mélange : L'humidité initiale du mélange terre/compost peut être déterminée en faisant une moyenne pondérée par les masses des humidités initiales de la terre et du compost. Il faut donc déterminer l'humidité initiale du mélange terre/compost (TABLE 34).

Détermination de la quantité d'eau à apporter à chaque mesure : Ayant obtenu la valeur de l'humidité initiale du mélange terre/compost, nous pouvions nous fixer une valeur de l'humidité finale du mélange pour connaître la quantité totale d'eau à apporter au mélange terre/compost (TABLE 35).

Courbes d'étalonnage : Dans cette dernière étape, il s'agissait de déterminer une relation entre la valeur de la grandeur à mesurer (ici l'humidité volumique) et la valeur qui sera affichée par l'appareil de mesure (ici une tension électrique en mV). Les courbes obtenues sont toutes linéaires (TABLE 36, FIGURE 90, FIGURE 91, FIGURE 92). Elles ont servi, pour chaque sonde ECH2O, à passer de la grandeur affichée par l'appareil de mesure à la grandeur à mesurer.

	N° Boite	Tare (<i>g</i>)	Masse humide (<i>g</i>)	Masse sèche (<i>g</i>)	Humidité (<i>g</i> d'eau / <i>g</i> de sol)	Moyenne humidité (<i>g</i> d'eau / <i>g</i> de sol)
Terre	322	20.325	118.884	109.925	0.100	0.096
	334	19.294	118.130	110.149	0.088	
	336	18.482	95.094	88.121	0.100	
Compost	342	20.089	84.076	60.871	0.569	0.611
	420	19.306	73.202	51.727	0.662	
	441	20.309	73.761	53.700	0.601	

TABLE 31 – Calcul de l'humidité de la terre et du compost.

	Masse du cylindre vide (<i>g</i>)	Masse du cylindre rempli de terre (<i>g</i>)	Masse du cylindre rempli de compost (<i>g</i>)	Volume total du cylindre (<i>cm</i> ³)	Densité de la terre (<i>g.cm</i> ⁻³)	Densité du compost (<i>g.cm</i> ³)
Pesée 1	416.17	1365.98	948.71	977	0.972	0.545
Pesée 2	416.17	1370.25	941.79	977	0.977	0.538
Pesée 3	416.17	1417.86	936.58	977	1.025	0.533
Moyenne	416.17	1384.70	942.36	977	0.991	0.539

TABLE 32 – Détermination de la densité de la terre et du compost.

Volume total du conteneur (<i>cm</i> ³)	Volume total de terre (<i>cm</i> ³)	Volume total de compost (<i>cm</i> ³)	Masse de terre (<i>g</i>)	Masse de compost (<i>g</i>)
3675.66	2205.40	1470.26	291.502 (73%)	105.58 (27%)

TABLE 33 – Détermination des proportions de masse de la terre et du compost.

Proportion de la masse de terre (%)	Proportion de la masse de compost (%)	Humidité de la terre (<i>g</i> d'eau / <i>g</i> de sol)	Humidité du compost (<i>g</i> d'eau / <i>g</i> de sol)	Humidité du mélange (<i>g</i> d'eau / <i>g</i> de sol)
73 (%)	27 (%)	0.096	0.611	0.232

TABLE 34 – Détermination des humidités du mélange terre/compost.

Humidité initiale du mélange (<i>g</i> d'eau / <i>g</i> de sol)	Humidité finale du mélange (<i>g</i> d'eau / <i>g</i> de sol)	Ecart d'humidité (<i>g</i> d'eau / <i>g</i> de sol)	Quantité totale d'eau à apporter (<i>g</i>)	Quantité d'eau à apporter à chaque étalonnage (<i>g</i>)
0.232	0.4	0.167	497.79	49.78

TABLE 35 – Détermination de la quantité d'eau à apporter à chaque mesure.

Humidité	Sonde N° 1	Sonde N° 2	Sonde N° 3	Sonde N° 4	Sonde N° 5	Sonde N° 6	Sonde N° 7	Sonde N° 8	Sonde N° 9	Sonde N° 10	Sonde N° 11	Sonde N° 12	Sonde N° 13	Sonde N° 14	Sonde N° 15	Sonde N° 17	Sonde N° 18
0.1352	0.1641	0.1660	0.1655	0.1660	0.1634	0.1679	0.1684	0.1657	0.1696	0.1672	0.1646	0.1660	0.1705	0.1730	0.1635	0.1736	0.1730
0.1510	0.1649	0.1717	0.1692	0.1660	0.1660	0.1679	0.1711	0.1679	0.1717	0.1718	0.1755	0.1722	0.1730	0.1741	0.1635	0.1744	0.1760
0.1668	0.1738	0.1765	0.1793	0.1725	0.1765	0.1786	0.1749	0.1755	0.1730	0.1776	0.1765	0.1752	0.1782	0.1776	0.1703	0.1798	0.1776
0.1826	0.1818	0.1774	0.1798	0.1755	0.1768	0.1796	0.1756	0.1786	0.1744	0.1806	0.1829	0.1752	0.1793	0.1806	0.1728	0.1825	0.1793
0.1984	0.1847	0.1814	0.1820	0.1774	0.1784	0.1809	0.1772	0.1798	0.1801	0.1814	0.1833	0.1795	0.1844	0.1893	0.1763	0.1848	0.1814
0.2142	0.1893	0.1858	0.1901	0.1839	0.1863	0.1849	0.1897	0.1893	0.1839	0.1866	0.1868	0.1868	0.1852	0.1920	0.1821	0.1866	0.1855
0.2300	0.2028	0.1940	0.2006	0.1963	0.1909	0.1863	0.1925	0.1969	0.1876	0.1958	0.1893	0.1893	0.1955	0.1978	0.1977	0.1969	0.1879
0.2458	0.2034	0.2025	0.2103	0.2025	0.2023	0.1950	0.1958	0.2023	0.1966	0.1986	0.2001	0.1974	0.1960	0.1982	0.1979	0.2038	0.1952
0.2616	0.2077	0.2077	0.2108	0.2153	0.2063	0.1996	0.2006	0.2084	0.2016	0.2004	0.2096	0.2015	0.2112	0.2082	0.2063	0.2050	0.2077
0.2774	0.2145	0.2155	0.2153	0.2218	0.2128	0.2195	0.2077	0.2172	0.2166	0.2145	0.2128	0.2020	0.2128	0.2174	0.2131	0.2228	0.2098
0.2932	0.2222	0.2277	0.2207	0.2245	0.2218	0.2233	0.2166	0.2204	0.2264	0.2204	0.2163	0.2077	0.2161	0.2185	0.2158	0.2264	0.2245

TABLE 36 – Valeurs affichées par l'appareil de mesure en fonction de l'humidité volumique.

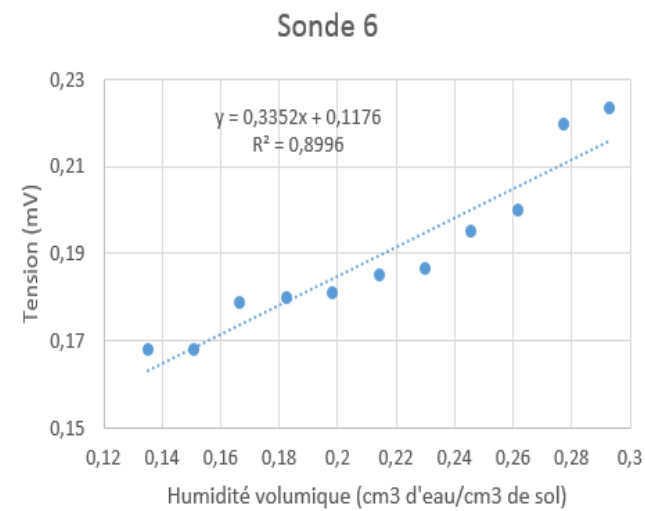
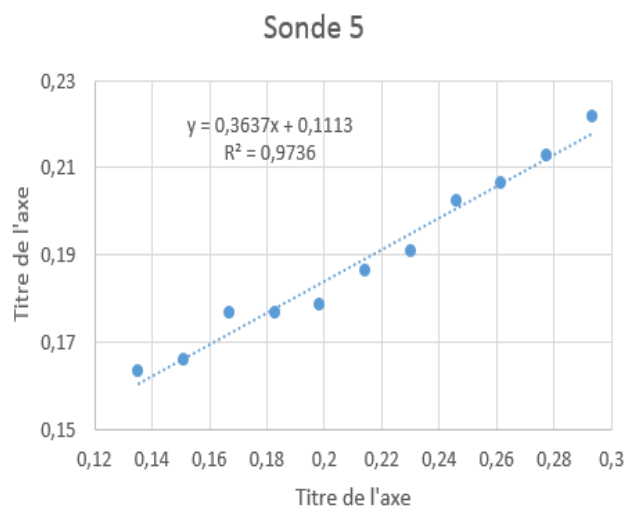
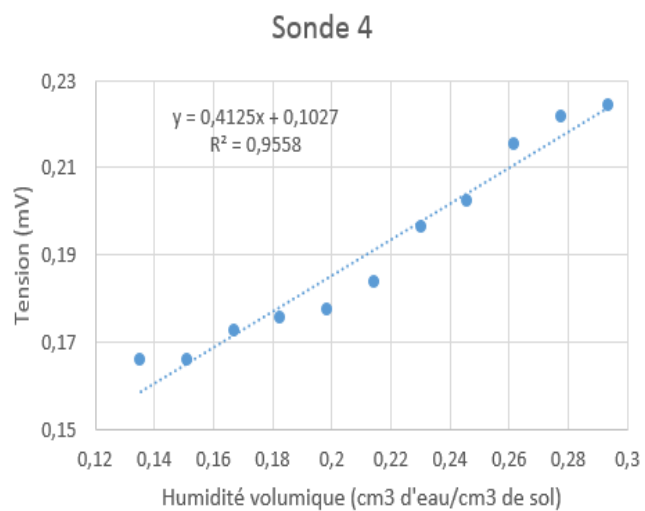
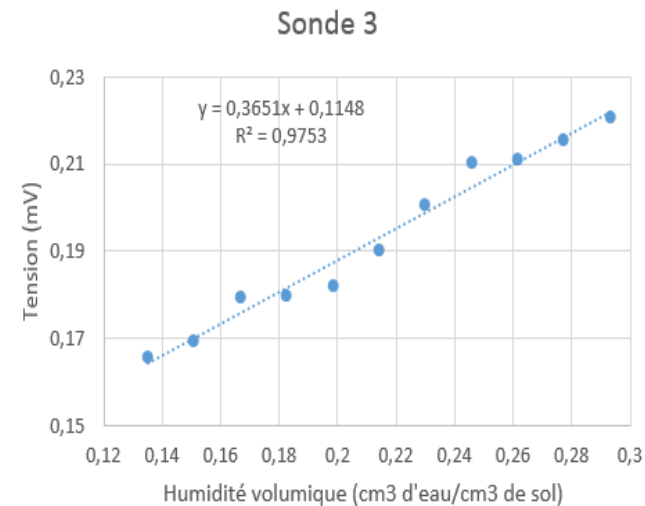
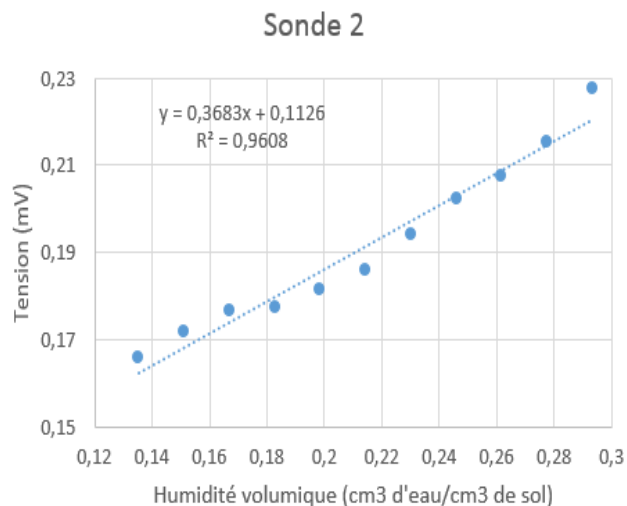
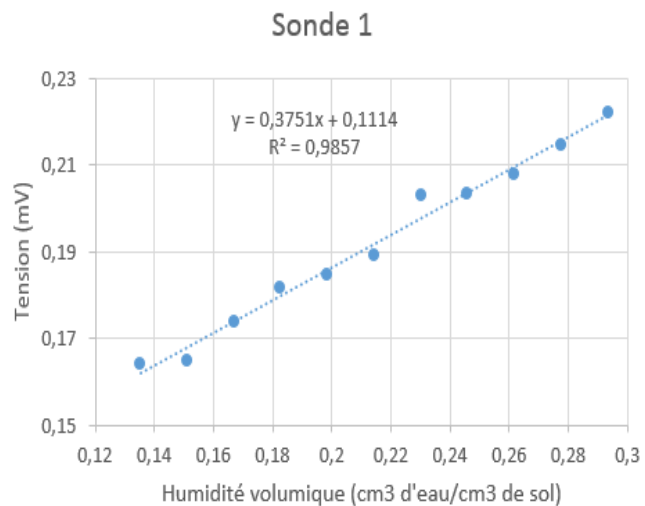


