



HAL
open science

**EVA (Eau, Végétation, Albédo) EVALUATION
QUANTITATIVE DE L'IMPACT SUR LE
MICROCLIMAT, LES CONSOMMATIONS
ENERGETIQUES DES BATIMENTS ET LE
CONFORT INTERIEUR ET EXTERIEUR DE TROIS
PRINCIPES DE RAFRAICHISSEMENT URBAIN.
APPLICATION AU QUARTIER DE LA PART-DIEU
A LYON**

Marjorie Musy, Philippe Maillard, Marie-Hélène Azam, Jean-Baptiste Bailly,
Elsa Barel, Emmanuel Bozonnet, Isabelle Calmet, Adrien Gros, Christian
Inard, Benjamin Morille, et al.

HAL Id: hal-01590630

<https://hal.science/hal-01590630>

Submitted on 19 Sep 2017

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.

► **To cite this version:**

Marjorie Musy, Philippe Maillard, Marie-Hélène Azam, Jean-Baptiste Bailly, Elsa Barel, et al.. EVA (Eau, Végétation, Albédo) EVALUATION QUANTITATIVE DE L'IMPACT SUR LE MICROCLIMAT, LES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES DES BATIMENTS ET LE CONFORT INTERIEUR ET EXTERIEUR DE TROIS PRINCIPES DE RAFRAICHISSEMENT URBAIN. APPLICATION AU QUARTIER DE LA PART-DIEU A LYON. [Rapport de recherche] ADEME;IRSTV FR CNRS 2488. 2017. hal-01590630

EVA (Eau, Végétation, Albédo)

EVALUATION QUANTITATIVE DE L'IMPACT SUR LE MICROCLIMAT, LES
CONSOMMATIONS ENERGETIQUES DES BATIMENTS ET LE CONFORT
INTERIEUR ET EXTERIEUR DE TROIS PRINCIPES DE
RAFRAICHISSEMENT URBAIN. APPLICATION AU QUARTIER DE LA
PART-DIEU A LYON

QUANTITATIVE ASSESMENT OF THE IMPACTS FROM THREE URBAN
COOLING SOLUTIONS ON MICROCLIMATE, BUILDINGS' ENERGY
DEMAND AND THERMAL COMFORT – APPLICATION TO LYON PART-
DIEU DISTRICT

1^{er} avril 2016

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : *ISRTV – CNRS DR17*
N° de contrat : 1216C0037

Coordination technique : *Céline Phillips* – **Direction\Service :** *Climat*

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

RAPPORT FINAL

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient :

- Céline Phillips (ADEME)
- Sophie Debergue (ADEME)
- Yannick Papaix (ADEME)
- Luce Ponsar (Grand Lyon – Plan Climat)
- Philippe Mary (Agence d'Urbanisme pour le Développement de l'Agglomération Lyonnaise)
- Frédéric Ségur (Grand Lyon – Service Arbres et paysage)
- Nathalie Berthollier (Grand Lyon – Mission Part Dieu)

CITATION DE CE RAPPORT

Marjorie Musy, Philippe Maillard, Marie-Hélène Azam, Jean-Baptiste Bailly, Elsa Barel, Emmanuel Bozonnet, Isabelle Calmet, Adrien Gros, Christian Inard, Benjamin Morille, Davis Mouquet, Ilyes Smadi, Richard Tavares, Staphanie Zaba. 2016. EVA (Eau, Végétation, Albédo) - Evaluation quantitative de l'impact sur le microclimat, les consommations énergétiques des bâtiments et le confort intérieur et extérieur de trois principes de rafraîchissement urbain. Application au quartier de la Part-Dieu à Lyon – Rapport final. ADEME. 327 pages.



ADEME

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

TABLE DES MATIERES

1. CONTEXTE DU PROJET	8
1.1. DEVELOPPEMENT URBAIN DURABLE.....	8
1.2. ENJEUX CLIMATIQUES.....	8
1.3. ENJEUX AUTOUR DU FACTEUR 4	8
1.4. L'AMBIANCE DE LA VILLE.....	9
1.5. POSITIONNEMENT GENERAL DU PROJET	9
1.6. LES TECHNIQUES DE RAFRAICHISSEMENT ETUDIEES.....	9
<i>La végétation urbaine</i> 10	
<i>Matériaux réfléchifs</i> 11	
<i>L'eau (humidification des chaussées et surfaces d'eau)</i> 12	
2. METHODOLOGIE.....	12
3. RESULTATS	13
3.1. BILAN DES EXPERIMENTATIONS D'HUMIDIFICATION	13
<i>Lancement du pilote 2012</i> 13	
<i>Optimisation du pilote (2013)</i> 16	
<i>Mesures complémentaires (2014)</i> 17	
3.2. DESCRIPTION DES MODELES UTILISES.....	19
<i>Introduction : Modélisation des phénomènes climatiques urbains</i> 19	
<i>Solene-microclimat</i> 22	
<i>EnviBatE</i> 28	
<i>ARPS-VUC</i> 31	
3.3. MODELE D'HUMIDIFICATION	38
<i>Représentation d'une surface humidifiée, état de l'art</i> 38	
<i>Modification du modèle de sol</i> 42	
<i>Comparaison aux résultats de la campagne Rosure</i> 48	
<i>Comparaison des mesures aux simulations réalisées avec différents niveaux de discrétisation</i> 51	
<i>Modèle d'humidification</i> 54	
<i>Application à la rue de la Buire</i> 57	
3.4. MISE EN PLACE DES SCENARIOS.....	60

	<i>Scénarios et périmètres de modélisation</i>	60
	<i>Quartier de la Buire</i>	62
	<i>Place de Francfort</i>	63
	<i>Barres rue Moncey</i>	66
	<i>Synthèse de l'approche de gestion des données nécessaires à la simulation</i>	68
	<i>Période d'étude</i>	69
	<i>Sources</i>	69
	<i>Récapitulatif des scénarios</i>	72
3.5.	PREPARATION DES SIMULATIONS AVEC ARPS-VUC.....	72
3.6.	PREPARATION DES DONNEES CLIMATIQUES.....	75
	<i>Climat actuel</i>	75
	<i>Climat futur</i>	81
3.7.	SCENARIOS MONODISPOSITIFS.....	81
	<i>Principes et application aux quartiers</i>	81
	<i>Résultats des simulations</i>	84
3.8.	SCENARIO OPTIMISE.....	93
	<i>Principes</i>	93
	<i>Application aux quartiers</i>	93
	<i>Résultats des simulations</i>	94
3.9.	SCENARIOS PAR SOUSTRACTION.....	97
	<i>Simulations avec SOLENE-microclimat</i>	97
	<i>Besoins énergétiques</i>	98
3.10.	SYNTHESE ET EVALUATION EN COUT GLOBAL.....	99
	<i>Description des critères</i>	99
	<i>Déclinaison des critères sur les quartiers</i>	101
	<i>Données d'entrée</i>	105
	<i>Outils utilisés pour le calcul des critères</i>	107
3.11.	BILAN METHODOLOGIQUE.....	136
4.	VALORISATION.....	136
4.1.	SEMINAIRE DE PRESENTATION DES RESULTATS.....	136
4.2.	AUTRES DIFFUSIONS.....	137
5.	CONCLUSION / PERSPECTIVE.....	137
6.	REFERENCES.....	138
7.	ANNEXE : DOCUMENTS DU SEMINAIRE DU 23/03/2016.....	142
7.1.	PRESENTATION DES ENJEUX DE LA RECHERCHE - MARJORIE MUSY ET PHILIPPE MAILLARD	143
7.2.	PRESENTATION DU PILOTE D'HUMIDIFICATION ET DU MODELE DEVELOPPE DANS SOLENE - MICROCLIMAT - JEAN-BAPTISTE BAILLY ET MARIE-HELENE AZAM.....	169
7.3.	CHOIX DES SITES ET MISE EN PLACE DES SCENARIOS - BENJAMIN MORILLE ET MARJORIE MUSY	215
7.4.	RESULTATS – STEPHANIE ZABA, BENJAMIN MORILLE ET ADRIEN GROS.....	241
7.5.	CONCLUSION ET REPONSES AUX QUESTIONS.....	317

Résumé

Nous proposons d'évaluer les performances de rafraîchissement de trois familles de dispositifs : la végétation, l'eau et les revêtements à fort albédo. Les évaluations sont réalisées sur un quartier existant et problématique au regard du réchauffement climatique, du fait de sa forte densité et de la présence de bâtiments du tertiaire dont la réhabilitation sera difficile, le quartier de la Part-Dieu à Lyon.

Elles reposent sur des modélisations numériques à deux échelles : l'échelle du quartier et celle d'un ensemble de quartiers, permettant d'évaluer l'impact de solutions d'aménagement appliquées à un quartier, sur les quartiers environnant.

Trois modèles sont utilisés : Solene-microclimat (couplage de Solene et Code Saturne, intégrant un modèle de thermique du bâtiment), EnviBatE (couplage de QUIC, Solene et d'un modèle réduit permettant d'évaluer la consommation énergétique d'un stock de bâtiments) et ARPS-canopée (modèle de couche limite atmosphérique urbaine).

Les évaluations sont faites sur la base de scénarios d'aménagements et d'évolutions du climat. Les solutions sont évaluées en termes d'impact sur le microclimat (variables microclimatiques et conditions de confort en extérieur), sur les ambiances intérieures (conditions de confort) et sur les consommations énergétiques des bâtiments. Une analyse en coût global et pour les dispositifs concernés (eau et végétation), un bilan hydrique sont également réalisés pour compléter la comparaison des dispositifs étudiés.

Abstract

We propose to assess the efficiency of three families of urban cooling systems: vegetation, water and cool materials. The assessments are applied to an existing district, which experiences impacts of global warming, due to its high built density and to the presence of office buildings the thermal performances of which will be difficult to enhance: Part-Dieu district in Lyon.

They rely on numerical modelling at two scales: the district scale and the scale of a set of districts allowing assessing the impacts of solutions applied to one particular district on the neighbouring ones.

Three models are used: Solene-microclimat (a coupling of Solene and Code Saturne, including a model to represent a building thermal behaviour), EnviBatE (a coupling of QUIC, Solene and a reduced model to calculate the energy demand of a stock of buildings) and ARPS-canopée (an atmospheric urban boundary layer model).

The assessments are carried out on the base of urban planning scenarios and climate change forecasting. The solutions are assessed in terms of impact from microclimate (climate variables and outdoor comfort conditions), indoor ambiances (thermal comfort) and buildings energy demand. A global cost analysis including a hydric balance (for concerned solutions, water and vegetation) are performed to complete the comparisons.

1. Contexte du projet

1.1. Développement urbain durable

Les grandes agglomérations françaises doivent faire face à des enjeux environnementaux impératifs et complexes, en particulier, la difficile compatibilité entre densification et adaptation climatique. Pour limiter l'étalement urbain et les nuisances qui lui sont attribuées (consommation énergétique des déplacements urbains, émission de gaz à effet de serre, consommation d'espace, imperméabilisation des sols...), il faut reconstruire la ville sur elle-même, la densifier. Cependant, une densification mal organisée conduit à un environnement urbain dans lequel la qualité de vie risque de s'appauvrir. Il s'agit donc d'organiser cette densification pour la rendre acceptable, mais aussi, de l'expliquer, et de la justifier sur des critères objectifs et démontrés. Simultanément, il s'agit d'anticiper l'évolution climatique et ses conséquences. Parmi celles-ci, s'impose, pour les grandes villes, la synergie d'un réchauffement climatique planétaire et d'un effet d'îlot de chaleur urbain avec les conséquences sanitaires dont nous avons pris conscience pendant l'été 2003. Si cette évolution n'est pas envisagée du point de vue de la planification urbaine, la réponse sera à dominante énergétique (rafraîchissement des bâtiments pour solutionner les nécessités sanitaires et les exigences de confort des citoyens), mettant ainsi à mal les objectifs de réduction de la consommation énergétique des bâtiments.

Les deux objectifs environnementaux que nous venons de rappeler se traduisent dans la pratique des projets urbains par des interrogations récurrentes sur les rôles relatifs de la forme urbaine, des matériaux et des aménagements (végétal, eau...). Pour améliorer le confort d'été dans les villes, une des principales solutions avancées est l'accroissement de la place de la végétation. La présence de l'eau est également questionnée. Eau et végétation, on par ailleurs des rôles d'agrément qui les rendent fortement attractifs. Cependant, la ville dense laisse peu de place aux surfaces naturelles et de nouveaux types de surfaces sont proposés.

1.2. Enjeux climatiques

Les phénomènes d'îlot de chaleur urbain (ICU) sont de plus en plus étudiés. On sait qu'ils sont liés à la forme urbaine, aux matériaux et aux charges anthropiques dissipées dans le tissu urbain. Les dissipations thermiques des bâtiments participent de façon importante à l'amplification du réchauffement urbain et les systèmes de climatisation peuvent représenter une part significative des apports de chaleur anthropique, d'autant plus que leur charge augmente avec le réchauffement. Outre les questions de confort en milieu urbain, le phénomène d'ICU pose des questions sanitaires avec parfois des conséquences dramatiques, comme lors de la canicule de l'été 2003.

Le rôle de la densité dans ce phénomène est très délicat à étudier car il est étroitement lié à celui des matériaux et des usages. La végétation a un impact important sur le microclimat urbain. Les ombres portées sur les surfaces participent à la diminution des températures de surface et ainsi réduisent le stockage de chaleur dans les matériaux de construction et les transmissions dans les bâtiments. Ces températures de surfaces plus faibles (végétales et minérales ombragées) améliorent les conditions de confort dans les espaces urbains en été. Les processus d'évapotranspiration de la végétation (ou d'évaporation de l'eau en surface) limitent le réchauffement des surfaces et par conséquent le réchauffement de l'air, les échanges de chaleur étant partitionnés en flux de chaleur sensible et de chaleur latente. Les surfaces humides et la végétation peuvent donc créer localement des îlots de fraîcheur. La disposition des arbres modifie la circulation d'air en protégeant par exemple les bâtiments des courants froids en hiver, ou inversement en favorisant la ventilation naturelle en été.

La végétation joue aussi un rôle dans les stratégies de gestion de l'eau de pluie. Parce que les aménagements végétaux permettent le stockage des eaux pluviales sur place au lieu de leur évacuation directement vers les réseaux, la réintroduction des surfaces naturelles et végétales en ville est une solution pour répondre à deux objectifs : limiter les risques de crues et éviter le coûteux surdimensionnement des réseaux. Enfin, le traitement des matériaux urbains, pour les rendre moins absorbant est également réputé efficace pour atténuer le phénomène d'ICU.