FIGURE 90 – Courbes d'étalonnage des sondes ECH2O.

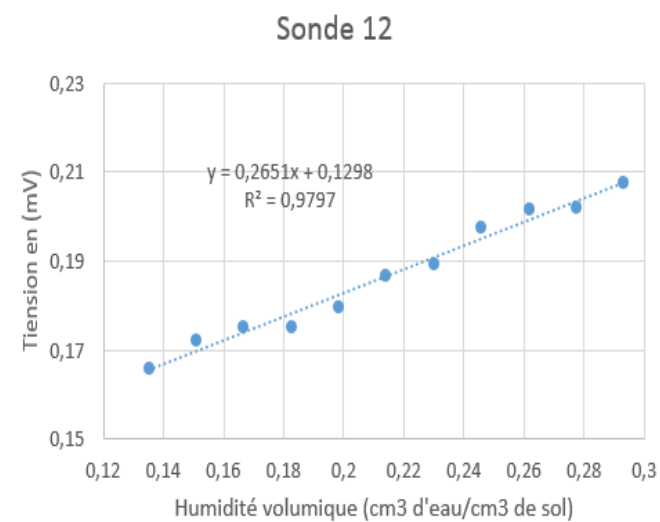
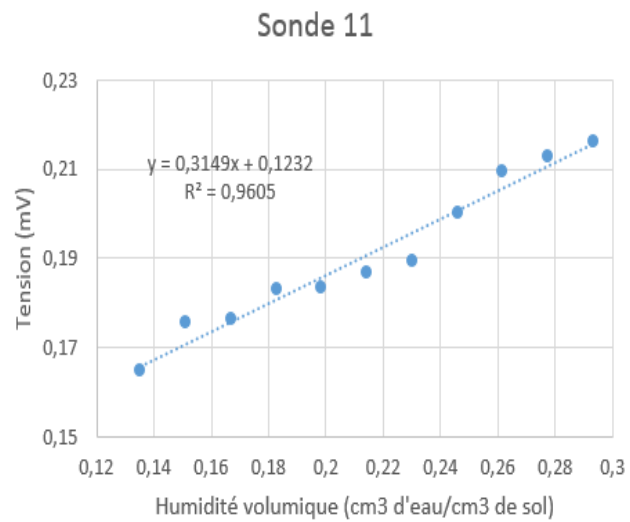
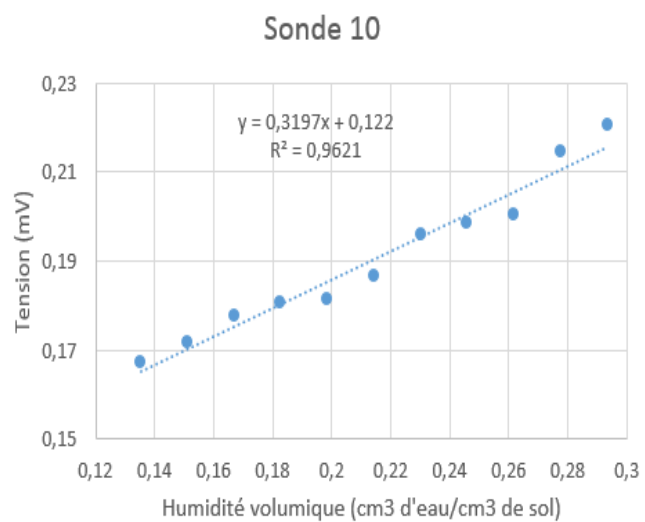
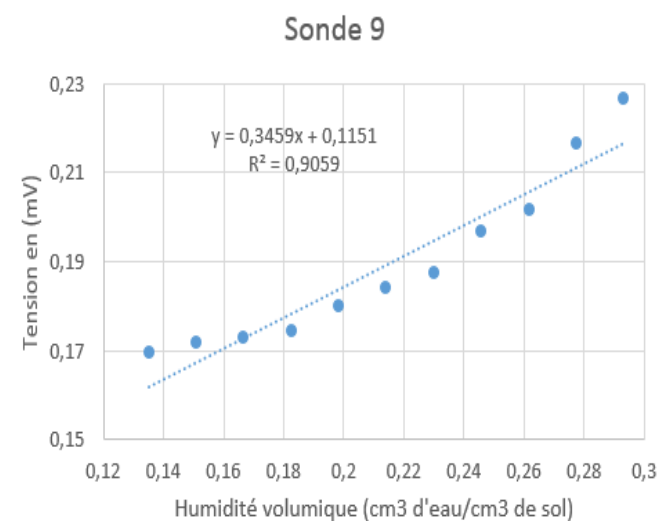
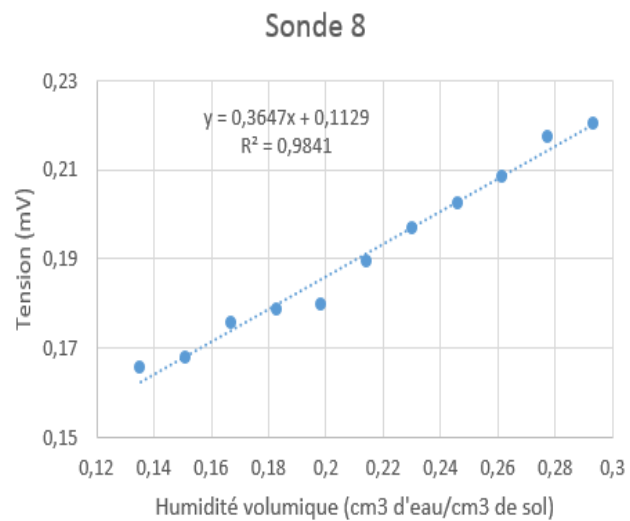
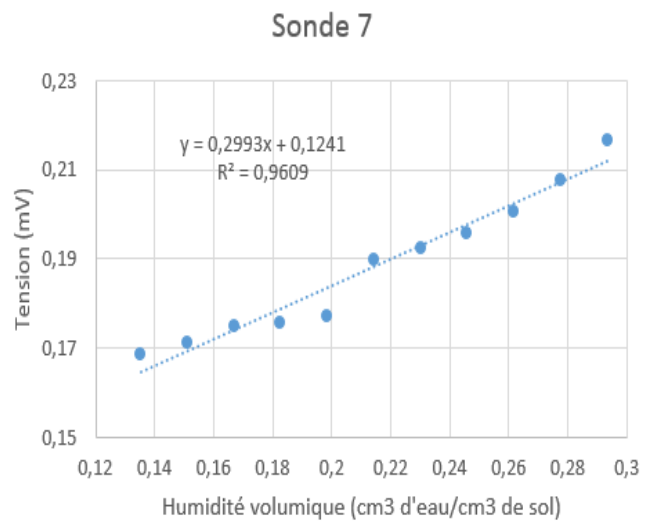


FIGURE 91 – Courbes d'étalonnage des sondes ECH2O.