1.3. Enjeux autour du facteur 4

Dans la plupart des grandes villes, l'amplification des phénomènes d'ICU entraîne une consommation supplémentaire d'énergie pour le rafraîchissement des bâtiments en été, tendance qui sera amplifiée par le réchauffement global prévu par le GIEC pour la fin du XXI^e siècle.

Le conditionnement des espaces habités est en outre une des principales sources anthropiques responsables des phénomènes d'ICU. Le secteur du bâtiment constitue donc une des clés pour le respect de l'engagement pris en 2003 de diviser par 4 les émissions nationales de gaz à effet de serre du niveau de 1990 à l'horizon 2050.

Du point de vue technique, le facteur 4 restera beaucoup plus facile à atteindre dans le bâtiment neuf que dans la rénovation, alors qu'il faut compter avec un stock important de bâtiments anciens dont l'amélioration des performances énergétiques devra être programmée sur plusieurs années.

Pour les bâtiments les plus difficiles à rénover, un des leviers consiste à agir sur le contexte climatique local afin de réduire la sollicitation thermique d'été.

1.4. L'ambiance de la ville

L'ensemble des surfaces urbaines participe aux ambiances, mais les aménagements de l'aire urbaine ont varié au cours du temps. Après une période où l'espace urbain a surtout été pensé fonctionnel, il est maintenant d'avantage réfléchi comme un espace d'accueil et de pratique des activités des citoyens.

La végétation est présente en milieu urbain sous forme de jardins privés, squares ou de parcs publics. Elle peut contribuer, en plus d'une vocation récréative et sociale, à résoudre les problèmes urbains comme l'assainissement des eaux pluviales, la pollution atmosphérique, le stockage du carbone, la dépollution des sols... Elle semble être devenue un élément incontournable pour satisfaire aux exigences environnementales mais aussi pour répondre à la volonté des sociétés d'un retour à la nature et à l'amélioration du cadre de vie. Des enquêtes ont par ailleurs mis en évidence la demande sociale de nature : 7 Français sur 10 choisissent aujourd'hui leur lieu de vie en fonction de la présence d'espaces verts à proximité de leur habitation et 3 Français sur 4 fréquentent de façon périodique ou quotidienne, les espaces verts de leur commune. Si les raisons de cet engouement sont diverses, la volonté de se relaxer, de rencontrer les autres habitants et de pratiquer un sport est régulièrement avancée. Ces nouveaux rapports entre ville et végétal participent à l'« ambiance urbaine », résultat d'éléments objectifs, mesurables, par exemple physiques et climatiques (morphologie, densité, minéralisation, microclimat urbain...) et d'éléments plus subjectifs qui varient selon les usages et les perceptions. La réintroduction de la végétation dans la ville, simultanément à la densification, transforme les espaces de vie, les pratiques sociales et les relations de voisinage, générant une nouvelle forme de proximité entre les constructions et les citoyens.

L'eau a également toujours joué un rôle important. Elle est source de vie et d'énergie, symbole de purification et de régénération dans toutes les traditions. En ville, elle est à l'heure actuelle essentiellement considérée pour ses rôles esthétiques et récréatifs, mais son impact climatique est reconnu et des cours d'eau jadis enfermés sous terre sont ré-ouverts. Par ailleurs, l'utilisation de l'eau pour le rafraîchissement urbain, s'intègre dans une approche globale et innovante de la gestion du cycle de l'eau en ville (valorisation de l'eau non-potable, gestion des eaux pluviales, limitation de l'imperméabilisation des sols, nature en ville).

La couleur a connu une présence variable tant géographiquement que temporellement dans les villes, et par exemple les cathédrales étaient très colorées. Elle est fortement présente dans les projets actuels, comme participant à la qualité des espaces urbains, du point de vue perceptif et physique. Cependant, l'impact climatique de la couleur, autrefois considéré est maintenant souvent oublié.

Rappeler ici le contexte et l'objet de l'étude ou du projet de recherche, définir ou décrire le sujet, donner quelques éléments sur les enjeux liés au sujet

1.5. Positionnement général du projet

Les applications concerneront l'échelle du quartier et le quartier choisi est le quartier de la Part-Dieu à Lyon pour des raisons que nous expliquerons. Elles prendront en compte des évolutions du quartier (aménagement, usage) et des évolutions liées au changement climatique.

1.6. Les techniques de rafraîchissement étudiées

La végétation urbaine

Il est montré que la végétation abaisse la température des surfaces et de l'air par effet d'ombrage et par l'évapotranspiration. On trouve ainsi des études qui portent sur différentes échelles et différents dispositifs, dont Musy (Musy 2012) a fait une synthèse. Les dispositifs sont classés par échelle, allant du parc à l'arbre, en incluant les dispositifs architecturaux. Les principales conclusions en sont que les effets climatiques de la végétation, pour un même « dispositif » dépendent fortement du climat, du type végétation, de sa gestion et de son insertion urbaine.

Par exemple, la contribution des arbres à l'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur est partiellement démontrée. Plusieurs phénomènes entrent en jeu: l'advection, l'évaporation, l'effet d'écran au vent, les effets radiatifs (écran solaire, échanges radiatifs de courtes et grandes longueurs d'onde). Le poids relatif de ces effets dépend de nombreux paramètres locaux relatifs au climat et à l'arbre, agissant d'une manière combinée. D'après McPherson, dans la plupart des cas, l'impact direct des arbres sur la température de l'air est moindre que celui dû à l'ombrage, car l'air frais produit dans la couronne de l'arbre est très vite dissipé par les écoulement d'air (McPherson 1992).

Cependant, la concentration d'arbres et d'autres surfaces végétalisées crée un effet d'îlot de fraîcheur qui peut être transporté aux alentours par advection. Hamada et Ohta, comme Spronken et Oke ont montré que pendant la journée, l'effet de l'îlot de fraîcheur résulte de l'effet combiné de l'ombrage et de l'évaporation, combinaison dans laquelle les effets de l'évaporation ne sont pas négligeables (Spronken-Smith & Oke 1998; Hamada & Ohta 2010).

Les effets directs et indirects sur la consommation énergétique des bâtiments ont également fait l'objet de nombreuses études, expérimentales et numériques. Leurs résultats montrent les effets bénéfiques de la plantation d'arbres le long des façades, avec des réductions des consommations allant jusqu'à 50% pour la climatisation (H. Akbari et al. 1992) et des gains plus faibles pour le chauffage (Simpson & McPherson 1998; Julien Bouyer 2009). Les dispositifs architecturaux tels que les toitures et façades végétales ont également fait l'objet de recherches à la fois pour leur effet sur la consommation énergétique des bâtiments et pour leur effet sur le climat (Simpson & McPherson 1998). Notons cependant que l'évapotranspiration peut avoir des impacts négatifs : en effet un fort taux d'humidité entraîne des charges latentes supplémentaires à combattre pour les systèmes de traitement d'air. Il peut également détériorer les conditions de confort thermique intérieur.

Pour représenter ces impacts sur le microclimat dans les modèles climatiques et microclimatiques, il s'agit de représenter les différents phénomènes physiques en jeu, et les paramètres qui les pilotent (conditions hydriques, caractéristiques physiologiques de la végétation...). Quelques modèles détaillés permettent cette prise en compte : Solene-microclimat (Bouyer et al. 2011; Malys et al. 2012), Envi-met (Huttner & Bruse 2009) même si de nombreuses interactions restent paramétrées, notamment le bilan d'eau.

Du point de vue de l'évaluation des impacts sur les consommations énergétiques des bâtiments, seuls ceux des éléments d'enveloppe peuvent être traités dans les modèles de simulation thermique du bâtiment. Ceux de la végétation dans l'environnement d'un bâtiment sont pris en compte dans ces modèles par l'usage de subterfuges (modification du rayonnement solaire incident, définition de couches d'isolation) ou par le développement de modules complémentaires. La mise en place de modèles de thermique du bâtiment intégrés à des modèles microclimatiques est la seule manière d'évaluer correctement impacts directs et indirects car ils permettent une prise en compte des rétroactions du bâtiment sur le microclimat urbain.

Malys a ainsi pu clairement distinguer les impacts directs et indirects de façades végétales, de toitures végétales et de végétation au sol sur le confort d'été dans un bâtiment et montre que les effets indirects des façades végétales en vis-à-vis de bâtiments non isolés peuvent s'avérer très intéressants (Malys 2012). Ceci ouvre la voie à des solutions pour une partie du patrimoine

consommateur en rafraîchissement qu'il sera difficile de rénover (bâtiments tertiaires fortement vitrés).

Matériaux réfléchissants

Les caractéristiques thermophysiques des surfaces urbaines exposées au rayonnement solaire telles que les toitures de bâtiments sont essentielles pour les transferts de masse et de chaleur tant au niveau des ambiances intérieures qu'au niveau du microclimat local et urbain. Les solutions généralement préconisées de rénovation ou de constructions neuves par de fortes isolations thermiques et de très faibles perméabilités à l'air peuvent être sources de surchauffes en conditions d'été (Huttner & Bruse 2009). L'utilisation des techniques de cool roofs ou de ventilation naturelle par lanterneaux ou sheds peuvent être des solutions alternatives intéressantes qui ont été étudiées par de nombreux auteurs en particulier sur cette typologie (Hashem Akbari et al. 2005; E. Bozonnet et al. 2011; Jo et al. 2010; Kolokotroni et al. s. d.; Trabelsi et al. 2011; Zinzi & Agnoli s. d.). Une étude paramétrique sur un bâtiment de référence construit à Poitiers, et modélisé numériquement au LaSIE, a permis d'estimer le potentiel direct de certains paramètres de toiture (Trabelsi et al. 2011). En conditions d'été, les charges thermiques à combattre proviennent des apports internes au bâtiment et des contraintes climatiques locales. Le flux solaire incident absorbé par le système est dépendant de l'ensoleillement, de l'inclinaison des parois considérées et de leurs propriétés thermo-optiques. Une surface de toiture qui combine une réflectivité solaire et une émissivité thermique élevées entraîne une diminution de l'absorption du flux thermique solaire incident et favorise le rafraîchissement par pertes radiatives vers le ciel. Ainsi, les différences maximales de températures observées sur les toitures en été peuvent atteindre de 20 à 30°C.

Cet écrêtement des pics de températures de surface se retrouve évidemment sur les périodes cumulées d'inconfort d'été ou la demande d'énergie de climatisation, mais également sur les échanges convectifs de surface en toiture. En effet, les pics de températures des surfaces extérieures correspondent à des heures de pointe d'appel de puissance électrique liée aux systèmes de climatisation. Des gains sur les pics d'appels de puissance de climatisation de 10 W/m² ont été mesurés sur des centres commerciaux aux États-Unis de par l'application de cool roofs (Hashem Akbari et al. 2005). Ces gains sont contrebalancés partiellement en hiver par la perte du bénéfice des apports solaires « gratuits » pour les zones climatiques ayant recours au chauffage (Synnefa et al. 2007). Cependant, les faibles angles solaires et les durées d'ensoleillement réduites d'hiver atténuent cet effet et les bénéfices sur la demande énergétique globale sont quasi systématiques bien qu'affaiblis pour des fortes isolations thermiques (Gentle et al. 2011).

Les impacts énergétiques directs et indirects de l'urbanisation et de l'environnement extérieur sont difficiles à estimer et à mesurer, et les effets des différents paramètres difficilement discernables. La simulation permet de tester et d'évaluer la portée de l'utilisation de techniques innovantes telles que celles abordées ici. Ainsi, les modifications à grande échelle des surfaces de toitures et pavées ont été envisagées par de nombreux auteurs selon différentes possibilités innovantes (Santamouris et al. 2011), que ce soit l'utilisation de revêtements « cool » (albédo et émissivité thermique élevés), de matériaux colorés « cool » (haute réflectivité dans les proches infrarouges), de revêtements à changement de phase, ou de matériaux thermochromes. L'effet des cool roofs, des TTV et des panneaux photovoltaïques intégrés en toiture a aussi été simulé sur un ensemble de villes américaines (Scherba et al. 2011) pour montrer la réduction du flux sensible absorbé par ces surfaces urbaines en comparaison d'une toiture bitumée classique.

La mise en place de panneaux photovoltaïques noirs de toiture a un effet négligeable sur les pics de flux mais un effet moyen de l'ordre de 11%. Ce flux sensible absorbé par différentes toitures peut se mesurer localement (Takebayashi & Moriyama 2007), mais l'effet à grande échelle doit être intégré dans des modèles à méso échelle à partir des différents termes de flux sensible absorbé par la canopée urbaine. Inversement, pour évaluer correctement l'impact au niveau du bâtiment et des systèmes, il est nécessaire de disposer de modèles capables de simuler des configurations urbaines réalistes.

Comme le met en évidence une étude (de Brito Filho et al. 2011) sur les flux et les températures de toiture de bâtiments climatisés, une isolation thermique renforcée en toiture réduit fortement les flux conduits vers l'intérieur des bâtiments tout en augmentant significativement les températures extérieures et les flux de convection vers le microclimat. Le bénéfice sur le microclimat de l'utilisation de revêtements sélectifs froids en toiture est mis en évidence, quelle que soit la composition de toiture.

L'eau (humidification des chaussées et surfaces d'eau)

L'eau peut également être utilisée comme une des stratégies de climatisation passive en extérieur. Il s'agit alors de mettre en place des dispositifs favorisant l'évaporation de l'eau (Ken-Ichi 1991; Nishimura et al. 1998; Givoni & La Roche 2000). C'est le principe des jets d'eau, des brumisateurs et des tours de refroidissement dans des climats chauds et secs. Ces dispositifs sont utilisés depuis l'antiquité et ont été employés plus récemment durant l'Exposition Universelle de Séville en 1992 (Macho et al. 1995).

Deux effets sont en jeu : celui de rafraîchissement de l'air, du fait de l'évaporation et l'effet radiatif d'une surface froide dans le cas des bassins par exemple ou des miroirs d'eau. Les surfaces d'eau ont également des intérêts esthétiques ou récréatifs. Il y a cependant peu d'études sur leur impact climatique. Robitu et al. montrent que dans le cas du climat nantais, l'impact des bassins d'eau est essentiellement radiatif, car l'effet sur l'air est faible et rapidement dissipé par le vent (Robitu et al. 2006). Cependant l'effet dépend de nombreux facteurs, liés à la surface d'eau, aux conditions climatiques ou à l'environnement urbain proche.

On peut cependant attendre des surfaces d'eau un effet indirect sur les bâtiments, similaire à celui des surfaces végétales pour peu que l'eau reste à des températures faibles.