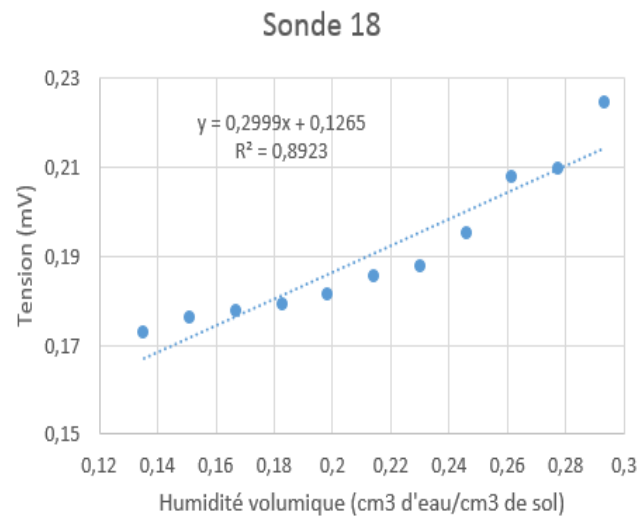
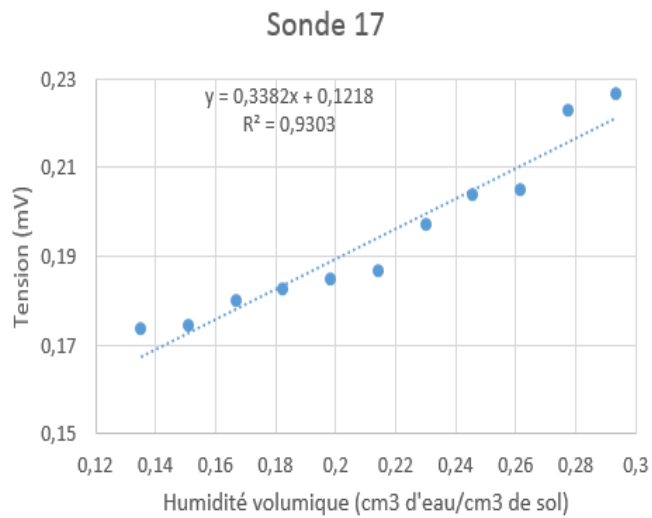
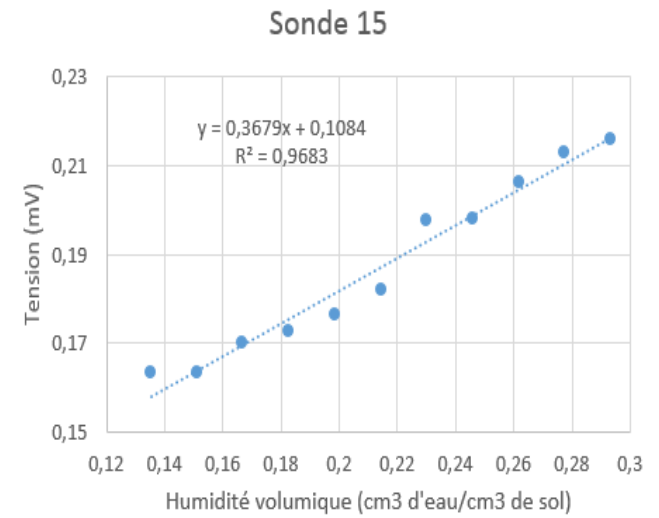
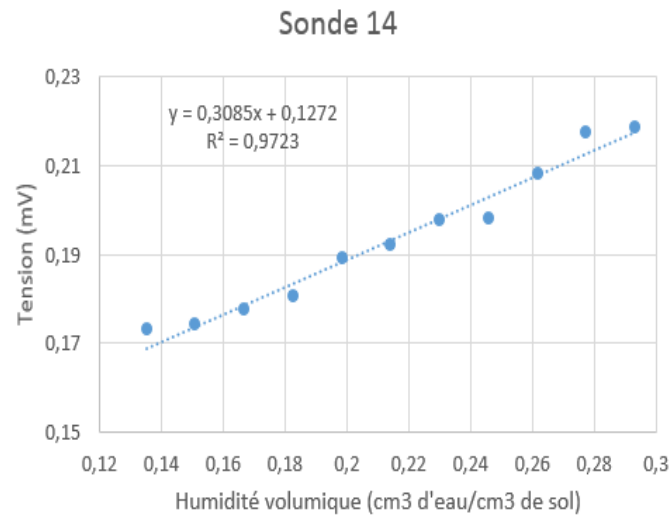
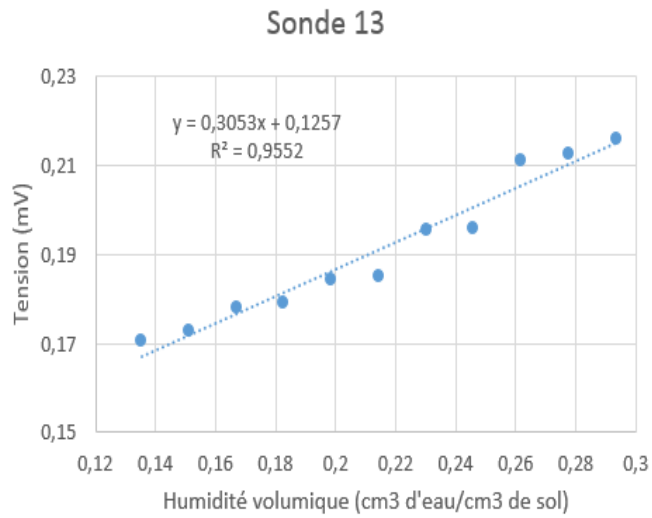


FIGURE 92 – Courbes d'étalonnage des sondes ECH2O.

Annexe C

Étalonnage des tensiomètres

Pour étalonner les tensiomètres, un échantillon de substrat a été utilisé et des dépressions de 100, 200, 300, 400 et 600 hPa ont été imposées. Pour chaque valeur de dépression imposée, la valeur de la tension correspondante affichée sur la centrale d'acquisition a été relevée. La représentation graphique de la tension affichée sur la centrale d'acquisition des données en fonction de la dépression imposée sur le substrat permet de constater qu'il existe une loi linéaire liant les deux grandeurs avec des coefficients de corrélation supérieurs à 0.98.

Annexe D

Détermination de la courbe de rétention en eau

Pour déterminer la courbe de rétention hydrique du mélange terre-compost, deux types de dispositif ont été simultanément utilisés : les tables à succion et le dispositif des presses de Richards (FIGURE 93).



FIGURE 93 – Dispositifs utilisés pour déterminer la courbe de rétention hydrique. A gauche : table de succion ; à droite : dispositif des presses de Richards.

Pour déterminer la courbe de rétention (FIGURE 27) par les tables de succion, nous avons

posé les échantillons initialement saturés d'eau sur un lit de sable fin (de la silice) raccordé à une réserve d'eau dont le niveau pouvait être réglé. La distance entre la surface du lit de sable et le niveau d'eau représente la succion. Cette distance est comprise en 0 et 1 m. Pour déterminer la courbe de rétention en eau par le dispositif des presses de Richards, on avait déposé les échantillons initialement saturés dans des enceintes dans lesquelles de l'air (azote le plus souvent) était injecté. La pression qui a ainsi été appliquée était l'équivalent de la succion qui a été imposée à l'échantillon. C'est cette technique qui est généralement utilisée pour imposer de fortes succions.

Annexe E

Courbes de teneur en eau et de potentiel hydrique du sol

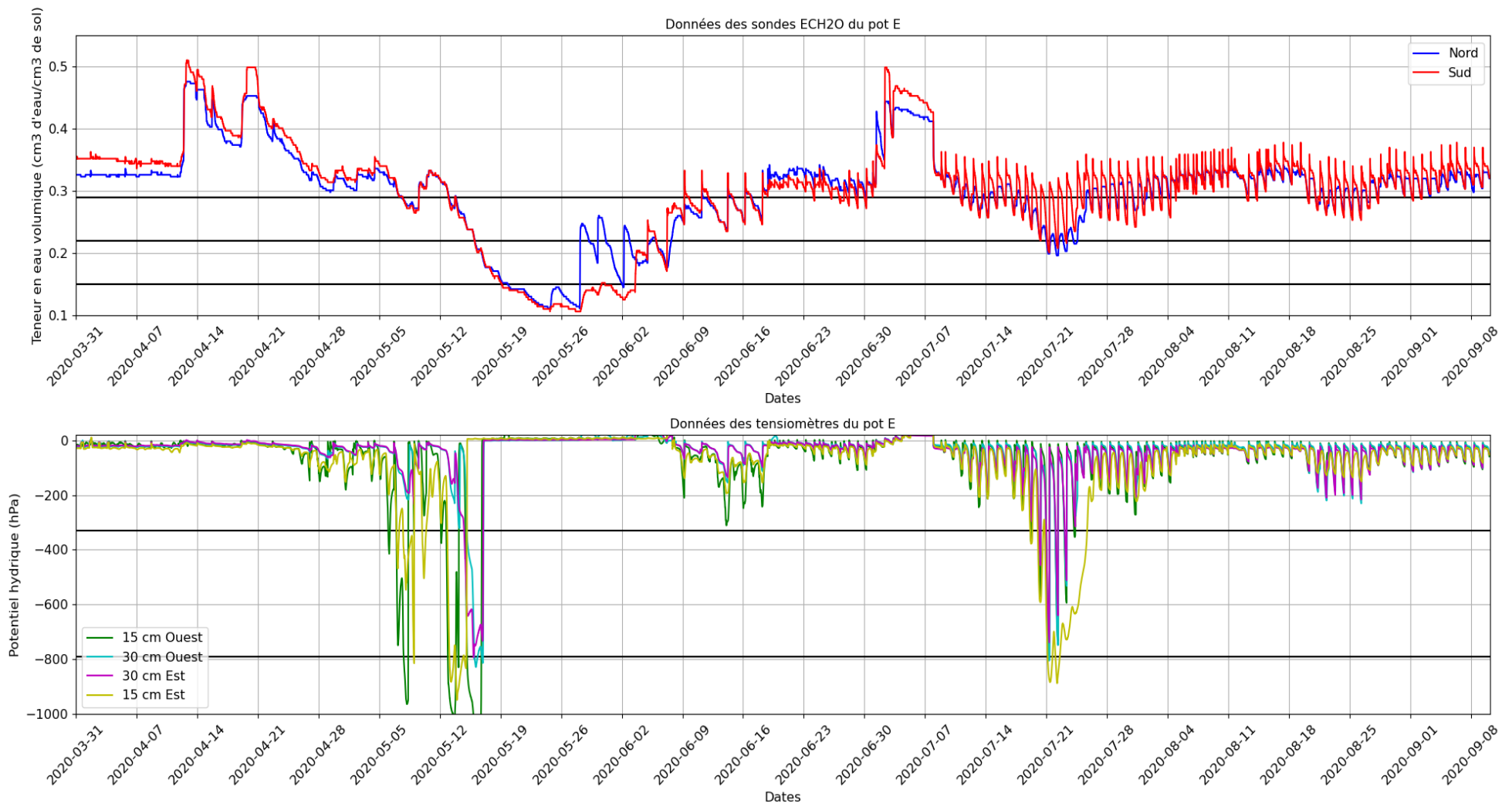


FIGURE 94 – Courbes de teneur en eau volumique et de potentiel hydrique du sol dans le Pot E (modalité A) (Manteau, 2020).