L'eau peut également être utilisée comme solution de refroidissement des surfaces, soit par humidification des voiries et espaces piétons soit par apposition d'un bassin sur la toiture. Les bassins d'eau en toiture comme moyen de réduction des apports thermiques en été font l'objet d'études depuis 1920 (Cook 1985) et des dispositifs permettant d'en améliorer la performance sont proposés (Tang R 2003; Tang & Etzion 2004). Cependant, leur utilisation reste peu répandue, certainement du fait d'un entretien difficile. Sur les toitures toujours, les techniques de vaporisation d'eau ont été étudiées par Zhou et al. (Zhou et al. 2004) dans le cas de bâtiments avec une forte isolation thermique. Ils concluent que cette technique n'a pas grand intérêt du fait de la forte isolation et de la quantité d'eau qui doit être vaporisée.

Des dispositifs d'aspersion dans l'air ont essentiellement été étudiés au Japon (J. Wang et al. 2010) ainsi que l'humidification des voiries et espaces piétons, qui ont aussi été expérimentés à Lyon. Ces données n'ont à notre connaissance pas encore été intégrées dans des modèles microclimatiques afin d'en évaluer la pertinence à grande échelle.

2. Méthodologie

Le travail a été organisé en 5 étapes.

- 1- Implémentation numérique du modèle d'humidification/arrosage : Les modèles permettent déjà de représenter des surfaces d'eau, mais pas encore l'humidification/arrosage destinée au rafraîchissement des surfaces urbaines. Nous nous appuyons sur les mesures réalisées par Veolia Environnement à Lyon ainsi que sur les mesures faites dans le cadre du projet ROSURE réalisé par l'IRSTV à Nantes (IFSTTAR/LHEEA) et à Lyon (QUI ?) pour développer et intégrer un modèle d'humidification/arrosage. Cette étape a produit un modèle de surface humidifiée/arrosée, intégré aux modèles Solene-microclimat, EnviBatE et ARPS-canopée ainsi que sa validation grâce à des résultats expérimentaux.
- 2- Mise en place des cas d'étude : L'étude portant sur un cas réel, il est nécessaire de le documenter avec précision, et ce différemment suivant les modèles.

ARPS-canopée nécessite une documentation de la morphologie, de l'occupation des sols et des grandes caractéristiques du bâti du quartier étudié et des quartiers environnants. Cette information est ensuite traitée dans un Système d'Information Géographique afin de produire les paramètres d'entrée du modèle ARPS-canopée. S'agissant des deux autres modèles basés sur Solene, les données nécessaires ne concernent que les propriétés du quartier mais doivent être beaucoup plus précises, intégrant une description détaillée des matériaux de surface, des bâtiments et de la végétation. Cette étape a abouti à des maquettes documentées (sous Solene) du quartier étudié, et des quartiers environnants (dans un environnement SIG).

- 3- Définition des scénarios étudiés : A partir de l'analyse du quartier existant et des éventuelles évolutions déjà connues, plusieurs types de scénarios de déploiement des dispositifs ont été développés : 3 scénarios mono-dispositifs extrêmes (couverture maximale par le dispositif), dont les résultats permettront de mettre en évidence les meilleures conditions de performance de ces dispositifs ; Un scénario d'optimisation avec plusieurs dispositifs dans lequel les avantages de chaque type de dispositif seront exploités ; 3 scénarios décomposés par dispositif à partir du scénario optimisé, afin de comprendre comment les effets des dispositifs se cumulent. Le scénario optimisé a été croisé avec un scénario climatique (scénario A2 2050) ce qui, avec les scénarios de référence donne 8 cas actuels par quartier plus deux avec le scénario futur.
- 4- Simulations : Deux étapes de simulation sont nécessaires. La première concerne la simulation de l'état existant et des scénarios monodispositifs. C'est à partir de leur analyse que la définition du scénario d'optimisation a été décidée. Les résultats numériques des simulations ont été analysés en termes d'impact sur les consommations énergétiques des bâtiments climatisés (Consommation sur l'été et puissances de pointe), de confort thermique à l'intérieur et à l'extérieur (pourcentage de temps par types d'inconfort), d'impact climatique à l'échelle du quartier et des quartiers environnants (température, vent, humidité).
- 5- Analyse, synthèse et valorisation : Il s'agit ici de faire la synthèse des résultats des simulations et d'en tirer les enseignements les plus importants quant aux paramètres d'efficacité de chacun des dispositifs, aux modalités de composition et d'interaction des effets. A l'approche énergétique et climatique, a été ajoutée une comparaison des impacts sur la ressource en eau ainsi qu'un bilan en coût global de chacun des dispositifs et des scénarios.

3. Résultats

3.1. Bilan des expérimentations d'humidification

Lancement du pilote 2012

Veolia a réalisé en 2012 une première campagne d'expérimentation d'une solution d'humidification de chaussée. Cette campagne a été réalisée sur le site de la ZAC de la Buire à Lyon (Figure 1).

La solution testée consiste à humidifier périodiquement, à l'aide de buses disposées dans la bordure de la rue, une chaussée étanche classique, à l'aide d'un dispositif permettant une humidification homogène de la totalité de la surface de la chaussée. Cette solution s'inspire de différents essais avec de l'eau non potable réalisés au Japon, dont les grandes villes sont particulièrement touchées par le phénomène d'ICU (Ministry of the Environment of Japan, 2012). L'humidification des rues est une des solutions envisagées dans le projet EPICEA (METEO-France, 2012) pour réduire le phénomène d'ICU à Paris.



Figure 1 : Humidification de la chaussée, rue de la Buire (2012)

A cette occasion, plusieurs démarches ont été entreprises avec le Grand Lyon et l'aménageur du site pour mettre en place le pilote :

- Conception et mise en œuvre d'une solution d'humidification
- Travaux de voirie
- Création du protocole expérimental

La performance de la solution est déterminée en comparant les résultats obtenus avec ceux mesurés au niveau d'une rue témoin située dans le quartier, possédant des caractéristiques proches de celles de la rue pilote (orientation, largeur et hauteur) mais non équipée d'un système d'humidification.

Six stations de mesure climatiques (Figure 2) ont été mises en place au niveau de la rue pilote (stations 13 et 14) et au niveau de la rue témoin (stations 15, 16 et 17) pour mesurer les paramètres physiques significatifs :

- température au centre de la chaussée (à 1 cm environ en dessous de la surface de la chaussée, au milieu);
- paramètres mesurés à 1,5 m sur le trottoir : température de l'air, hygrométrie, température moyenne de rayonnement (globe noir) (réalisées avec un pas d'une minute) ;
- paramètres mesurés à 4 m du sol : température de l'air, hygrométrie, direction et vitesse du vent, ensoleillement (réalisées avec un pas d'une minute).

Ces paramètres vont notamment permettre de calculer des indicateurs de confort extérieurs standardisés comme le WBGT (*Wet Bulb Globe Temperature*, décrit par la norme ISO 7243)

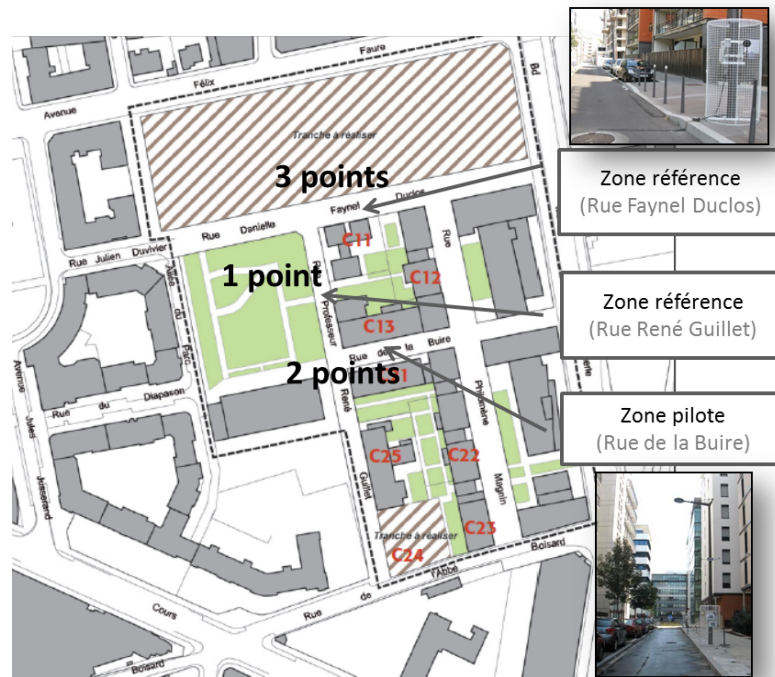


Figure 2 : Localisation des dispositifs d'humidification et de mesures

Les essais se sont déroulés du 13 août au 12 septembre 2012. Plusieurs programmes d'humidification ont été testés manuellement afin de comparer leurs impacts sur les différents paramètres physiques et indicateurs de confort :

- Programme n°2 : humidification toutes les 15 mn de 14 h 00 à 18 h 00 ;
- Programme n°3 : humidification toutes les heures de 06 h 00 à 18 h 00 ;
- Programme n°4 : humidification toutes les heures de 06 h 00 à 14 h 00, puis toutes les 30 mn jusqu'à 18 h 00.

Il apparaît que la solution d'humidification permet, sur ces quelques jours de forte chaleur (Figure 3) :

- De réduire la température de chaussée d'environ 5°C ;
- De réduire le WBGT de 0,5°C environ, l'impact sur cet indicateur étant moins marqué compte tenu des niveaux initiaux.

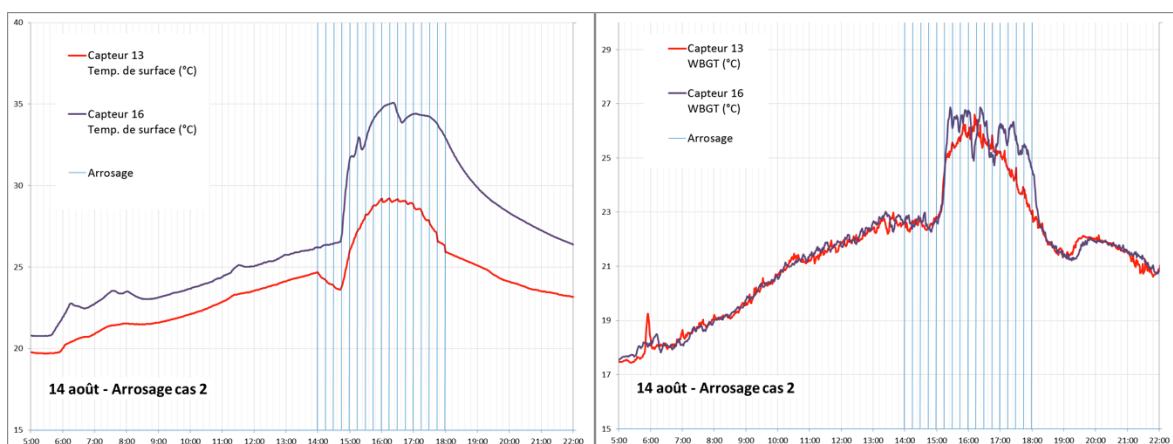


Figure 3 : Comparaison des températures de chaussée et du WBGT calculés pour la rue pilote (capteur 13) et la rue témoin (capteur 16)
(Source : Veolia)

Optimisation du pilote (2013)

L'expérimentation 2012 avait donné des premiers résultats, cependant, certains problèmes ont été rencontrés :

- Les données climatiques recueillies à l'intérieur d'une même rue par les différents points de mesures étaient semblables
- La commande manuelle de l'ouverture des vannes pour l'humidification limitait les possibilités de scénarios
- Les variations climatiques et la courte durée d'étude ont entraîné un manque de redondance des mesures, limitant ainsi les conclusions possibles.

La campagne 2013 a donc été optimisée selon deux objectifs :

- Optimiser les cycles d'humidification pour obtenir la meilleure performance sur la réduction de la température de chaussée et du WBGT
- Programmer des cycles pour alimenter la modélisation dans Solene MicroClimat.

Ainsi les changements effectués ont été :

- Automatisation du pilote, afin de tester différents programmes : centralisation des mesures et des commandes sur un seul tableau de bord et programmation pour le déclenchement automatique suivant une mesure seuil (à l'aide de l'automate Sofrel)
- La mise en place d'un service de connexion à distance aux résultats afin de faciliter les mesures
- La réduction à seulement deux points de mesure 13 et 16 pour évaluer les performances par comparaison entre les 2 rues

Afin d'estimer au plus juste le gain de température de surface obtenu avec l'humidification de chaussée, **un écart structurel** entre la rue humidifiée et la rue témoin a été défini.

Cet écart est obtenu en calculant la différence entre les valeurs $[T_{\text{humide}} - T_{\text{témoin}}]$ pour un jour non humidifié.

On obtient ainsi un écart variable sur 24h (Figure 4), que l'on peut soustraire de la rue témoin (point 16) les jours d'arrosage afin de « modéliser » la température de surface qu'aurait la rue de la Buire (point 13) en l'absence d'arrosage.

Cependant il existe une forte variabilité entre les « journées témoins », dues aux différences de conditions météorologiques et la comparaison n'est possible et n'a été réalisée que si les deux courbes sont superposables (écart faible) avant l'ensoleillement et l'humidification ($\approx 16h$).

Les données brutes 2013 (sans correction ni calcul d'indicateurs) ont été utilisées pour consolider le modèle d'humidification construit dans Solene-Microclimat.

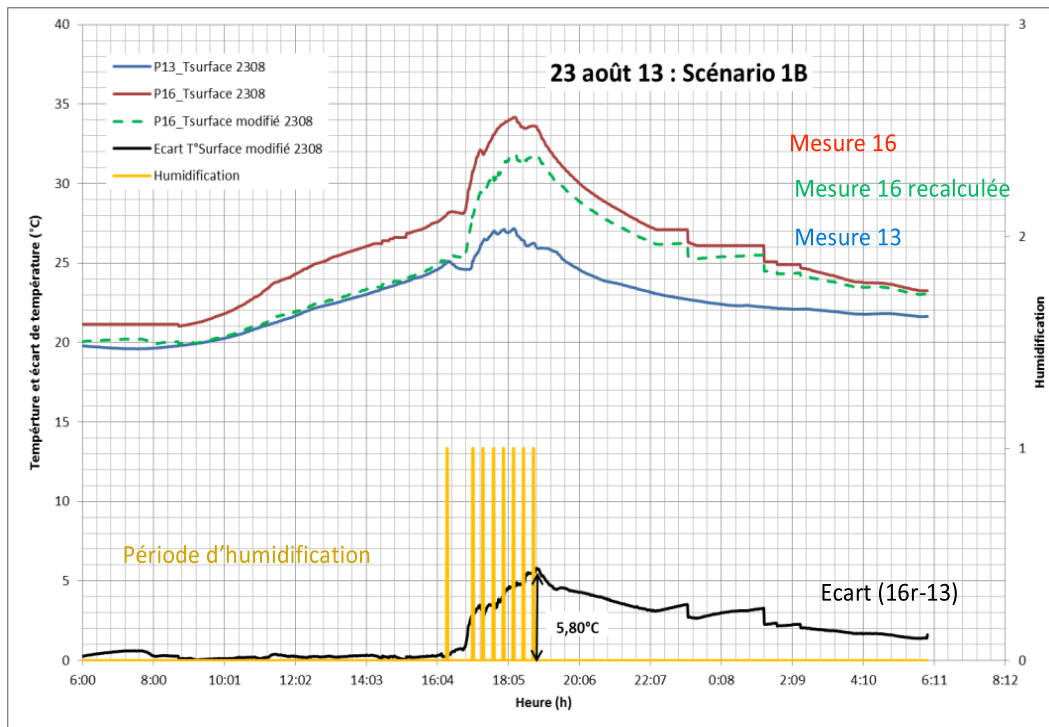


Figure 4 : Exemple de résultats (23 août 2013)

Mesures complémentaires (2014)

Une dernière campagne de mesure a été menée durant l'été 2014. Les objectifs étaient :

- de tester de nouvelles méthodes de mesures, notamment de température de surface mesurée à distance grâce à un pyromètre InfraRouge et à une caméra thermique.
- de vérifier les conditions de dispersion d'eau et d'homogénéité de température.
- de pousser certains essais d'humidification nocturnes.