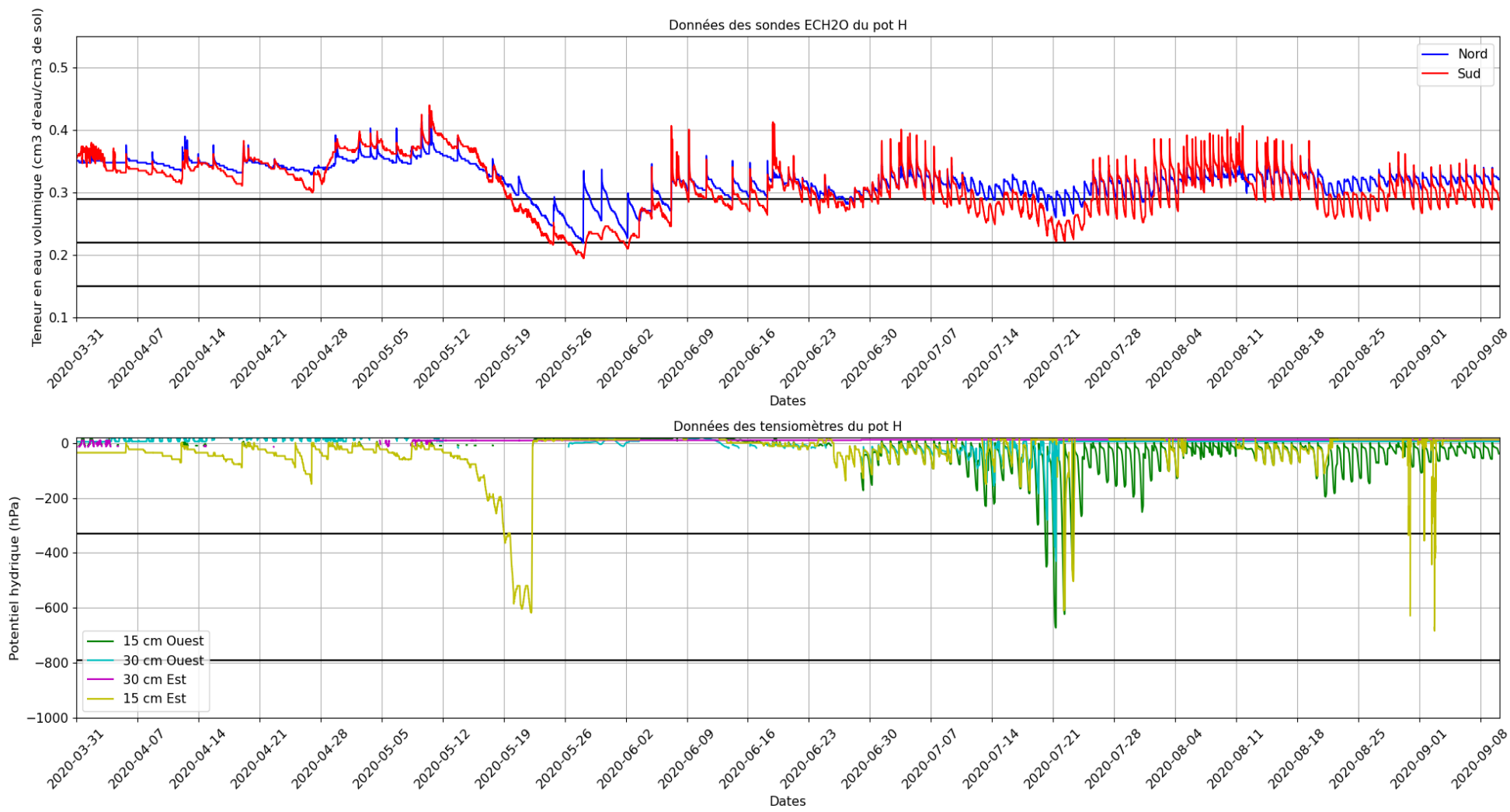


FIGURE 95 – Courbes de teneur en eau volumique et de potentiel hydrique du sol dans le Pot H (modalité **B**) (Manteau, 2020).

Annexe F

Résultats dans les modalités végétalisées A et B

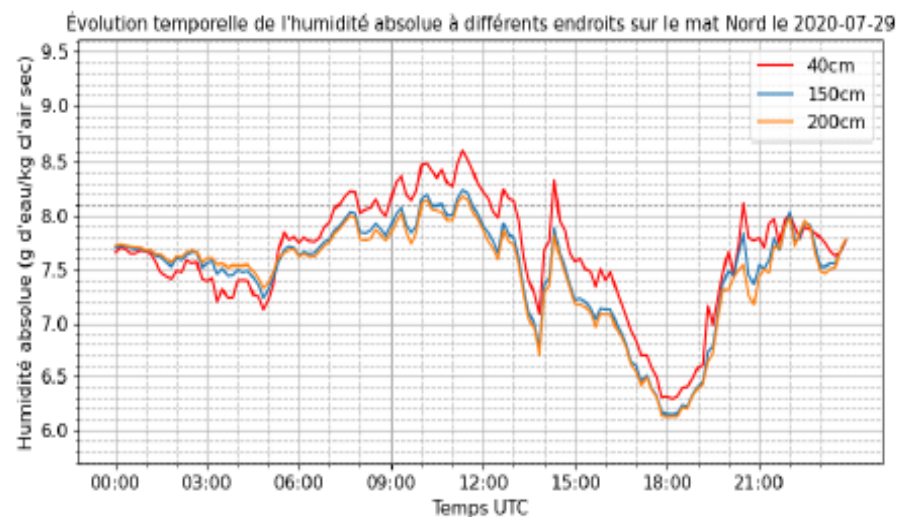
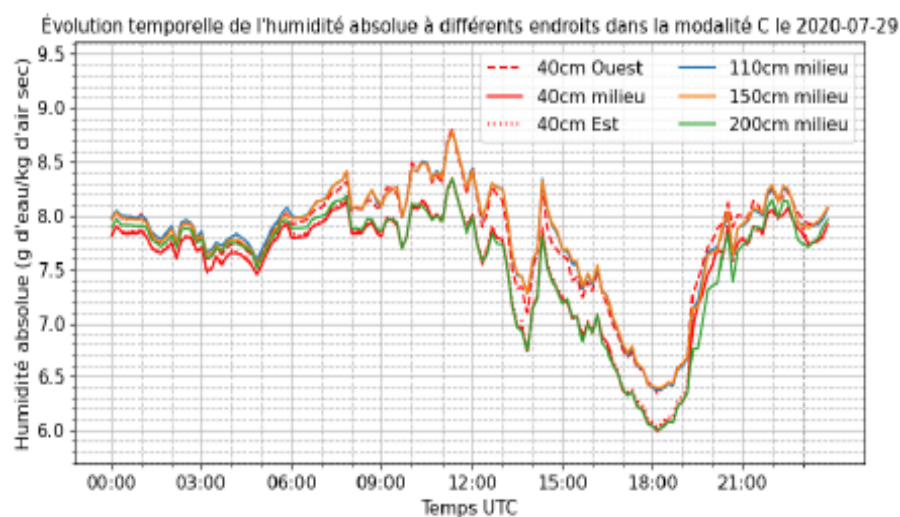
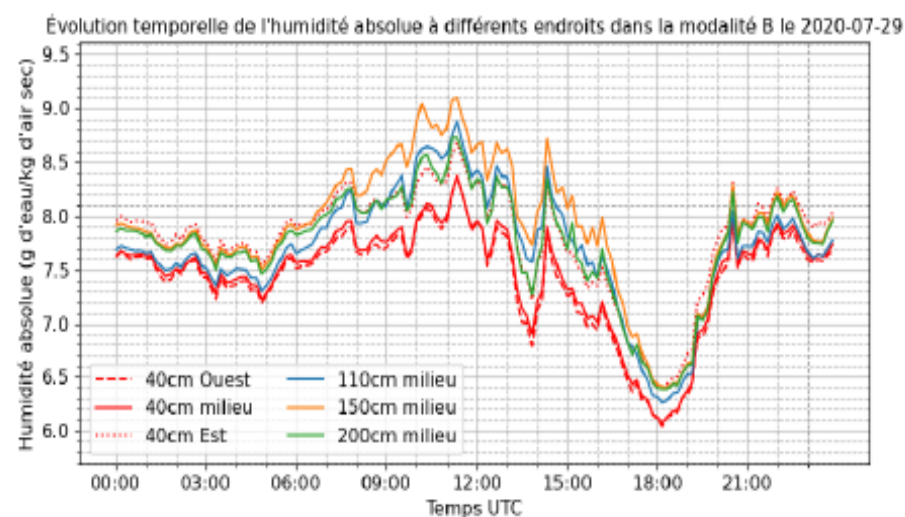
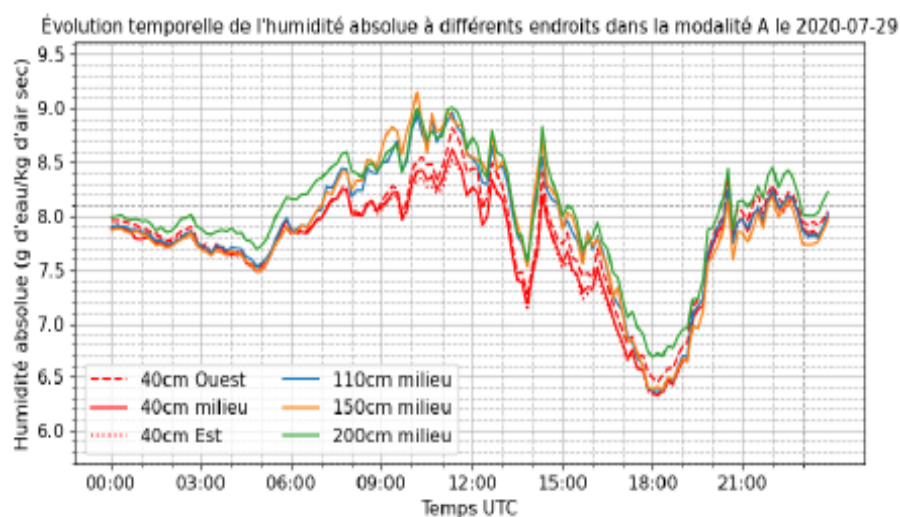


FIGURE 96 – Évolution temporelle de l'humidité absolue à 40 cm au milieu de la rue et sur le mat Nord pour la journée du 29 juillet 2020 (Manteau, 2020).

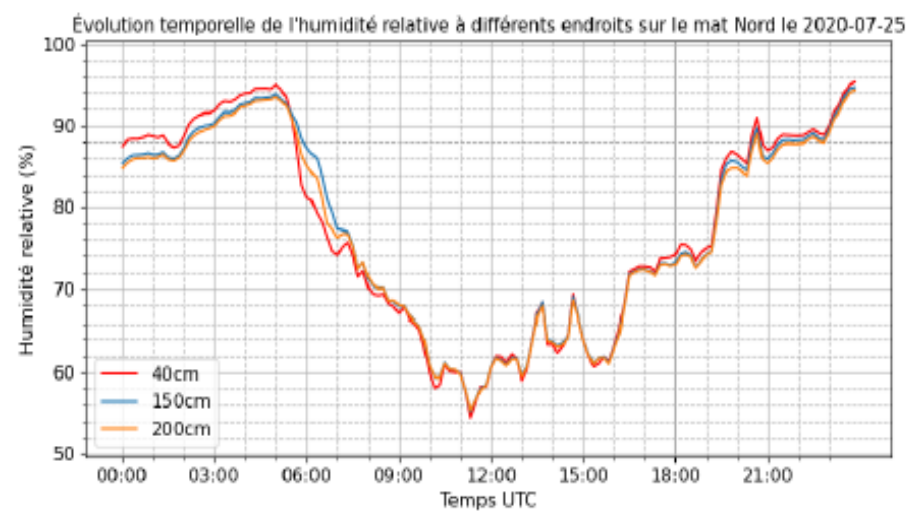
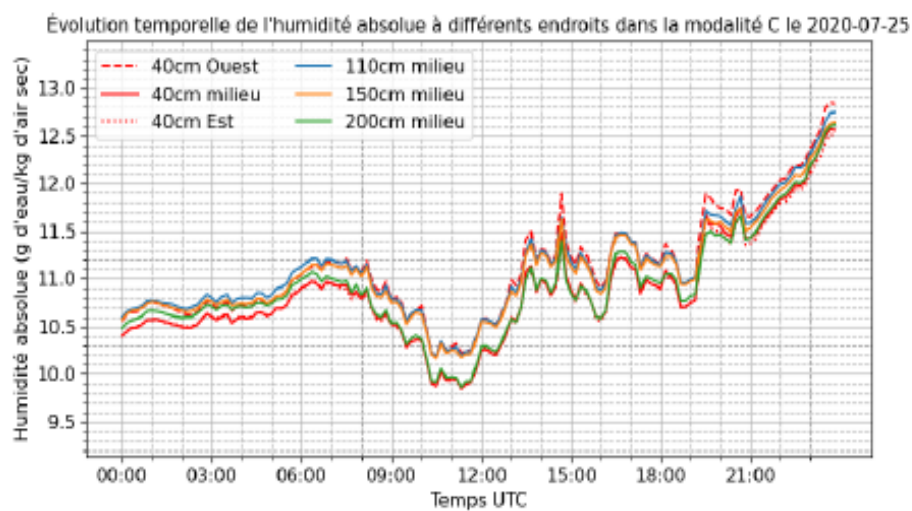
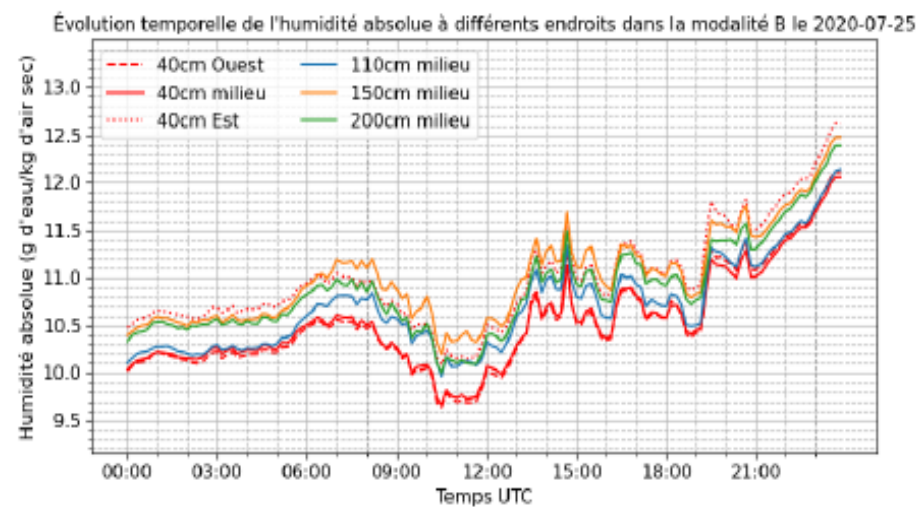
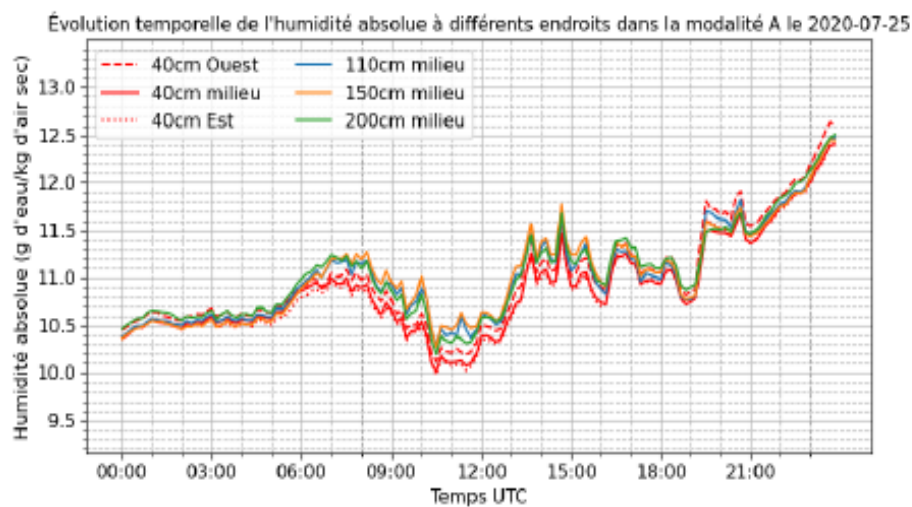


FIGURE 97 – Évolution temporelle de l'humidité absolue à 40 cm au milieu de la rue et sur le mat Nord pour la journée du 25 juillet 2020 (Manteau, 2020).

Annexe G

Mesure de la surface foliaire

Pour déterminer la surface foliaire d'un arbre, voici les différentes étapes qui ont été mises en œuvre (Boukouya, 2020) :

- Sur chaque arbre, nous avons marqué aléatoirement 4 axes d'une ficelle rouge, numérotés de 1 à 4 (deux au sommet de la canopée, un à l'Est et un à l'Ouest). Pour choisir les axes de façon aléatoire, nous avons tiré des numéros de 2 à 10 aléatoirement et, devant l'arbre, nous avons compté les axes dans le sens des aiguilles d'une montre jusqu'à tomber sur le chiffre tiré aléatoirement.
- A chaque campagne de mesure (juin, juillet, août) et pour chaque arbre, nous avons pris les mesures de surface foliaire sur les 4 axes marqués et 4 dards choisis aléatoirement (même méthode que pour les axes numérotés). Un dard portant beaucoup plus de feuilles sur une petite longueur d'axe, on a différencié les dards des axes normaux.
- Pour chaque axe mesuré, nous avons relevé son ordre, ses unités de croissance, s'il s'agissait d'un axe normal ou d'un dard, sa longueur totale, sa longueur sans feuille (du milieu du premier inter-noeud ne portant pas de feuille au milieu de l'inter-noeud du dernier de la longueur sans feuille), la raison de la défoliation (puceron ou physiologie), le numéro de chaque feuille de l'axe (1 pour la feuille à la base, n pour la dernière feuille de l'axe), la longueur et la largeur des feuilles.
- Notons que, parfois, des feuilles attaquées par les pucerons ont été comptées comme absentes (surface inférieure à 50% d'une feuille saine). En effet, bien qu'elle continue de transpirer et de réaliser sa photosynthèse, la feuille est toute recroquevillée et ses capacités sont fortement réduites par rapport à une feuille saine.
- Pour les axes normaux, sur le sous-échantillon de 4 axes allongés numérotés 1 à 4 de chaque arbre, nous avons calculé un coefficient de surface de feuille par centimètre d'axe pour chaque arbre, qui prend en compte les zones défoliées.
- Nous avons d'abord estimé la surface foliaire portée par branche en mesurant la longueur et la largeur de chaque feuille et en utilisant la relation d'allométrie suivante :

$$S = a \times L \times l \quad (110)$$

Avec S la surface en cm^2 , L la longueur de la feuille en cm et l la largeur de la feuille en cm (cette relation avait été établie en 2019, on avait obtenu $a = 0.7149$).

- Pour calculer ce coefficient (cm² de feuille / cm de tige) avec correction des feuilles tombées, nous ne nous sommes intéressés qu'à la longueur de branche qui porte des feuilles, on déduit donc de la longueur de branche réelle la fraction qui portait des feuilles qui sont tombées. On obtient donc :

$$C = \frac{\text{Somme des surfaces de toutes les feuilles présentes sur l'axe}}{\text{Longueur d'axe portant des feuilles au moment de la mesure}} \quad (111)$$

Ce coefficient C moyenné par arbre (avec correction des feuilles tombées en cm² feuille / cm d'axe) a été multiplié par la longueur foliée cumulée de tous les axes allongés de l'arbre pour obtenir une surface foliaire des axes allongés de l'arbre :

$$\text{Surface fol portée par les axes allongés} = C \times [\text{longueur foliée cumulée des axes allongés}] \quad (112)$$

- Pour les axes de type dard (ou brachyblaste), on applique une autre méthode. Grâce aux quatre dards par arbre, on calcule une surface foliaire moyenne par dard et par arbre à partir de la mesure de la longueur et de la largeur de chaque feuille des dards et de la relation ((110)). Cette surface foliaire de dard est multipliée au nombre de dards de l'arbre, ce qui permet d'obtenir la surface foliaire de tous les dards de l'arbre.
- La surface foliaire de l'arbre est la somme de la surface foliaire portée par les axes allongés et par les dards.

Annexe H

Mesure du volume de peuplement

Pour déterminer la valeur de la dimension A, nous avons procédé en plusieurs étapes :

Première étape : Pour chaque arbre utile (G, L, E pour la modalité A ; J, B, H pour la modalité B), nous avons mesuré la hauteur du point d'insertion sur le tronc de la branche la plus basse.

Deuxième étape : Pour chaque modalité, nous avons déterminé la moyenne des hauteurs des 3 points d'insertion déterminées dans l'étape précédente. Nous noterons MOY1 cette moyenne.

Troisième étape : Pour chaque arbre utile (G, L, E pour la modalité A ; J, B, H pour la modalité B), nous avons mesuré la hauteur du point le plus bas de toutes les branches de l'arbre.

Quatrième étape : Pour chaque modalité, nous avons déterminé la moyenne pour les 3 arbres (arbres utiles de chacune des modalités A et B) des hauteurs des points les plus bas déterminées dans l'étape précédente. Nous noterons MOY2 cette moyenne.

Cinquième étape : Pour chaque modalité, la dimension A est déterminée comme suit : $A = (MOY1 + MOY2)/2$ (voir TABLE 37).