Cependant la détérioration accidentelle des sondes de températures PT100 présentes dans la chaussée et utilisées les années passées n'ont pas permis de pousser les essais et la comparaison avec les années passées.

Les essais de mesures à l'aide d'autres instruments ont cependant pu avoir lieu.

Un pyromètre IR (Sonde oprtris CS) a été installé dans la cage de mesure au milieu de la rue de la Buire (Figure 5).

Des comparaisons de mesures entre cet instrument, un deuxième pyromètre portable et une sonde PT100 plaquée au sol ont été menées afin de s'assurer de la validité des données de température.

Il ressort que sur les périodes non humidifiées et hors ensoleillement direct (i.e. avant 15h), les écarts entre les appareils sont de +/-1.5°C, ce qui correspond au niveau de précision de l'appareil.

Par contre, durant les périodes d'ensoleillement direct et d'humidification de la chaussée, on note un très fort écart de température. Cet écart s'explique en partie par la réflexion des infrarouges sur la route humidifiée, accentuée par l'angle entre le pyromètre et la verticale.



Figure 5 : Pyromètre IR et spot de mesure (2014, Veolia)

Pour les mesures réalisées à l'aide d'une caméra thermique (Fluke TI 25), elles ont permis plusieurs mesures et constats : (voir Figure 6)

- un écart de température de surface d'environ 4°C entre les zones humidifiées et les zones sèches dans la rue de la Buire à l'ombre.
- un écart d'environ 12°C en surface entre les zones humidifiées et les zones sèches dans la rue ensoleillée.

Par ailleurs (voir Figure 7) :

- la température de surface sur les zones exposées plus longuement au soleil atteignent une température plus élevée (environ 43°C contre les 34°C de la Figure 6).
- la température de surface est répartie de manière homogène sur toute la surface, à l'exception de certains caniveaux du bord opposé.

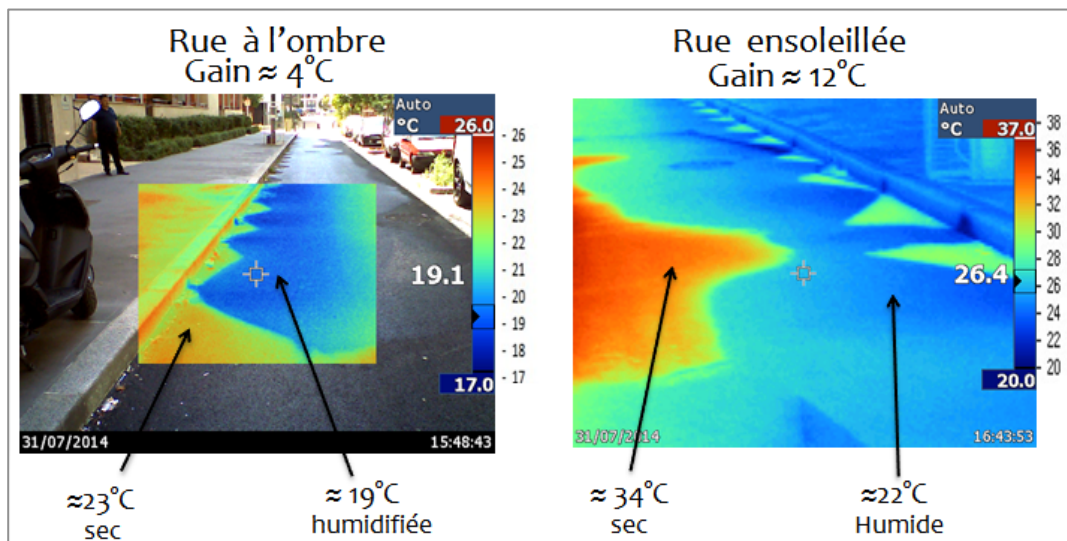


Figure 6 : Mesures à la caméra thermique,1 (2014, Veolia)

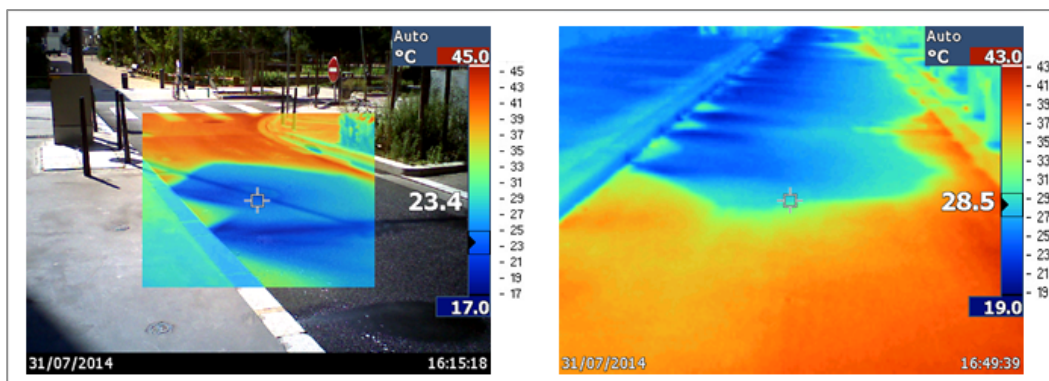


Figure 7 Mesures à la caméra thermique,2 (2014, Veolia)

Globalement les relevés de 2014 et 2013 sont en accord avec des essais menés sur d'autres expérimentations comme (Yamagata et al., 2008) ou (Hendel et al., 2014; Hendel and Royon, 2015)

3.2. Description des modèles utilisés

Introduction : Modélisation des phénomènes climatiques urbains

Les couplages physiques

Si la représentation des phénomènes physiques urbains est relativement aisée, celle des multiples interactions entre eux l'est moins. Cependant, les processus physiques (thermique, aérodynamique, hydrologie, rayonnement...) impliqués dans le microclimat urbain et le comportement thermique des bâtiments ne peuvent être considérés indépendamment les uns des autres.

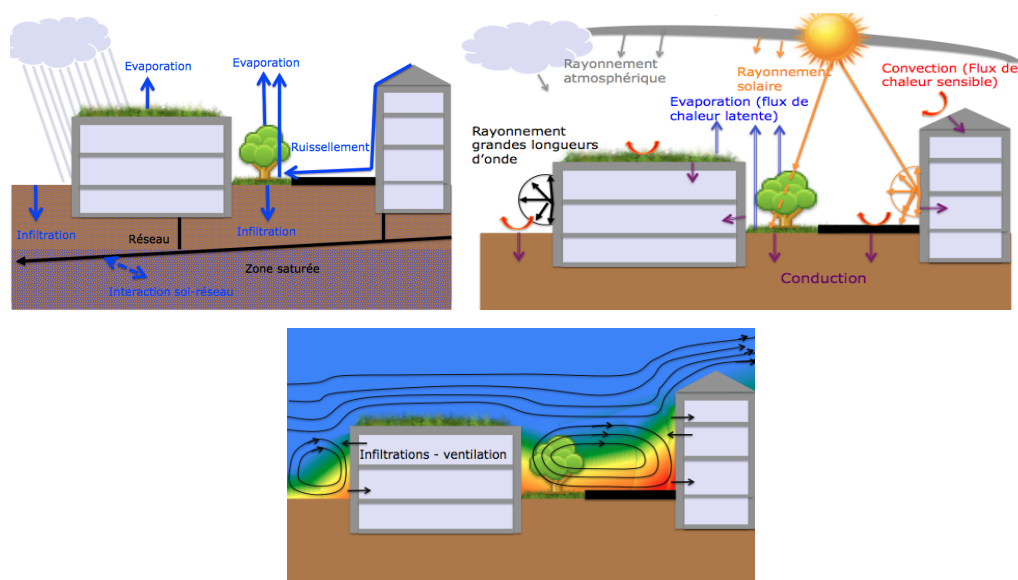


Figure 8 : Bilans thermo-radiatifs et hydriques, et processus aérauliques (Musy et al., 2012)

Le bilan hydrique (Figure 8) traduit les échanges d'eau entre le sol et ses réseaux, les surfaces et l'atmosphère en période de temps de pluie ou en temps sec, et prend en compte la variabilité spatiale des caractéristiques de la surface du sol (imperméabilisation, présence de végétation), des propriétés hydrodynamiques des sols (perméabilité) et de la présence de réseaux enterrés qui constituent des lieux de drainage préférentiels dans le sol. Au flux d'évapotranspiration entre surface et atmosphère correspond un flux de chaleur, le flux de chaleur latente.

Le bilan énergétique exprime l'équilibre entre le rayonnement net, le flux de chaleur latente (issu du bilan hydrique), le flux de chaleur sensible (convection au niveau des surfaces) et le flux de chaleur par conduction dans les sols et au travers de l'enveloppe des bâtiments (stockage). Dans ce dernier cas, ce flux de chaleur par conduction dépend du traitement des ambiances intérieures (chauffage/climatisation). Un bilan thermique du bâtiment peut être fait afin d'écrire l'équilibre entre les flux de chaleur au travers des murs et des toits, les apports solaires, les charges internes (usages, équipements...) et les flux liés à la ventilation et aux infiltrations de l'air à travers l'enveloppe.

Le flux de chaleur sensible au niveau des parois dépend des écoulements et de la température de l'air à proximité de la paroi. Les débits de ventilation et les infiltrations dans les bâtiments dépendent également de ces écoulements qui conditionnent les niveaux de pression sur les parois.

On constate donc qu'il y a dans chacun de ces bilans des flux et variables d'état qui expriment les interactions entre les phénomènes physiques. Ces interactions sont souvent négligées ou simplifiées. Cependant, s'agissant d'évaluer des dispositifs d'adaptation et d'atténuation climatique, il est difficile de négliger ces phénomènes qui sont justement ceux sur lesquels reposent ces dispositifs.

Modèles climatiques aux échelles urbaines

Pour les différentes échelles urbaines (de la ville au fragment urbain¹), on peut recenser quatre grandes familles de modèles :

- les modèles hydrologiques,
- les modèles de bilan radiatif,
- les modèles aérauliques,
- et les modèles de bilan thermique.

Tous ont beaucoup évolué, pour s'adapter aux nouvelles hypothèses d'aménagement urbain et représentent les interactions physiques soit en les intégrant directement dans les modèles existants, soit en réalisant des couplages entre modèles spécialisés.

Une des difficultés de mise en œuvre des couplages reste que les échelles de description spatiale ou temporelle des phénomènes ne sont pas toujours les mêmes. Par exemple la simulation des consommations énergétiques des bâtiments est en général effectuée sur une période d'une année (avec un pas de temps d'une heure et des fichiers météo obtenus par traitement statistique de données trentenaires permettant de définir des normales climatiques (Bertolo and Bourges, 1992) alors que les simulations microclimatiques permettant l'obtention de données très locales sont davantage tournées vers une représentation de conditions climatiques types ou de séquences climatiques de quelques jours. Il est alors apparu que de coupler ces modèles pour obtenir une estimation des consommations énergétiques avec une prise en compte du climat local et de l'effet du bâtiment sur ce climat n'est pas si immédiat.

Aux différentes échelles de description du climat urbain (Figure 9), correspondent des objectifs différents. Pour étudier l'influence des villes sur l'atmosphère et en particulier le phénomène d'îlot de chaleur urbain, la communauté scientifique a développé des modèles permettant de reproduire les principaux échanges énergétiques et hydriques entre le milieu urbain et l'atmosphère. La dernière décennie a ainsi connu des avancées considérables dans l'urbanisation des modèles atmosphériques (Dupont et al., 2004; Lemonsu and Masson, 2002;

¹ Le fragment urbain est défini ici comme une échelle intermédiaire entre le bâtiment et le quartier. Ce peut être un îlot ou une place et les bâtiments qui l'entourent... Le quartier correspond d'avantage à une division administrative de la ville. Le fragment urbain correspond à l'élément que nous isolons pour nos études.

Leroyer et al., 2010; Martilli et al., 2002). Lorsque l'on s'intéresse au confort de l'utilisateur de la ville, l'échelle considérée est celle de son environnement proche : la rue, la place... Ces études sont généralement menées à l'aide de modèles décrivant explicitement les aménagements urbains (bâtiments, arbres isolés...) et modélisant leur impact local sur l'ensoleillement, le vent, la température et l'humidité de l'air (Ali-Toudert, 2005; Bouyer, 2009; Robitu et al., 2006a).

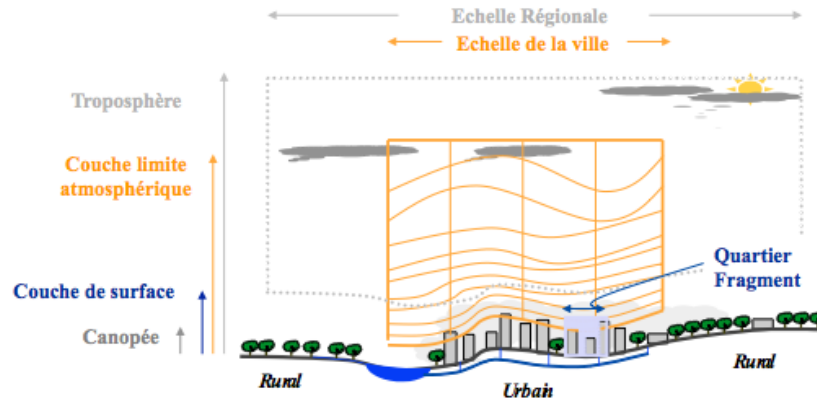


Figure 9 : Echelles de la micro-climatologie urbaine (Musy et al., 2012)

Même si l'échelle d'étude est celle qui répond au mieux à la question posée, la connaissance des variables climatiques à l'échelle de la ville peut s'avérer importante dans l'étude des conditions de confort, pour replacer le fragment urbain étudié dans son environnement et extraire des informations sur les modifications engendrées par les formes urbaines et les aménagements locaux. Afin de relier les différentes échelles, des plateformes de modélisation sont mises en place pour forcer les modèles dédiés à l'échelle du fragment urbain par des conditions météorologiques à haute-résolution issues de modèles à plus grande échelle (Chen et al., 2011). Même si les problèmes de transport et dispersion de polluants dans la rue sont à l'origine de ces travaux de couplage (Tewari et al., 2010), on peut présumer du bienfondé de ces approches multi-échelles pour les études de microclimat local.