	Point d'insertion de la branche la plus basse (m)	Point le plus bas du houppier (m)	Moyenne
Arbre G	0.74	0.45	-
Arbre L	0.70	0.46	-
Arbre E	0.76	0.48	-
Moyenne	0.73	0.46	0.60
Arbre J	0.73	0.40	-
Arbre B	0.79	0.68	-
Arbre H	0.74	0.75	-
Moyenne	0.75	0.61	0.68

TABLE 37 – Hauteurs à partir du sol de la rue des points d'insertion sur le tronc de la branche la plus basse (mesurées le 29 juin 2020) et des hauteurs des points les plus bas (mesurées le 17 juillet 2020) de chaque arbre utile. Les données relatives au point d'insertion sur le tronc de la branche la plus basse sont supposées ne pas beaucoup évoluer dans le temps. En revanche, celles sur le point le plus bas du houppier évoluent dans le temps, mais nous les avons mesurées quelques jours avant le 28 juillet 2020 (date utilisée pour les simulations numériques).

Annexe I

Ratio d'ensoleillement des journées du mois de juillet 2020

Journées	Ratio d'ensoleillement	Type de journée
01 Juillet 2020	0.373	Journée moyenne
02 Juillet 2020	0.445	Journée moyenne
03 Juillet 2020	0.479	Journée moyenne
04 Juillet 2020	0.242	Journée moyenne
05 Juillet 2020	0.290	Journée moyenne
06 Juillet 2020	0.588	Journée moyenne
07 Juillet 2020	0.674	Journée ensoleillée
08 Juillet 2020	0.637	Journée moyenne
09 Juillet 2020	0.656	Journée ensoleillée
10 Juillet 2020	0.410	Journée moyenne
11 Juillet 2020	0.686	Journée ensoleillée
12 Juillet 2020	0.681	Journée ensoleillée
13 Juillet 2020	0.654	Journée ensoleillée
14 Juillet 2020	0.423	Journée moyenne
15 Juillet 2020	0.267	Journée moyenne
16 Juillet 2020	0.308	Journée moyenne
17 Juillet 2020	0.656	Journée ensoleillée
18 Juillet 2020	0.583	Journée moyenne
19 Juillet 2020	0.651	Journée ensoleillée
20 Juillet 2020	0.652	Journée ensoleillée
21 Juillet 2020	0.655	Journée ensoleillée
22 Juillet 2020	0.669	Journée ensoleillée
23 Juillet 2020	0.487	Journée moyenne
24 Juillet 2020	0.558	Journée moyenne
25 Juillet 2020	0.243	Journée nuageuse
26 Juillet 2020	0.591	Journée moyenne
27 Juillet 2020	0.632	Journée moyenne
28 Juillet 2020	0.719	Journée ensoleillée
29 Juillet 2020	0.655	Journée ensoleillée
30 Juillet 2020	0.655	Journée ensoleillée
31 Juillet 2020	0.523	Journée moyenne

TABLE 38 – Valeurs du ratio d'ensoleillement pour le mois de juillet 2020. Les journées pour lesquelles la valeur du ratio est supérieure à 0.650 sont considérées comme des journées ensoleillées, celles dont la valeur du ratio est inférieure à 0.250 sont considérées comme des journées nuageuses, les autres sont considérées comme des journées moyennement ensoleillées.

Annexe J

**Autres résultats pour des données
obtenues sur des périodes de
plusieurs jours ensoleillés pendant la
campagne 2020**

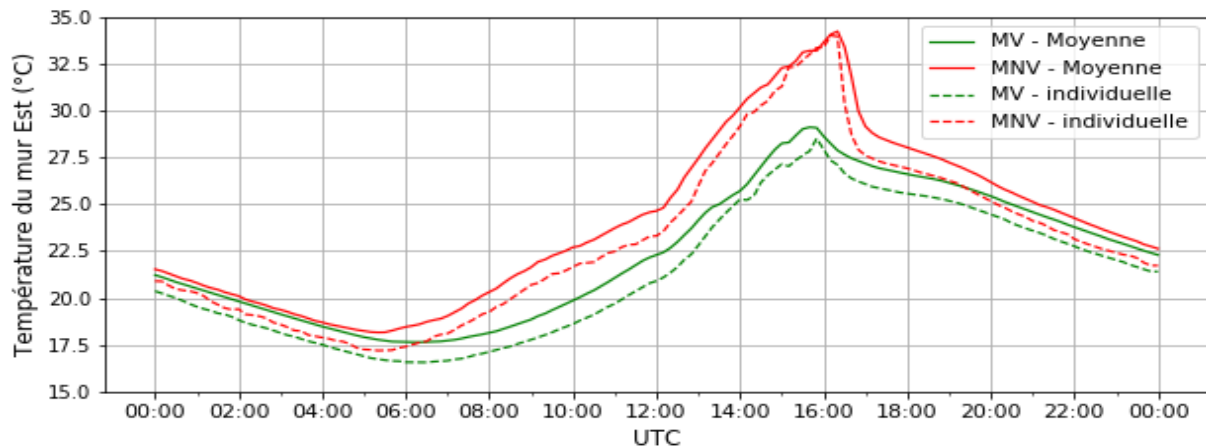


FIGURE 98 – Évolutions journalières des températures du mur Est mesurées à l’intérieur de la rue dans la modalité non-végétalisée (MNV) et dans la modalité végétalisée (MV) pour la journée individuelle du 29 juillet 2020 (Individuelle) et pour la journée moyenne des 12 journées ensoleillées (Moyenne).

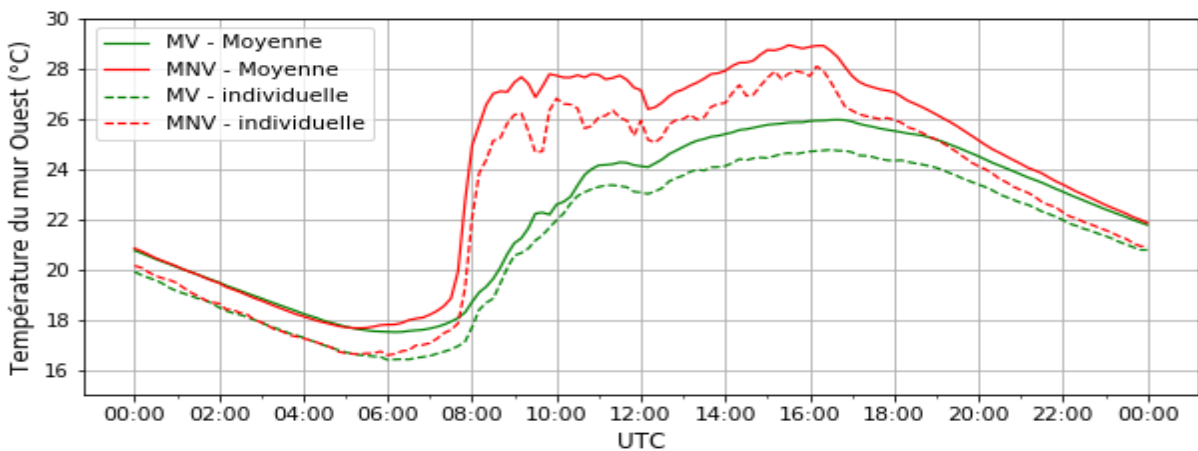


FIGURE 99 – Évolutions journalières des températures du mur Ouest mesurées à l’intérieur de la rue dans la modalité non-végétalisée (MNV) et dans la modalité végétalisée (MV) pour la journée individuelle du 29 juillet 2020 (Individuelle) et pour la journée moyenne des 12 journées ensoleillées (Moyenne).

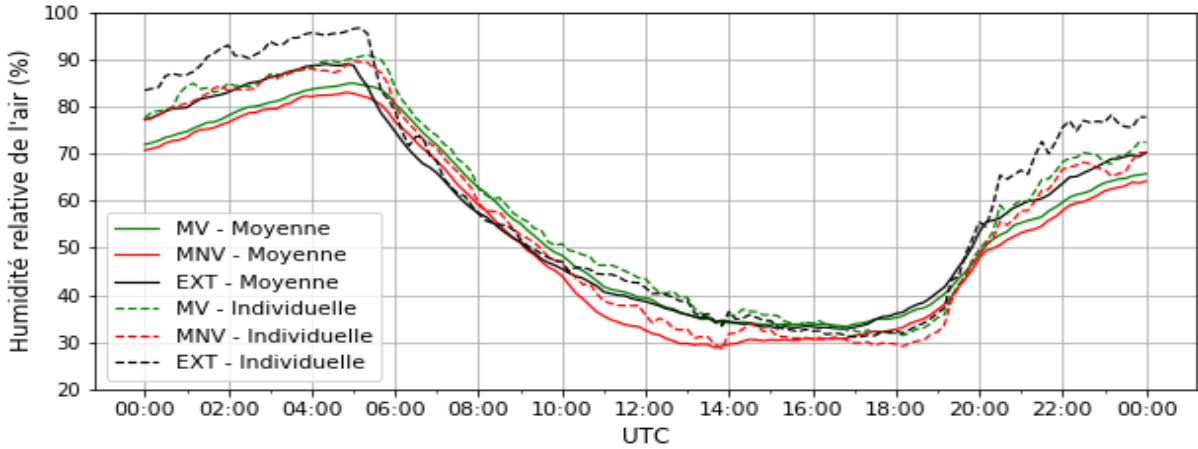


FIGURE 100 – Évolutions journalières des humidités relatives de l'air mesurées à l'extérieur de la rue (EXT), à l'intérieur de la rue dans la modalité non-végétalisée (MNV), et à l'intérieur de la rue dans la modalité végétalisée (MV) pour la journée individuelle du 29 juillet 2020 (Individuelle) et pour la journée moyenne des 12 journées ensoleillées (Moyenne). Les mesures sont prises à 40 cm su sol.

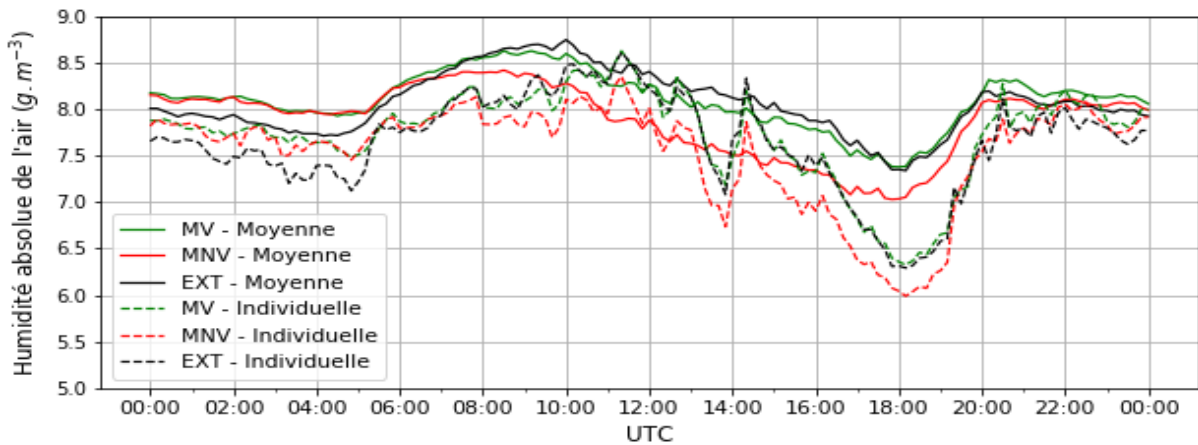


FIGURE 101 – Évolutions journalières des humidités absolues de l'air mesurées à l'extérieur de la rue (EXT), à l'intérieur de la rue dans la modalité non-végétalisée (MNV), et à l'intérieur de la rue dans la modalité végétalisée (MV) pour la journée individuelle du 29 juillet 2020 (Individuelle) et pour la journée moyenne des 12 journées ensoleillées (Moyenne). Les mesures sont prises à 40 cm su sol.