A l'inverse, la connaissance des processus qui interviennent à « petite échelle » permet d'améliorer la modélisation des processus physiques qui participent au climat urbain à plus « grande échelle », tout en restant en adéquation avec l'échelle considérée. Ceci a conduit au développement de schémas de « paramétrisation » de la ville de plus en plus sophistiqués, en termes de description spatiale du tissu urbain et de processus physiques représentés. Il n'y a pas à l'heure actuelle de consensus quant au degré de complexité requis pour des applications à méso échelle. En effet, la complexité du modèle allant de pair avec la quantité d'informations nécessaire pour l'alimenter, certains modèles théoriquement plus détaillés peuvent se comporter moins bien, par manque de données, que des modèles simplifiés. En revanche, il paraît important de raffiner suffisamment ces modèles pour prendre en compte l'hétérogénéité du milieu urbain et les interactions fortes entre les différents quartiers, et être ainsi en mesure d'aborder la modélisation du climat urbain en assurant une cohérence entre les différentes échelles.

Nous avons choisi de travailler avec trois modèles :

- Solene-microclimat qui permet une modélisation climatique à l'échelle de l'îlot, avec la possibilité de représenter la végétation, d'évaluer le confort et les besoins énergétiques d'un bâtiment dans l'îlot ;
- EnviBatE qui permet une modélisation climatique à l'échelle du quartier, et d'évaluer le confort et les besoins de l'ensemble des bâtiments du quartier ;
- ARPS-canopée qui permet une modélisation climatique à l'échelle de la ville incluant les effets de la végétation et du bilan énergétique des surfaces urbaines.

L'utilisation simultanée d'outils à différentes échelles nous permet de prendre des conditions aux limites réalistes pour les petites échelles, mais aussi de mieux paramétrer la grande échelle à partir des résultats de la petite échelle.

Solene-microclimat

SOLENE-microclimat a été développé pour l'évaluation de condition de confort extérieur en site urbain (Vinet, 2000). De nouveaux modules ont été ajoutés pour cela. Ces ajouts permettent de disposer maintenant d'un outil permettant de prendre en compte : 1) les transferts radiatifs incluant les grandes longueurs d'onde 2) la conduction et le stockage dans les murs et les sols; 3) les écoulements d'air et les échanges convectifs; 4) l'évapotranspiration des surfaces naturelles telles que la végétation et les surfaces d'eau and 5) la demande énergétique et les conditions de confort dans un bâtiment de la zone étudiée. Le point 1 correspond à *SOLENE*, le modèle radiatif historique, tandis que les Points 1+2 correspondent au modèle thermo-radiatif basé sur *SOLENE* et les Points 1+2+3+4+5 à ce que nous nommons *SOLENE-microclimat* (Figure 10).

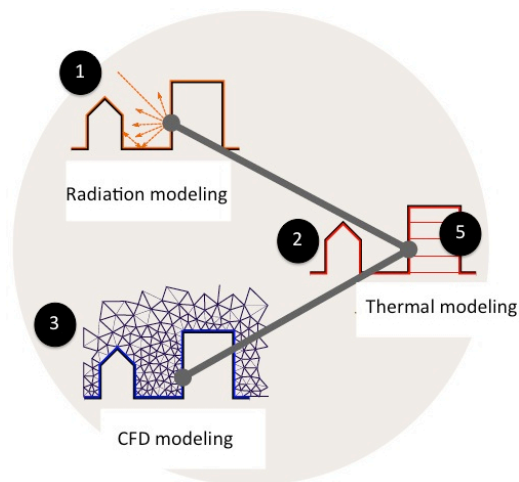


Figure 10 : Modules couplés pour passer de *SOLENE* à *SOLENE-microclimat*, source : (Malys, 2012)

Le modèle Thermo-Radiatif

A sa création, de 1993 à 2000, l'outil de simulation *SOLENE* (Miguet and Groleau, 2007) était dédié au calcul des effets solaires et lumineux dus aux formes urbaines et aux matériaux utilisés dans les projets architecturaux et urbains; cet outil est basé sur un modèle surfacique 3D (Figure 11).

Pour l'étude des conditions de confort extérieur des piétons, un module thermique qui inclut le rayonnement de grandes longueurs d'onde, la conduction et le stockage de la chaleur dans les surfaces construites a été intégré. Ce modèle thermo-radiatif a été détaillé par Hénon et al. (Hénon et al., 2012a, 2012b, 2011).

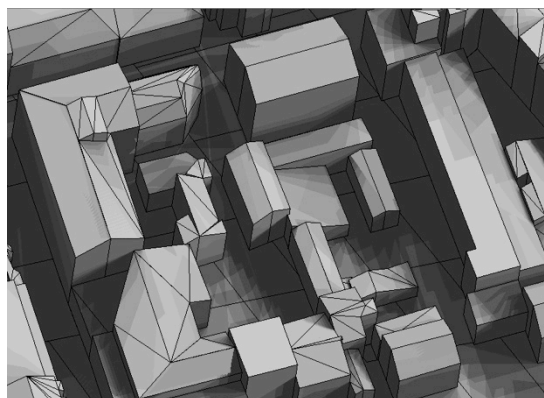


Figure 11 : Le modèle 3D d'une portion de quartier dans *SOLENE* (avec des projections solaires sur une journée)

Les scènes simulées sont modélisées par une grille 3D composée de facettes rectangulaires ou triangulaires, dont la surface dépend de la taille de la scène simulée. Une géométrie hémisphérique supplémentaire représente la voûte céleste (Figure 12). Elle est également maillée pour prendre en compte l'anisotropie du rayonnement solaire diffus. Le spectre de rayonnement est divisé en deux bandes correspondant au rayonnement solaire et au rayonnement thermique infra-rouge. Le rayonnement solaire direct est émis par le maillage de ciel depuis la direction du soleil, tandis que l'émission de rayonnement solaire diffus est répartie sur tout le ciel maillé conformément à un modèle radiatif de ciel (e.g. Perez *et al.* (1993)). Le rayonnement thermique de ciel est supposé être isotrope.

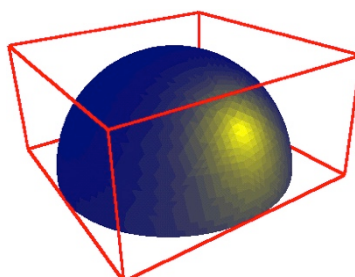


Figure 12 : Modèle de ciel (ciel clair)

A chaque pas de temps, le rayonnement solaire absorbé par chaque facette est calculé comme étant le résultat du rayonnement solaire direct et diffus reçu par la facette directement à partir à la fois du soleil et du ciel, plus les réflexions provenant de toutes les autres facettes vues, moins le flux réfléchi par la surface.

Ces réflexions multiples sont calculées selon une méthode de radiativité qui nécessite: 1) le calcul géométrique des facteurs de forme entre toutes les facettes de la surface construite et la voûte céleste, (Miguet and Groleau, 2002; Vinet, 2000), et 2) d'attribuer des propriétés radiatives (réflexion, transmission et absorption) à toutes les surfaces de la scène.

Le bilan énergétique peut alors être calculé pour toutes les facettes, en écrivant l'équilibre du flux solaire absorbé, du flux infrarouge net, du flux de chaleur échangé avec l'air par convection et du flux de chaleur transmis par conduction à travers les matériaux à l'arrière de la facette. Le flux de chaleur par convection dans l'atmosphère est calculé en utilisant la différence de température entre la surface et l'air et un coefficient de transfert de chaleur par convection (h_c), qui peut ensuite être affecté d'une valeur constante ou dépendante de la vitesse du vent en un point dans le cas d'un couplage avec un code CFD (Hénon *et al.*, 2012a, 2011). Le flux de chaleur par conduction est calculé au moyen d'un modèle multi-couches (Vinet, 2000) qui représente le stockage de la chaleur dans les couches, la conduction à travers les couches (en fonction des propriétés thermiques des matériaux) et la convection entre la paroi et le nœud d'air à l'intérieur du bâtiment. Cette température est imposée en fonction de la température de consigne intérieure. Le transfert de chaleur à travers les couches du sol et dans le sol en profondeur est calculé de façon similaire. Étant donné que la température de la surface externe de chaque facette est liée à celle des autres facettes, via le calcul du rayonnement de grandes longueurs d'onde, le système d'équations est résolu par itération à chaque pas de temps.

Hénon *et al.* ont comparé les résultats de simulations effectuées avec Solène par rapport à des températures obtenues à partir d'une caméra thermique au niveau de la facette et du pixel (Hénon *et al.*, 2012a, 2012b). Les mesures ont été acquises au cours de deux périodes d'observation intenses en été et en hiver sur le centre de Toulouse. Deux tiers des pixels ont été simulés avec une précision inférieure à 5°C et l'autre tiers à moins de 2,5°C. Les différences étaient principalement dues au fait que certains types de surface ne sont pas présents dans le modèle. En effet, les données détaillées de toutes les surfaces de la scène ne sont pas facilement disponibles, en particulier les couches intérieures des murs et la température intérieure. Par ailleurs, les nombreux petits détails ne peuvent pas être représentés. Hénon propose des

améliorations pour le modèle de paroi qui ont depuis été mis en œuvre et par la suite validées par Malys avec des données de la campagne Fluxsap 2010 (Mestayer et al., 2011). Après une étape d'identification de données, Malys compare un groupe de points (sur un toit, sur un mur et dans le sol), dont la température a été mesurée régulièrement pendant plusieurs jours et les résultats de simulation. Le modèle a été capable de reproduire avec précision la variation temporelle de la température de surface.

Couplage CFD

Le premier couplage avec la CFD a été réalisé par Vinet qui utilisait le code CFD N3S, lequel a depuis été remplacé par Fluent (Robitu, 2005a) et maintenant par CodeSaturne (<http://code-saturne.org/cms/>). Le principe de couplage a été détaillé par Bouyer et al. et offre trois possibilités (Bouyer et al., 2011) :

1) Le couplage dynamique complet (CFD / itérations thermo- radiatives jusqu'à convergence stricte) , qui a été utilisé par Robitu (Robitu, 2005a). Ces calculs étaient très gourmands en temps et l'utilisation d'un tel couplage n'est pas toujours justifiée, sauf pour les questions de confort extérieur en condition de vent faible quand on ne peut pas négliger les effets de convection naturelle;

2) Le couplage quasi-dynamique (une seule itération entre CFD et simulation thermo - radiative) : ce couplage peut être insuffisant pour obtenir un effet rétroactif complet des températures pour bien représenter le transport de la chaleur et de l'humidité dans le code CFD ;

3) Un couplage intermédiaire proposé par Bouyer et al. (Bouyer et al., 2011) Les champs de vitesse et de turbulence sont pré- traités pour chaque direction et vitesse du vent. Ensuite, pour chaque pas de temps pendant le processus itératif, seules les équations de transport de l'énergie et de l'humidité sont résolues. Le coût de calcul est considérablement réduit. Cette approche intermédiaire revient à supposer que le flux d'air n'est pas perturbé par le transfert de chaleur à la surface des parois.

Le couplage CFD est également utilisé pour calculer le transfert et la diffusion de l'humidité dans le cas de surfaces naturelles, comme on le verra plus loin. Dans la pratique, dans ce cas de couplage, les variables échangées entre le CFD et le modèle thermo-radiatif sont les suivants:

- De la CFD à SOLENE : La vitesse de l'air près de la surface utilisée pour calculer le hc requis dans SOLENE. A cet effet, la loi linéaire dérivée de Jayamaha et al. a été choisie (Jayamaha et al., 1996); La température de l'air près de la surface, qui est également nécessaire pour calculer le flux de chaleur par convection à la surface du mur (en plus de l'évaluation de la charge sensible de ventilation) .
- De Solène à la CFD : Les flux de chaleur de convectifs affectant l'équation de transport d'énergie. Les températures de surface pourraient éventuellement être transférées, mais alors, les flux de chaleur résultant du calcul CFD pourraient différer de ceux calculés avec SOLENE, conduisant ainsi à la divergence.

Nous avons étudié l'impact de différentes méthodes de couplage sur l'évaluation de la demande d'énergie d'un bâtiment dans la scène. Ces tests ont été réalisés pour différents types de bâtiment, peu ou fortement isolés. Pour commencer, trois corrélations ont été testées afin de calculer le coefficient d'échange convectif (hc) (Malys et al., 2012) :

- Un hc constant ;
- Une estimation de $hc(t) = 4,955 + 1,444 v(t)$, où $v(t)$ est la vitesse du vent à partir des données mesurées à 10 m de hauteur (Jayamaha et al., 1996); La même corrélation que ci-dessus , mais avec une vitesse du vent qui varie en fonction de l'altitude de chaque facette : $hc(t) = 4,955 + 1,444v(t)(z/z_0)^{1/3}$.

Au cours de cette étude, nous avons également comparé les différentes approximations utilisées pour représenter le rayonnement de grandes longueurs d'onde et conclu que l'impact des approximations de hc sur la demande d'énergie est très faible, alors qu'il est beaucoup plus

important de prendre en compte correctement les échanges infra-rouges entre les bâtiments et avec le ciel.

D'autres tests de couplage ont été effectués, en particulier pour déterminer si l'utilisation de la température locale dans le flux convectif est réellement nécessaire. Nous avons conclu que, pour des simulations en conditions hivernales, le couplage thermique avec l'utilisation du modèle aérodynamique afin de représenter les effets de voisinage peut être évité. C'est moins vrai en conditions estivales car le rayonnement solaire sur les surfaces modifie la température locale dans des proportions plus élevées.

Cette partie couplage du modèle n'a pas encore été validée, bien que certaines comparaisons de températures et d'écoulement d'air aient été tentées sur une rue canyon composée de conteneurs. Ces travaux ont montré un bon accord entre simulations et mesures tant sur la température de l'air que sur la vitesse de vent dans la rue (Athamena, 2012).

Couplage avec la simulation thermique des bâtiments

Le couplage avec la simulation énergétique d'un bâtiment est présenté en détail par Bouyer (Bouyer et al., 2011). Il est constitué d'un sous-modèle dans SOLENE, basé sur un modèle nodal multizone, dont chaque nœud correspondent à un étage du bâtiment. Toutes les facettes externes relatives à un étage sont liées de sorte que les flux conduits et le flux transmis à travers les fenêtres contribuent au bilan de chaleur de l'étage. Les températures intérieures, ou la puissance de chauffage ou de refroidissement nécessaire pour maintenir la température intérieure à un point de consigne peuvent alors être calculées.

Cette partie n'a pas encore été validée non plus. Cette étape nécessitera le monitoring d'un bâtiment bien connu, depuis sa surface extérieure, jusqu'aux conditions internes, comme des maisons de INCAS (Spitz et al., 2012), pour lesquelles les charges internes sont connues avec certitude, comme l'environnement proche.

Selon que nous chercherons à évaluer l'impact sur le confort ou sur une charge de climatisation, nous calculerons soit la température intérieure, soit la demande énergétique. Pour les bâtiments résidentiels étudiés, qui ne disposent pas de système de rafraîchissement, c'est la température intérieure qui sera exploitée, et analysée par fréquence de temps dans les différentes classes de confort, conformément aux travaux réalisés sur le confort adaptatif.

Modélisation du confort extérieur

Plusieurs modèles de confort thermique ont été mis en œuvre. Pour commencer, ils exigent le calcul de la température radiante moyenne (TRM) de la scène, qui a été réalisée par Vinet (Vinet, 2000) en définissant le « bonhomme confort » (Figure 13). On peut alors calculer divers indices de confort : PMV* (Robitu, 2005b), PET (Athamena, 2012) et UTCI. Pour le projet, nous avons choisi d'utiliser l'UTCI.

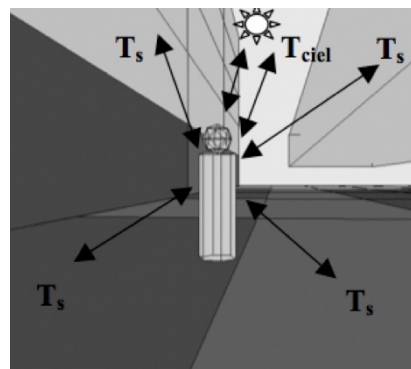


Figure 13 : Le "Bonhomme confort" dans une scène maillée (Vinet, 2000) (T_s : température de surface, T_{ciel} : température du ciel)

Modélisation des mesures d'adaptation

La représentation de différents types d'aménagement a été intégrée dans SOLENE-microclimat afin d'en évaluer l'impact sur la demande d'énergie ou de confort thermique dans les bâtiments : les bassins d'eau, la végétation (arbres, pelouses, toitures vertes, façades végétales). D'autres techniques, telles que les « cool paints »², n'ont pas nécessité de travail de développement supplémentaire et l'humidification des chaussées fait l'objet de nouveaux développements réalisés dans le cadre de ce projet.

La végétation

Plusieurs dispositifs végétaux ont été modélisés. Vinet a d'abord représenté l'impact radiatif des arbres, en les considérant que les feuillages restaient à la même température que l'air (Vinet, 2000). Il prend ainsi en compte leur ombrage et l'absorption de rayonnement solaire, ainsi que leur rayonnement de grandes longueurs d'ondes et leur résistance aérodynamique, mais ne fait pas de bilan d'énergie sur les arbres. Cette hypothèse est assez fréquente, la température d'un grand nombre d'espèces d'arbres restant très proche de la température d'air. Cependant, cette hypothèse n'étant pas justifiée pour toutes les espèces d'arbres (Kjelgren and Montague, 1998; Leuzinger et al., 2010), Robitu a complété le modèle en ajoutant un calcul de la température de feuillage et les échanges de masse et de chaleur latente (Robitu et al., 2006a). Ce calcul permet de rendre les arbres « sensibles » à leur environnement, même s'il reste qu'il est difficile à paramétrer pour tenir en compte des variétés, faute de données. Bouyer (Bouyer, 2009) a ensuite ajouté un modèle pour représenter les sols enherbés et Malys a introduit des modèles de toits et murs végétalisés (Malys, 2012) (Figure 14).

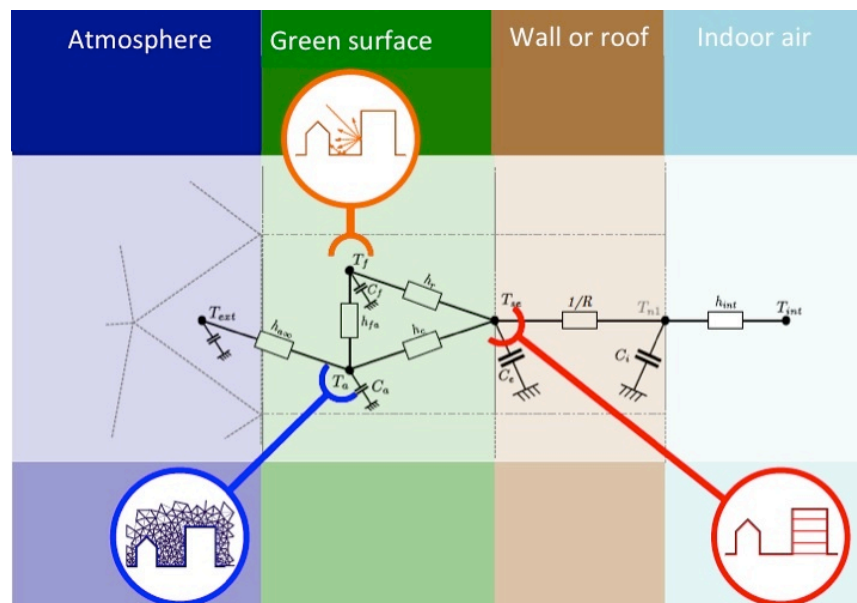


Figure 14 Modèle nodal utilisé pour représenter le comportement thermique de murs et toits végétalisés (de (Malys, 2012), avec T_{ext}/T_{int} : température d'air externe/interne air à la paroi $h_{a\infty}/h_{int}$ coefficient de convection externe/interne, T_f : température du feuillage, T_a : température de l'air dans la canopée, T_{se}/T_{si} : température de la surface externe/interne de la paroi, $C_a/C_f/C_e/C_i$: capacités thermiques de l'air/ du feuillage/de la couche externe de la paroi/ de la couche externe de la paroi, R : résistance de la paroi, $h_{fe}/h_f/h_c$: coefficient de transfert entre le feuillage et l'air / le feuillage et la paroi/l'air et la paroi)

² Peintures à fort albédo (Doya et al., 2012).

Les effets des arbres doivent être représentés à la fois dans le modèle thermo-radiatif (sous forme d'une surface) et dans modèle CFD (sous forme d'un volume poreux), tandis que les autres éléments de végétation (sol, toitures, façades) sont des surfaces et leur comportement est représenté dans SOLENE seulement et leurs effets transmis au code CFD La Figure 15 donne le schéma de principe du modèle d'arbre entre SOLENE et le code CFD.

Selon ces principes, pour ce couplage particulier, les données complémentaires transférées de la CFD à SOLENE se composent de la masse d'humidité nécessaire pour calculer le flux de chaleur latente libéré par les sols urbains naturels et la végétation. Ce flux est utilisé non seulement dans le bilan énergétique de surface, mais aussi pour évaluer la charge latente de ventilation dans la simulation énergétique. De SOLENE au code CFD, les flux latents provenant des sols naturels sont utilisés pour calculer l'humidité libérée dans l'air.

Malys a réalisé une première comparaison entre les résultats obtenus pour le sol nu et les mesures réalisées dans le cadre du projet VegDUD (Malys, 2012), puis une seconde comparaison entre les murs végétalisés et les données expérimentales enregistrées par l'HEPIA ([http://hepia.hesge.ch / fileadmin / media / paroisvegetaliseesbatir.pdf](http://hepia.hesge.ch/fileadmin/media/paroisvegetaliseesbatir.pdf)). Ces deux comparaisons ont montré un bon accord entre mesures et simulations/

Les modèles utilisés pour les arbres et les toits végétalisés n'ont pas encore été validés, mais on obtient bien des températures pour des volumes d'arbres proches des valeurs de température de l'air, comme relevé dans la littérature.

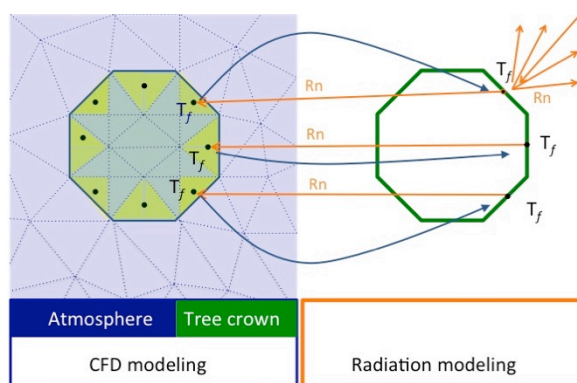


Figure 15 : Modèle utilisé pour représenter le comportement thermique d'arbres (adapté de (Robitu, 2005b), avec T_f : température de feuillage, R_n : flux radiatif net)

Surfaces d'eau

Pour évaluer l'impact des bassins d'eau sur le confort, un modèle thermique de bassin a été développé par Robitu (Robitu et al., 2006a). Il prend en compte le rayonnement absorbé, transmis et réfléchi à la surface de l'eau. La fraction de rayonnement absorbée augmente la température de l'eau, et une fraction de l'énergie transmise atteint le fond du bassin.

Les facteurs susceptibles d'influencer l'atténuation du rayonnement solaire dans les bassins d'eau, dont la distribution spectrale des propriétés de l'eau, l'angle d'incidence, l'épaisseur de la couche d'eau et la réflectivité du fond de l'étang, sont pris en compte en utilisant le modèle de Cengel et Özişik (Cengel and Özişik, 1984). Etant donné que le coefficient d'absorption est très dépendant de la longueur d'onde, le spectre solaire a été divisé en 20 bandes de sorte que les coefficients d'extinction correspondant à ces bandes correspondent à celles de Cengel et Özişik (Cengel and Özişik, 1984).

Une fois le rayonnement solaire pour chaque bande connu, la partie qui atteint le fond du bassin et celle absorbée à diverses profondeurs du bassin sont obtenues. La conduction et le stockage dans l'eau sont résolus en utilisant des différences finies (Figure 16).

Pour les surfaces de végétation, le modèle est entièrement développé dans SOLENE. Le flux de chaleur latente et la masse d'humidité transférés dans l'atmosphère sont transmis dans le calcul CFD.

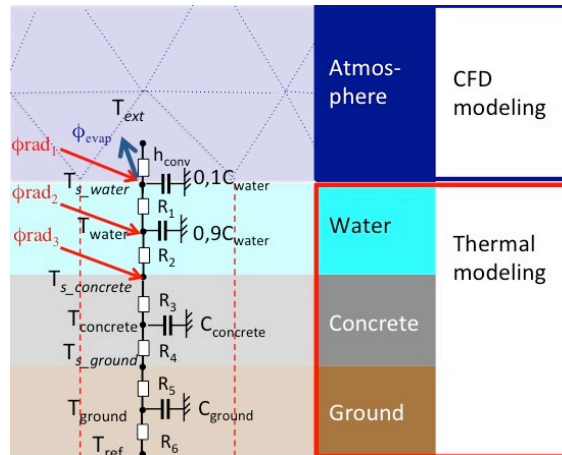


Figure 16 : Modèle de bassin d'eau illustré avec un nœud d'eau intermédiaire (adapté de (Robitu et al., 2006b)), avec T_{ext} : température de l'air extérieur, T_{ref} : température de référence dans le sol, h_{conv} : coefficient d'échange convectif extérieur, T : température de la couche, T_s : température de surface, C : capacité thermique de la couche d'eau/de béton/de sol, R : résistance de la couche, rad : flux radiatif, $fevap$: flux de chaleur latente) Conclusion

Le modèle Solène-microclimat a été adapté au contexte actuel de la modélisation du microclimat et de la simulation thermique des bâtiments. Une partie de l'effort de validation a été effectuée et le reste est devenu notre priorité. Plusieurs applications ont permis de démontrer que le modèle peut maintenant être appliqué à l'évaluation de mesures d'adaptation climatique appliquées à des quartiers réels, comme prévu dans le projet EVA. Il reste cependant que les modèles évaporatifs déjà utilisés (modèle de sol, de façade et de toiture) n'ont pas été étudiés dans le détail et validés. Ce sera également une tâche particulière du projet EVA.

EnviBatE

EnviBatE est un modèle créé pour calculer les besoins énergétiques des bâtiments à l'échelle d'un quartier en prenant en compte l'interaction entre les bâtiments et leurs environnement (Gros, 2013).

L'objectif est de décrire d'une part les ambiances intérieures du bâtiment, telles qu'elles sont modélisées dans les codes de thermique dynamique du bâtiment, et d'autre part, l'environnement extérieur tel qu'il est modélisé dans les codes de micrométéorologie, comme solene-microclimat. Pour travailler à cette échelle, la description détaillée de tous les transferts thermiques à l'intérieur et à l'extérieur de chaque bâtiment n'est pas appropriée. Ainsi, un modèle réduit de bâtiment est couplé avec un modèle simplifié de microclimat urbain. Le quartier est décomposé en deux domaines distincts : la canopée urbaine et les bâtiments. Chacun de ces deux éléments est discrétisé sous la forme d'un assemblage de mailles triangulaires et quadrangulaires. La canopée est alors décomposée en un assemblage de zones thermiques extérieures et les bâtiments en zones thermiques intérieures. A l'interface de ces deux domaines se trouvent les surfaces urbaines formées par les parois des bâtiments et les sols de l'environnement extérieur (Figure 17).