Annexe K

Les UDF utilisés

```

#include "udf.h"
#include "sg.h"
#include "mem.h"

/* ***** Initialisation du domaine ***** */
# define Tintial 296.21 /* Initialisation de la température dans le domaine */
# define FracEau 0.012 /* Initialisation de fraction d'eau dans le domaine */

/* ***** Caractérisation de la végétation ***** */
# define L 0.05 /* Longueur caractéristique d'une feuille */
# define h 1.1 /* Hauteur de la végétation (vegetal=32.5cm pots=12.5cm) */
# define LAIS 2.49 /* Leaf Area Index Surfâcique */
# define LAIV 2.26 /* Leaf area index volumique */
# define Coef_extinc 1.30 /* Coefficient d'extinction */

/* ***** coefficients pour calculer rs ***** */

# define RSmin 200 /* Résistance stomatique minimale */

# define lambda 0.0262 /* conductivité thermique de l'air */
# define Visc 1.8e-5 /* viscosité dynamqie de l'air */
# define Lv 2257000 /* Chaleur latente de vaporisation */
# define Chp 1004 /* Capacité thermique massique à pression constante de l'air */
# define rx 0.2 /* Coefficient de relaxation */
# define Sigma 5.67e-8 /* Constante de Stephane Boltzman */
# define zero 273.15 /* Correspond à 0 °C */

/* ***** Source de température végétation ***** */
DEFINE_SOURCE(Energie_QS, cell, thread, dS, eqn)
{
real source,x[ND_ND],y0[ND_ND],y1[ND_ND],y2[ND_ND],y3[ND_ND];
int i;
int nb;
real RayAbs;
float Tinterne, delta_t, Nusselt, Gr, Re, Vitesse_x, Vitesse_Y, norme, Humair;
float RA,Tambiant,DPV,f1,f2,RS,GS,GSmax,newtemp,Humfeuille,G,D,RT;
float phi1,phi2;
Material *m=THREAD_MATERIAL(thread);

/* on récupère la valeur de la température de l'air dans la maille C_T(cell,thread)*/
Tambiant=C_T(cell,thread);

/* on récupère la valeur de la température de la feuille stockée dans user defined memory 0*/
Tinterne=C_UDMI(cell,thread,0); /* C_UDMI(cell,thread,0) variable Tinterne*/

/* on recupere la valeur de la species mass fraction avec C_YI(cell,thread,0);*/
Humair=C_YI(cell,thread,0); /* C_YI(cell,thread,0) variable Humair*/

/* on récupère la valeur de l'humidité absolue de la feuille stockée dans user defined memory 1*/
Humfeuille=C_UDMI(cell,thread,1); /* C_UDMI(cell,thread,1) variable
Humidite*/

```

```

/*****/
/*****/ calcul de la résistance aérodynamique *****/

Vitesse_x=C_U(cell,thread);
Vitesse_Y=C_V(cell,thread);
norme=sqrt(pow(Vitesse_x,2)+pow(Vitesse_Y,2));
delta_t=fabs(Tinterne-Tambiant);
Gr=9.81*1/293*delta_t*pow(L,3)*pow(1.22,2)/pow(Visc,2);
Re=1.22*norme*L/Visc;
if (Re*Re<0.1*Gr)
{Nusselt=0.40*pow(Gr,0.25);}
if ((Re*Re>0.1*Gr)&&(Re*Re<10*Gr))
{Nusselt=0.40*pow(Gr+6.92*Re*Re,0.25);}
if (Re*Re>10*Gr)
{Nusselt=0.60*pow(Re,0.5);}
RA=1.22*Chp/(lambda*Nusselt/L);
C_UDMI(cell,thread,2)=RA;

/*****/
/*****/ Calcul de la résistance stomatique *****/
G=C_STORAGE_R_XV(cell,thread,SV_DO_IRRAD,0);
C_UDMI(cell,thread,3)=G;
RS = 2963.6*pow(0.44*4.6*G,-0.349);
C_UDMI(cell,thread,5)=RS;

/*****/
/*****/ Calcul de la resistance totale *****/

RT = RA+RS;

/*****/
/*****/ calcul du coefficient phi1 *****/

phi1=C_R(cell,thread)*Chp*2*LAIV/RA;

/*****/
/*****/ Calcul de la temperature interne *****/

RayAbs=0;

/*Rayonnement absorbé dans la maille*/

for (nb=0;nb<sg_bee_gees;nb++)
{
real abs_coef;
real refractive_index;
/* coefficient d'absorption en multibande */
if (nb==0)
{
abs_coef = Coef_extinc*LAIV;
}
if (nb==1)
{
abs_coef = 0.0;
}
RayAbs+=C_DO_IRRAD(cell,thread,0);
}
C_UDMI(cell,thread,6)=RayAbs;

```

```

/*calcul de la température interne a partir de l'équation de bilan :
Tinterne=T+((ra/2)*rayonnementtotal/(Cp*LAIV))-[(ra/2)*Lv/Cp*(Humi-Hum)]/rt*/
C_UDMI(cell,thread,17)=RA*(RayAbs)/(2*C_R(cell,thread)*Chp*LAIV);
C_UDMI(cell,thread,18)=(RA*Lv/(2*Chp)*(Humfeuille-(C_YI(cell,thread,0))))/RT;
C_UDMI(cell,thread,19)=C_UDMI(cell,thread,17)-C_UDMI(cell,thread,18);
newtemp=Tambiant+RA*RayAbs/(2*C_R(cell,thread)*Chp*LAIV)-(RA*Lv/(2*Chp)*(Humfeuille-
(C_YI(cell,thread,0))))/RT;

/* relaxation*/
Tinterne=(1-rx)*Tinterne+rx*newtemp;
C_UDMI(cell,thread,0)= Tinterne;
phi2=Tinterne*phi1;

/* source term */
source=phi2-phi1*C_T(cell,thread);
C_UDMI(cell,thread,7)=source;

/* derivé du terme source par rapport a la température */
dS[eqn] = -phi1;

return source;
}

/*****
/***** Source de vapeur d'eau végétation *****/
/*****

DEFINE_SOURCE(vapeur_eau0, cell, thread, dS, eqn)
{
real source,x[ND_ND];
int i,nb;
real RayAbs;
float Tinterne,delta_t,Nusselt,Gr,Re,Vitesse_x,Vitesse_Y,norme,Humair;
float RA,Tambiant,DPV,f1,f2,RS,GS,GSmax,newtemp,Humfeuille,G,D,RT;
float phi1,phi2,Pvsat,Newhum,WF,humrelat;

/* on récupère la valeur de la température de l'air dans la maille C_T(cell,thread)*/
Tambiant=C_T(cell,thread);

/* on récupère la valeur de la température de la feuille stockée dans user defined memory 0*/
Tinterne=C_UDMI(cell,thread,0); /* C_UDMI(cell,thread,0) variable Tinterne*/

/* on recupere la valeur de la species mass fraction avec C_YI(cell,thread,0);*/
Humair=C_YI(cell,thread,0); /* C_YI(cell,thread,0) variable Humair*/

/* on récupère la valeur de l'humidité absolue de la feuille stockée dans user defined memory 1*/
Humfeuille=C_UDMI(cell,thread,1); /* C_UDMI(cell,thread,1) variable
Humidite*/

```

```

/*****
/***** calcul de la résistance aérodynamique *****/

Vitesse_x=C_U(cell,thread);
Vitesse_Y=C_V(cell,thread);
norme=sqrt(pow(Vitesse_x,2)+pow(Vitesse_Y,2));
delta_t=fabs(Tinterne-Tambiant);
Gr=9.81*1/293*delta_t*pow(L,3)*pow(1.22,2)/pow(Visc,2);
Re=1.22*norme*L/Visc;
Nusselt=0.40*pow(Gr+6.92*Re*Re,0.25);
RA=1.22*Chp/(lambda*Nusselt/L);
C_UDMI(cell,thread,2)=RA;

/*****
/***** Calcul de la résistance stomatique *****/

G=C_STORAGE_R_XV(cell,thread,SV_DO_IRRAD,0);
C_UDMI(cell,thread,3)=G;
RS = 2963.6*pow(0.44*4.6*G,-0.349);
C_UDMI(cell,thread,5)=RS;

/*****
/***** Calcul de la resistance totale *****/

RT = RA+RS;

/*****
/***** calcul du coefficient phi1 *****/

phi1=C_R(cell,thread)*LAIV/RT;

/*****
/***** Calcul de l'humidité *****/

Pvsat=6.11*exp((17.25*(Tinterne-zero))/(237.8+(Tinterne-zero)));
Newhum=0.622*Pvsat/(1013-Pvsat);

/* relaxation*/

Humfeuille=(1-rx)*Humfeuille+rx*Newhum;
C_UDMI(cell,thread,1)= Humfeuille;
phi2=Humfeuille*phi1;

/*Calcul de l'humidite relative (%) sur les feuilles */
WF=(Humfeuille/RS+Humair/RA)/(1/RA+1/RS);
humrelat=1013*100*WF/(Pvsat*(WF+0.622));
C_UDMI(cell,thread,8)=humrelat;

/* calcul du flux de transpiration*/
C_UDMI(cell,thread,9)=C_R(cell,thread)*Lv*(Humfeuille-
C_YI(cell,thread,0))*LAIS/RT; /* W /m2 */
C_UDMI(cell,thread,10)=C_R(cell,thread)*(Humfeuille-
C_YI(cell,thread,0))*LAIS/RT; /* Kg / m2 s */

/* terme source */
source=phi2-phi1*C_YI(cell,thread,0);/* Kg / m3 s */
C_UDMI(cell,thread,11)=source;

/* dérivée du terme source par rapport à la humidité de la feuille */

```



```

        dS[eqn] = -phi1;

return source;
}

/*****
/***** A ajouter dans l'equation de l'energie : Soure = -Lv*Ql *****/
/*****/

DEFINE_SOURCE(Energie_QL, cell, thread, dS, eqn)
{
real source,x[ND_ND];
int i,nb;
real RayAbs;
float Tinterne,delta_t,Nusselt,Gr,Re,Vitesse_x,Vitesse_Y,norme,Humair;
float RA,Tambiant,DPV,f1,f2,RS,GS,GSmax,newtemp,Humfeuille,G,D,RT;
float phi1,phi2,Pvsat,Newhum,WF,humrelat;

/* on récupère la valeur de la température de l'air dans la maille C_T(cell,thread)*/
    Tambiant=C_T(cell,thread);

/* on récupère la valeur de la température de la feuille stockée dans user defined memory 0*/
    Tinterne=C_UDMI(cell,thread,0); /* C_UDMI(cell,thread,0) variable Tinterne*/

/* on recupere la valeur de la species mass fraction avec C_YI(cell,thread,0);*/
    Humair=C_YI(cell,thread,0); /* C_YI(cell,thread,0) variable Humair*/

/* on récupère la valeur de l'humidité absolue de la feuille stockée dans user defined memory 1*/
    Humfeuille=C_UDMI(cell,thread,1); /* C_UDMI(cell,thread,1) variable
Humidite*/

/*****
/***** calcul de la résistance aérodynamique *****/

    Vitesse_x=C_U(cell,thread);
    Vitesse_Y=C_V(cell,thread);
    norme=sqrt(pow(Vitesse_x,2)+pow(Vitesse_Y,2));
    delta_t=fabs(Tinterne-Tambiant);
    Gr=9.81*1/293*delta_t*pow(L,3)*pow(1.22,2)/pow(Visc,2);
    Re=1.22*norme*L/Visc;
    Nusselt=0.40*pow(Gr+6.92*Re*Re,0.25);
    RA=1.22*Chp/(lambda*Nusselt/L);
    C_UDMI(cell,thread,2)=RA;

/*****
/***** Calcul de la résistance stomatique *****/

    G=C_STORAGE_R_XV(cell,thread,SV_DO_IRRAD,0);
    C_UDMI(cell,thread,3)=G;
    RS = 2963.6*pow(0.44*4.6*G,-0.349);
    C_UDMI(cell,thread,5)=RS;

/*****
/***** Calcul de la resistance totale *****/

    RT = RA+RS;

```

```

/*****/
/**** calcul du coefficient phi1 *****/

phi1=C_R(cell,thread)*LAIV/RT;

/*****/
/**** Calcul de l'humidité *****/

Pvsat=6.11*exp((17.25*(Tinterne-zero))/(237.8+(Tinterne-zero)));
Newhum=0.622*Pvsat/(1013-Pvsat);

/* relaxation*/

Humfeuille=(1-rx)*Humfeuille+rx*Newhum;
C_UDMI(cell,thread,1)= Humfeuille;
phi2=Humfeuille*phi1;

/*Calcul de l'humidite relative (%) sur les feuilles */
WF=(Humfeuille/RS+Humair/RA)/(1/RA+1/RS);
humrelat=1013*100*WF/(Pvsat*(WF+0.622));
C_UDMI(cell,thread,8)=humrelat;

/* calcul du flux de transpiration*/
C_UDMI(cell,thread,9)=C_R(cell,thread)*Lv*(Humfeuille-
C_YI(cell,thread,0))*LAIS/RT; /* W /m2 */
C_UDMI(cell,thread,10)=C_R(cell,thread)*(Humfeuille-
C_YI(cell,thread,0))*LAIS/RT; /* Kg / m2 s */

/* terme source */
source=-Lv*(phi2-phi1*C_YI(cell,thread,0));/* Kg / m3 s */
C_UDMI(cell,thread,20)=source;

/* dérivée du terme source par rapport à la humidité de la feuille */
dS[eqn] = -phi1;

return source;
}

/*****/
/**** Source compensation de rayonnement absorbé *****/
/*****/

DEFINE_SOURCE(RayAbsorbe, cell, thread, dS, eqn)
{
real source;
int i1;
int nb1;
real RayAbs1;
real abs_coeff1;

/*Rayonnement absorbé dans la maille*/

int ni;

C_UDMI(cell,thread,14)=0;
C_UDMI(cell,thread,15)=0;
for(ni=0; ni<sg_disco; ni++)
{
/* composante suivant X de qr */

```

```

C_UDMI(cell,thread,14)+=C_DO_I(cell,thread,ni)*disco_surf_weights[ni][0];
/* composante suivant Y de qr */
C_UDMI(cell,thread,15)+=C_DO_I(cell,thread,ni)*disco_surf_weights[ni][1];
}
C_UDMI(cell,thread,16)=pow(pow(C_UDMI(cell,thread,14),2)+pow(C_UDMI(cell,thread,15),2),0.5);

RayAbs1=0;
    for (nb1=0;nb1<sg_bee_gees;nb1++)
    {
        /* coefficient d'absorption en multibande */
        if (nb1==0)
        {
            abs_coeff1 = Coef_extinc*LAIV;
        }
        if (nb1==1)
        {
            abs_coeff1 = 0.0;
        }
        RayAbs1+=C_DO_IRRAD(cell,thread,0);
    }
    source=-RayAbs1;
    C_UDMI(cell,thread,13)=source;

return source;
}

```

```

/*****
/***** Initialisation de domaine *****/
/*****

```

```

DEFINE_INIT(INIT_Solution, domain)
{
cell_t c;
Thread *thread;

thread_loop_c (thread, domain)
{
    begin_c_loop (c, thread)
    {
        C_UDMI(c,thread,0)= 296.21;
        C_UDMI(c,thread,1)= 0.012;
    }
    end_c_loop (c, thread)
}
}

```

```

#include "udf.h"

/*****
/*****      Profil de vitesse      *****/
/*****
/*****

DEFINE_PROFILE(x_vel_2020_07_28,t,i)
{
    real x, x1[ND_ND];
    real y;
        face_t f;
        begin_f_loop(f,t)
        {
            F_CENTROID(x1,f,t);
                x = x1[0];
                y = x1[1];
                    if (y <= 12)
                        F_PROFILE(f,t,i) = 1.42*pow(y/10,0.7);
                    else F_PROFILE(f,t,i) = 0;
                }
            end_f_loop(f,t)
        }
}

DEFINE_INIT(INIT_TEMP,d)
{
    cell_t c;
    Thread *t;
    real x, x1[ND_ND];
    real y;

    thread_loop_c(t,d)
    {
        begin_c_loop_all(c,t)
        {
            C_CENTROID(x1,c,t);

            x = x1[0];
            y = x1[1];

            /* Mur Ouest */

            if (x >= -1.1 && x <= -0.98 && y >= 0 && y <= 1.96)
                C_T(c,t) = 296.10;

            /* Mur Est */
            else if (x >= 0.98 && x <= 1.1 && y >= 0 && y <= 1.96)
                C_T(c,t) = 296.25;
            /* Sol exterieur et interieur sur la partie bitume */

            else if (x >= -33 && x <= 33 && y >= -1 && y <= 0.02)
                C_T(c,t) = 296.29;
            /* Air */
            else
                C_T(c,t) = 292.48;
        }
    end_c_loop_all(c,t)
}
}

```

```
#include "udf.h"

DEFINE_GRAY_BAND_ABS_COEFF(user_gray_band_abs,c,t,nb)
{
real abs_coeff = 0;

switch (nb)
{
case 0 :
if (THREAD_VAR(t).fluid.porous)
abs_coeff = 2.943;
else
abs_coeff = 0;
break;

case 1 : abs_coeff = 0; break;

}
return abs_coeff;
}
```


Titre : Quantification et modélisation des services climatiques rendus par les arbres dans une rue canyon

Mots clés : Arbre, surchauffe urbaine, confort thermique, CFD

Résumé : Le changement climatique global et les épisodes extrêmes qu'il induit sont devenus l'un des enjeux majeurs de ce siècle. La compréhension du microclimat en milieu urbain suscite une attention croissante de la part des chercheurs depuis quelques années, en raison des phénomènes de surchauffe observés en ville et de la densité de population qui en font un environnement sensible aux vagues de chaleur. De nombreuses études ont montré que la végétation peut réduire la température de l'air en ville, mais ces bénéfices dépendent de l'environnement construit, et de nombreuses variables souvent non-maîtrisées en ville, comme la disponibilité de l'eau pour les végétaux. Dans ce contexte, ce travail de thèse vise à analyser et quantifier les services climatiques rendus dans une rue canyon par des arbres en confort hydrique. Elle s'appuie sur une double approche associant expérimentation et modélisation.

Des campagnes de terrain ont été réalisées sur une maquette arborée à l'échelle (1/5) installée en milieu extérieur sur le site de l'Institut Agro, à Angers, France. Sur le plan numérique, des simulations 2D du climat distribué en régime instationnaire ont été réalisées selon une approche de type CFD. Entre autres résultats, les travaux de cette thèse ont montré que la rue canyon crée une surchauffe pouvant aller jusqu'à 2.8 °C pendant la nuit, et jusqu'à 2.4 °C pendant la journée, et que les arbres peuvent réduire la température de l'air dans la rue de 2.7 °C pendant la journée et améliorer le confort humain thermique en réduisant jusqu'à 8 °C les valeurs de l'UTCI à la mi-journée. Ce travail fournit des éléments de quantification qui pourront aider les décideurs dans leur politique d'aménagement.

Title: Quantification and modeling of climatic services provided by trees in a street canyon

Keywords: Tree, urban overheating, thermal comfort, CFD

Abstract: Global climate change and the extreme events it induces have become one of the major issues of this century. Understanding the microclimate in urban areas has received increasing attention from researchers in recent years, due to the overheating phenomena observed in cities and the population density that makes them a sensitive environment for heat waves. Several studies have shown that vegetation can reduce air temperature in cities, but these benefits depend on the built environment, and on many variables often not controlled in cities, such as water availability for plants. In this context, this thesis aims to analyze and quantify the climatic services provided in a canyon street by well-watered trees. It is based on a double approach combining experimentation and modeling.

Field campaigns were carried out on a tree model at scale (1/5) installed in an outdoor environment on the site of the Institut Agro, in Angers, France. On the numerical approach, 2D simulations of the distributed climate in unsteady regime were performed using a CFD approach. Among other results, the work of this thesis showed that the canyon street creates overheating of up to 2.8 °C during the night, and up to 2.4 °C during the day, and that trees can reduce the air temperature in the street by 2.7 °C during the day, and improve human thermal comfort by reducing mid-day UTCI values by up to 8 °C. This work provides quantification elements that can help decision makers in their planning policies.