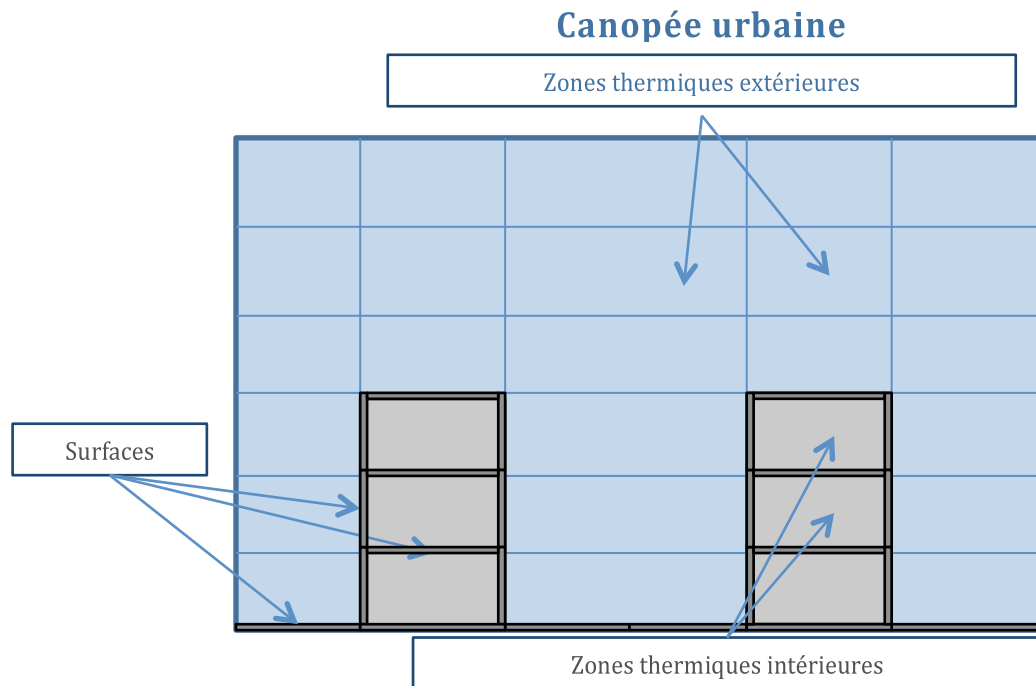


Figure 17 : Représentation des différents domaines de modélisation dans EnviBatE

Modèle microclimatique

L'objectif de ce modèle est de décrire les champs de températures autour des bâtiments pour que ces données puissent servir comme donnée d'entrée dans la modélisation des besoins énergétiques des bâtiments. Ce modèle basé sur une approche de type zonale (Bozonnet et al., 2005; de la Flor and Domínguez, 2004) permet de calculer la température d'air extérieur dans chacune des zones thermiques extérieures en réalisant un bilan thermique dans chaque sous volume et en calculant les débits traversant chacune des faces. Le calcul de ces débits est réalisé en utilisant un modèle aérodynamique plus fin.

Le logiciel QUIC (Pardyjak and Brown, 2003), a été développé pour calculer les champs de vitesse en milieu urbain. Ce modèle est basé sur les lois empiriques déterminants l'écoulements d'air autour d'un bâtiment ou dans une rue canyon en fonction de la direction et de l'intensité du vent (Rockle, 1990). Un algorithme développé par Sherman (Sherman, 1978) est ensuite utilisé pour obtenir un champ de vitesse respectant l'équation de continuité (Kaplan et Dinar, 1996; Kastner-Klein et al., 2004). Chaque maille est caractérisée par un coefficient d'atténuation ce qui permet de calculer les vitesses d'air à travers différents types de végétation et donc de prendre en compte leur impact dans la modélisation des champs de vitesse (Nelson et al., 2009). La comparaison avec des modèles CFD et de mesures expérimentales de maquette en soufflerie ont permis de valider les résultats obtenus à l'aide du logiciel QUIC (Booth, 2012; Bowker, 2004)

Le maillage utilisé dans le logiciel QUIC est choisi plus fin que celui utilisé pour définir les zones thermiques extérieures. Chaque maille quadrangulaire ou triangulaire est alors décomposée en un ensemble de mailles cubiques (Figure 18). Ainsi les différents champs de vitesses sont agrégés pour déterminer les débits traversant chaque face des zones thermiques extérieures.

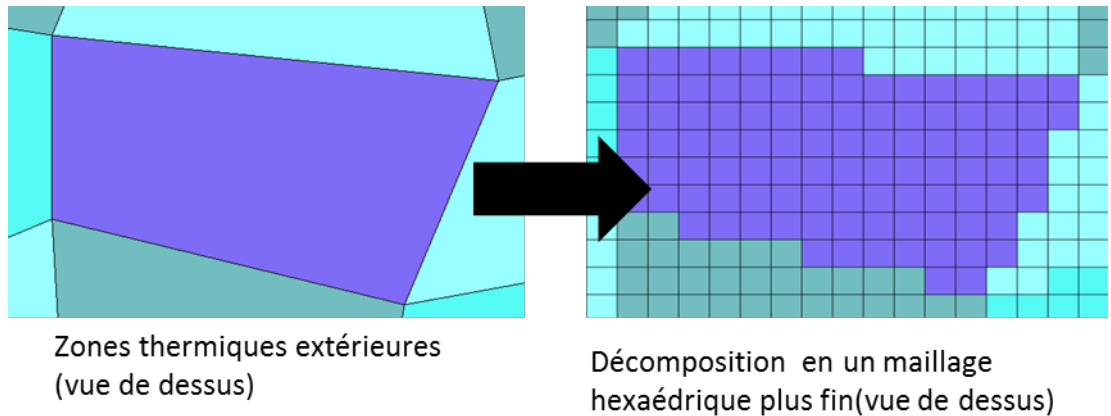


Figure 18 : Affinage du maillage des zones thermiques externes

Le modèle thermique de bâtiments

Le modélisation du comportement thermique des bâtiments est basé sur la méthode des facteurs de pondération (Depecker et al., 2001; Rousseau, 1978). Initialement cette méthode était utilisée pour calculer les besoins énergétiques d'un bâtiment à partir de la température d'air extérieur. Elle a été adaptée pour pouvoir calculer les besoins énergétiques des bâtiments ainsi que les températures de surface des parois le composant, et permettre ainsi le couplage avec la modélisation de l'environnement urbain (Gros, 2013). Un bâtiment est décomposé en plusieurs niveaux correspondant chacun à une zone thermique intérieure. Pour chaque zone thermique intérieure, la méthode permet soit de calculer des températures d'air intérieure, soit les puissances de chauffage ou de climatisation nécessaires pour maintenir une température de consigne. Les températures d'air extérieur des zones thermiques extérieur en contact servent de donnée d'entrée et réciproquement, les rejets de chaleur anthropique produits par l'utilisation du bâtiment (ventilation, climatisation) servent comme source de chaleurs pour calculer les températures d'air extérieur.

Bilan thermique de surface

Pour chaque surface urbaine, un bilan thermique de surface est utilisé pour calculer les températures de surfaces. Les flux solaire incident sont évalués à partir de l'outil de simulation *SOLENE*. Le flux transmis par conduction est calculé par la méthode des facteurs de réponse tandis que les flux échangé par grandes longueurs d'onde sont évalué à partir d'un modèle linéarisé. Les températures d'air de la zone thermique extérieur en contact avec la surface permettent de calculer le flux échangé par convection.

Modélisation des mesures d'adaptation

EnviBatE permet la représentation de différents types d'aménagement tel que les surface végétalisés et les différents types de revêtement tel que les « cool paints ». Pour modéliser les surfaces végétalisées, il est admis que le processus d'évapotranspiration des feuilles tend à maintenir la température de feuillage égal à celle de l'air environnant. Ainsi les surfaces végétalisés sont représentées comme des surfaces dont la température de surface est égale à celle de l'air en contact. L'impact des arbres sur le microclimat est pris en compte en considérant les effets d'ombrages et les réductions de vitesse induites.

Conclusion

Le modèle EnviBatE a été utilisé pour étudier les besoins énergétiques des bâtiments et le microclimat d'un quartier de 14 hectares à Nantes. La pertinence de l'utilisation des surfaces végétalisés et des revêtements de type « cool paint » pour s'adapter au réchauffement climatique

a pu ainsi être étudié (Gros, 2013).

Il reste cependant qu'il est nécessaire d'intégrer, comme pour SOLENE-microclimat, des modèles d'humidification pour pouvoir prendre en compte dans ce modèle d'autre mesure d'adaptation. Ce qui sera également une tâche particulière du projet EVA.

ARPS-VUC

Principe général du modèle

Le modèle ARPS-VUC est un modèle de couche limite atmosphérique dont la structure initiale est celle du modèle ARPS (Advanced Regional Prediction System) développé au CAPS (Center for Analysis and Prediction of Storms) de l'Université d'Oklahoma ((Xue et al., 2001, 2000)). Depuis une dizaine d'années, ce modèle est développé dans nos équipes (LHEEA/IRSTV) en vue de représenter les interactions entre les surfaces urbaines et la basse atmosphère et d'être en mesure de simuler la réponse, en terme de microclimat urbain, à différents aménagements et différentes morphologies de quartiers. Contrairement aux modèles Solene et EnviBatE, l'échelle d'étude est celle d'un secteur de ville de plusieurs km². Les variables microclimatiques (vent, température, humidité) sont résolues à différents niveaux à l'intérieur de la canopée et au-delà, jusqu'au sommet de la couche limite atmosphérique, en complète interaction avec le modèle de canopée dont l'objectif est de représenter la contribution des différents éléments de la canopée aux flux de chaleur, d'humidité et de quantité de mouvement (Figure 19). Ainsi, la particularité de notre modèle (en comparaison à des modèles atmosphériques classiques) est de pouvoir rendre compte de l'influence d'un quartier sur un autre, non seulement au-dessus de la couche de canopée mais aussi à l'intérieur de celle-ci, par tranches horizontales de l'ordre du mètre.

A notre échelle de représentation, le tissu urbain est décrit en moyenne, sur des zones de 200m x 200m, par des paramètres morphologiques tels que la densité bâtie ou la hauteur des bâtiments, par le pourcentage d'occupation du sol par les surfaces naturelles ou artificielles, par les propriétés thermo-radiatives et hydriques des divers types de surfaces (y compris l'enveloppe des bâtiments). La présence de végétation haute (arbres) intégrée dans le tissu urbain est aussi prise en compte dans le modèle (même si les données relatives aux arbres sont plus difficilement accessibles à partir des bases de données classiques), ainsi que des aménagements particuliers tels que les toitures ou des façades végétales.

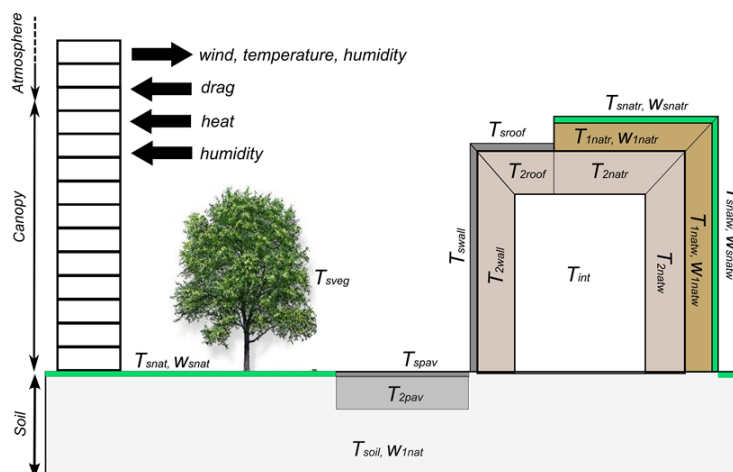


Figure 19 : Représentation schématique du modèle de canopée urbaine (Dupont et al., 2013). Les variables de température (Ts) et humidité (Ws) de surface des différents éléments sont présentées ainsi que les couches de matériaux considérées dans les bilans d'énergie. L'indice nat se rapporte aux surfaces de sol naturel, veg à la végétation haute, pav aux surfaces de sol artificiel, roof aux toitures sans végétation, wall aux façades sans végétation, natr aux surfaces végétales sur les toits, and natw aux surfaces végétales sur les façades.

Modèle dynamique

Du point de vue purement dynamique, l'influence de la canopée sur l'écoulement est modélisée au travers d'une force de traînée qui est rajoutée dans les équations de bilan de quantité de mouvement ainsi qu'un terme de dissipation, proportionnel à la traînée, dans l'équation de transport de l'énergie cinétique turbulente de sous-maille. La force de traînée est calculée à chaque instant de la simulation en fonction du champ de vent instantané \vec{u} par la relation : $F_i(z) = -0.5 C_d(\lambda, z) a_f(z) \tilde{u}_i \sqrt{\tilde{u}_j \tilde{u}_j}$.

- $a_f(z)$ est la densité frontale volumique (de dimension m^2m^{-3}) définie comme le rapport entre la somme des surfaces bâties face au vent et le volume d'air dans la maille. Un exemple de valeur de $a_f(z)$ est présenté sur la Figure 20 pour un secteur de la ville de Nantes.
- $C_d(\lambda, z)$ est le coefficient de traînée dont les valeurs sont fixées en fonction de la densité bâtie λ (Figure 20) et de la hauteur considérée à l'intérieur de la canopée.

Des profils verticaux de C_d ont été proposés sur la base d'un travail d'optimisation numérique sur le profil de vitesse moyenne à l'intérieur de canopées urbaines homogènes formées d'obstacles de hauteur H (Figure 20). Quatre densités différentes ont été choisies pour décrire les trois régimes d'écoulement définis par (Oke, 1988) - l'écoulement de rugosités isolées, l'écoulement d'interférences de sillages et l'écoulement rasant - ce qui explique les formes très différentes des

profils verticaux de C_d . L'approche a été étendue de façon à pouvoir représenter la force de traînée induite par des arrangements d'obstacles de différentes hauteurs et pour des densités bâties quelconques, en vue d'applications à des sites urbains réels inhomogènes. Le coefficient de traînée utilisé résulte alors d'une simple interpolation des profils de $C_d(z/H)$ (où H est alors la hauteur moyenne des bâtiments) obtenus pour les quatre densités initiales, et en conservant les valeurs correspondant à $l = 44\%$ pour toutes les densités supérieures. Au-dessus de $z = H$ et jusqu'à la hauteur maximale des bâtiments, le coefficient est supposé constant

et égal à sa valeur en $z = H$: c'est alors la densité frontale $a_f(z)$ qui permet d'introduire dans le modèle l'inhomogénéité verticale du tissu urbain.

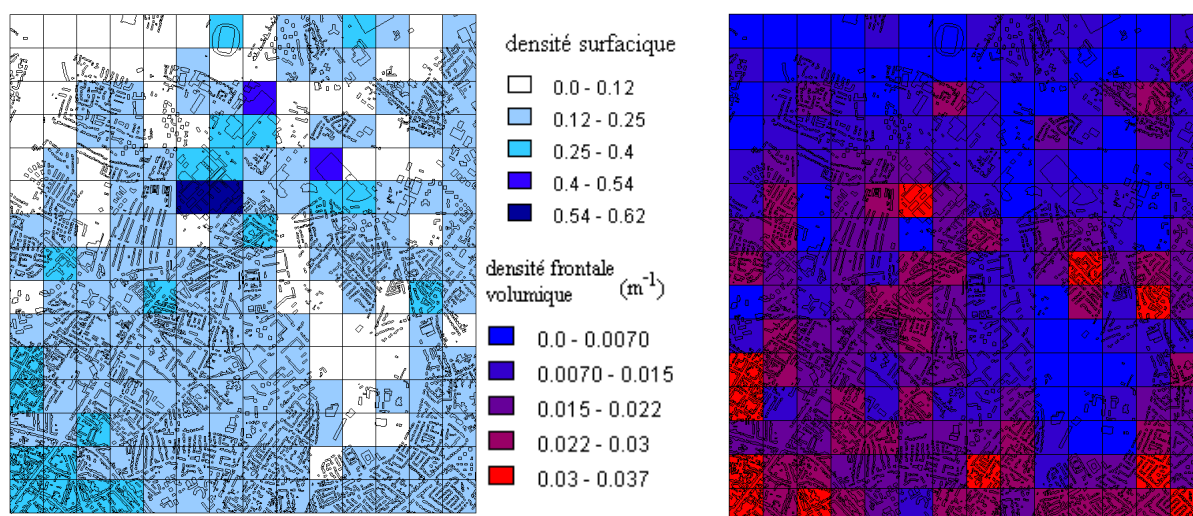


Figure 20 : Densité surfacique λ et densité frontale volumique près du sol calculée, par vent d'ouest, à partir des données de la BDTopo@ sur un secteur de la ville de Nantes (2800m x 3400m) découpé en zones de 200m x 200m.

La végétation haute intégrée au tissu urbain est elle aussi représentée, du point de vue de son influence sur le vent, au travers d'une seconde force de traînée de même forme que la précédente mais dans laquelle C_d est une constante fixée à la valeur 0,2 tandis que $a_f(z)$ est donnée en fonction du profil de densité foliaire (Leaf Index Area) (Dupont and Brunet, 2008).

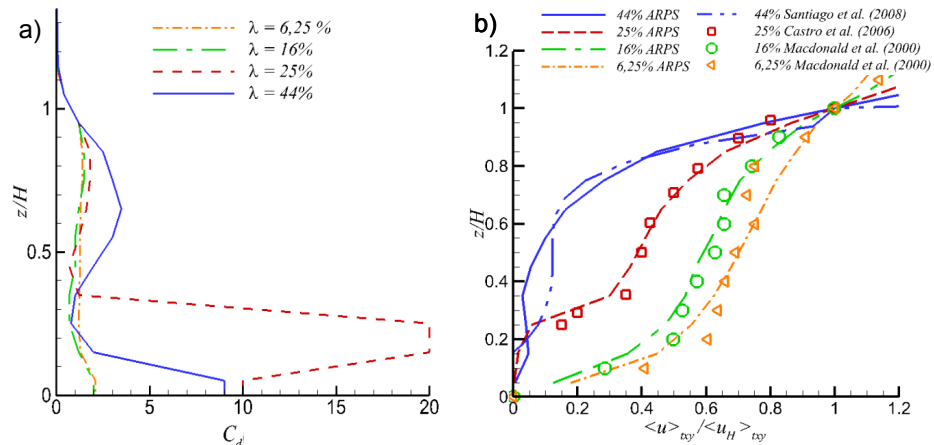


Figure 21 : Adaptation de l'approche de type « traînée » aux canopées urbaines : a) Coefficient de traînée pour une canopée homogène constituée de cubes pour quatre densités bâties représentatives des régimes d'écoulement décrits par Oke (1988). b) Profils de vitesse moyenne simulés à l'intérieur de la canopée avec le modèle ARPS pour des arrangements homogènes de cubes de hauteur $H = 10$ m. Sont aussi reportés sur cette figure les résultats de mesures en soufflerie (pour les densités $\lambda = 6,5\%$, 16% et 25%) et de simulation avec un modèle RANS pour $\lambda=44\%$.

Application du modèle en site réel

Notre modèle a été appliqué, dans un cas d'atmosphère neutre, au secteur nord-est de la ville de Nantes (Figure 20). En site urbain réel et particulièrement dans les quartiers périurbains, les différentes zones que l'on peut considérer comme statistiquement homogènes du point de vue morphologique sont peu étendues. Une analyse de la base de données urbaines BDTopo® de la ville de Nantes montre qu'une définition des paramètres morphologiques moyens (densité bâtie, densité frontale ou hauteur moyenne des bâtiments) sur des zones de $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ est cohérente, en termes de représentativité statistique, avec notre approche de modélisation et permet en même temps de mettre en relief les inhomogénéités du tissu urbain (Figure 23).

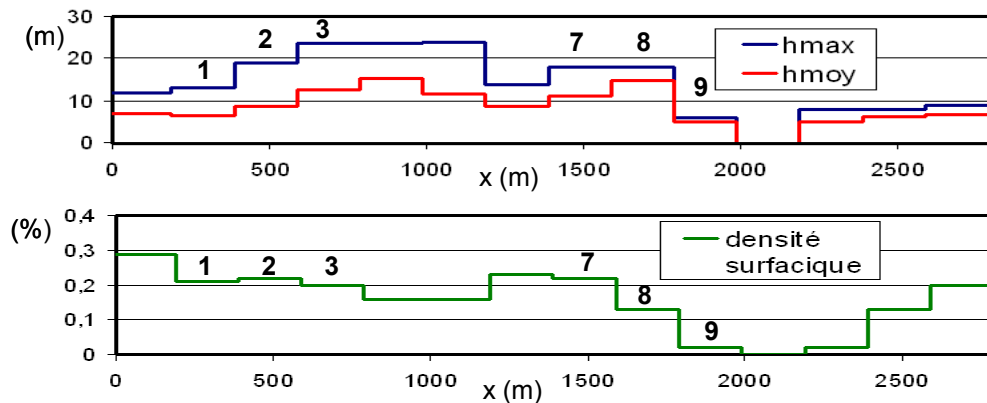


Figure 22 : Variation des paramètres morphologiques globaux sur des mailles de $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ dans une section ouest-est (parallèle au vent d'ouest incident) du domaine de simulation sur Nantes, d'après (Maché, 2012).

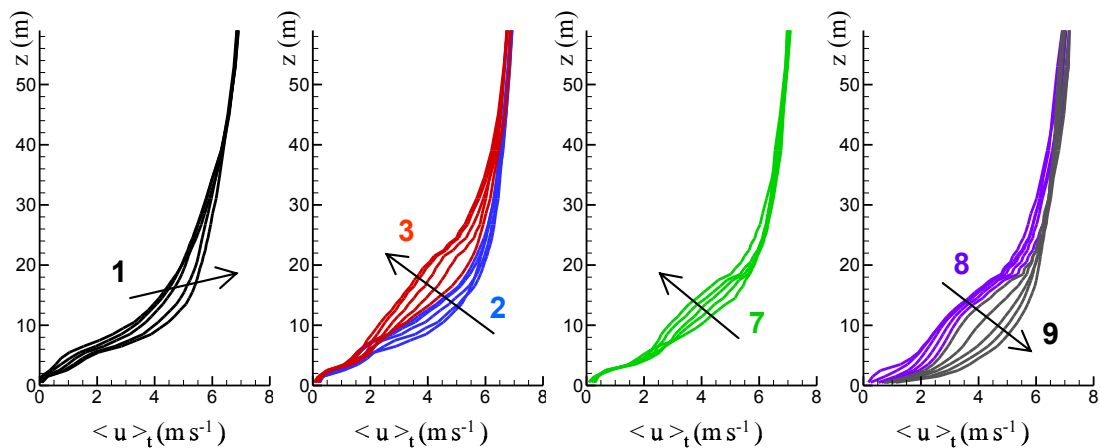


Figure 23 : Evolution longitudinale de la vitesse moyenne pour 6 zones homogènes du secteur nord-est de la ville de Nantes identifiées sur la Figure 22 . Les simulations sont réalisées sur un domaine d'extension horizontale de 2800 m x 3000 m discrétisé en mailles de 20 m x 20 m. La résolution verticale est de 1m jusqu'à $z = 25$ m et le maillage est étiré au-delà. Chaque couleur de trait correspond à une même zone et les flèches indiquent l'ordre des profils dans la direction du vent. Seul un profil sur deux est représenté pour chaque zone.

La prise en compte des inhomogénéités à des échelles de quelques centaines de mètres se traduit par un écoulement qui, dans chaque zone, dépend fortement de la morphologie des zones situées en amont (Figure 23) et qui s'adapte progressivement aux nouvelles caractéristiques morphologiques du tissu urbain. Les changements de densité influencent l'écoulement à l'intérieur de la couche de canopée alors que les variations de hauteur induisent surtout des modifications du champ de vitesse moyenne au-dessus de la canopée. En termes de gradient longitudinal et d'épaisseur de couche influencée, ces modifications dépendent à la fois du sens de variation de la hauteur moyenne des bâtiments mais aussi de la densité frontale dans les couches situées entre la hauteur moyenne et la hauteur maximale. Sur ce cas complexe où les transitions se succèdent sur de courtes distances, il est difficile de quantifier le rôle de chacun des paramètres. Cependant, on peut remarquer que l'écoulement est perturbé de façon significative jusqu'à une altitude d'au moins 25 m qui correspond à 2,5 fois la hauteur moyenne des bâtiments présents sur le domaine. On note aussi que la forme de ces profils de vitesse moyenne, aussi bien à l'intérieur de la couche de canopée qu'au-dessus, ne peut être déterminée à l'aide de modèles théoriques simplifiés. Ces résultats démontrent l'intérêt de disposer d'un modèle capable de simuler les interactions dynamiques entre quartiers de morphologies différentes.

Modèle thermo-radiatif et hydrique

La canopée est décrite (Figure 19) par la fraction au sol de surfaces naturelles et de surfaces artificielles (le reste étant considéré comme des surfaces occupées par les bâtiments). Sur l'épaisseur de la canopée, on considère les éléments végétaux (tels que des arbres) décrits par des distributions verticales de densité frontale et horizontale, et les bâtiments dont l'enveloppe est décrite par la distribution des densités frontale (murs) et horizontale (toits). Les murs et les toits peuvent être partiellement recouverts de végétation. Les surfaces naturelles et les surfaces végétales sur les murs et les toits sont représentées par une couche de surface à partir de laquelle l'évaporation se produit et une zone racinaire qui contient l'eau disponible pour la transpiration de la végétation.

Le modèle thermo-radiatif et hydrique est appliqué à chaque niveau à l'intérieur de la canopée de façon à déterminer les flux de chaleur et d'humidité provenant des éléments de la canopée, et qui apparaissent sous la forme de termes sources (volumiques) dans les équations de bilan pour de température potentielle et pour l'humidité spécifique. Ces termes sources correspondent à la somme des flux de chaleur et d'humidité calculés pour chaque type de surface

présente dans la maille de calcul, pondérés par la densité de surface correspondante. Ces flux de chaleur sensible et de chaleur latente (ou de vapeur d'eau) entre les éléments de la canopée et l'air dépendent de la vitesse du vent dans la maille de calcul. Le flux de chaleur sensible est aussi fonction de la différence de température entre l'air et les surfaces, alors que le flux de vapeur d'eau est proportionnel à la différence d'humidité entre l'air et les surfaces de sols naturels et de végétation.

L'humidité des surfaces naturelles est déterminée par un bilan hydrique qui traduit des échanges d'eau au travers des différentes couches de sol et avec l'atmosphère. Ce bilan prend en compte l'évaporation en surface et la transpiration par la végétation au sol et en hauteur. Le même modèle est utilisé pour les enveloppes végétales en considérant une couche de substrat (Figure 19)

L'évolution des températures de surface au cours du cycle diurne résulte quant à elle du bilan d'énergie exprimé par la relation $G_r = R_n - H_s - LE$ où R_n est le rayonnement net, H_s est le flux de chaleur sensible, LE est le flux de chaleur latente et G_s est le flux de chaleur stockée dans les matériaux ou le sol. Les surfaces artificielles (toits, murs et routes ou parkings) étant décrites par 3 ou 2 couches de matériaux, selon que l'on considère ou non un revêtement végétal (Figure 19), la conduction de chaleur dans l'épaisseur des murs ou des toits est aussi prise en compte dans le calcul de la température de surface. Cette méthode permet de modéliser la réponse rapide de la couche superficielle aux variations du forçage atmosphérique et les processus plus lents de stockage et de restitution de chaleur par les matériaux artificiels. Pour les surfaces de sol naturel, c'est un modèle de type Force-Restore (Noilhan & Planton, 1989) qui est utilisé pour permettre le retour à l'équilibre de la température de surface vers celle du sol profond.

Le rayonnement net R_n qui intervient dans le bilan d'énergie est le résultat du bilan radiatif dans les courtes et grandes longueurs d'ondes. Il est modélisé pour chaque type de surface (i) par la relation $R_{ni}(z) = (1 - \alpha_i)R_G(z) + \varepsilon_i R_A - \varepsilon_i \sigma T_{si}^4(z)$ où α_i et ε_i désignent respectivement l'albédo et l'émissivité des surfaces, R_G est le rayonnement solaire global et R_A le rayonnement atmosphérique. Le rayonnement solaire qui atteint la surface dépend de l'angle entre la direction du soleil et la surface. Cet angle est connu pour les surfaces horizontales telles que les toits ou le sol. En revanche, certaines hypothèses ont dû être faites pour modéliser R_G sur les surfaces verticales puisque, dans notre approche, l'orientation des bâtiments n'est pas connue. La valeur de R_G est donc calculée à partir de l'angle solaire horaire pour une façade orientée perpendiculairement à l'azimut (ce qui donne le rayonnement incident maximal) et nous considérons en première approximation que le rayonnement moyen sur l'ensemble de surfaces verticales est égal à la moitié de la valeur maximale calculée. Enfin, une fonction d'atténuation a été introduite pour prendre en compte les effets d'ombrage à l'intérieur des canopées denses. Dans notre modèle actuel, inspiré de Brown (2000), le rayonnement solaire est simplement supposé décroître de façon exponentielle au fur et à mesure que l'on se rapproche du sol, cette décroissance dépendant de la densité cumulée à partir du haut de la canopée de végétation haute et de bâtiments.

Application du modèle en configuration académique

Les premiers développements et tests du modèle thermo-radiatif et hydrique (cf. Rapports T+12 et T+18) montraient une très forte diminution de la température d'air dans la canopée urbaine en présence d'arbres et des écarts de température trop importants entre le haut et le bas de la canopée urbaine. La paramétrisation de l'atténuation du rayonnement par les arbres et les bâtiments a donc été reprise pour améliorer le comportement du modèle. Les résultats de ce travail, qui a pris plus de temps que prévu, sont présentés dans Tavares et al. (2015) dont certains sont repris ici.

Le modèle a été testé selon différents scénarios d'occupation du sol sur un cycle diurne sans nuages du 1^{er} juin 2012. Ces scénarios ont été simulés afin de mettre en évidence l'influence sur la température de l'air de la végétation haute au sein de la canopée urbaine et de la

végétation sur les bâtiments. Tous les scénarios sont réalisés avec une canopée urbaine de 20 m de haut, une densité bâtie de 25%, une densité de sols artificiels de 65% et une densité de sols naturels perméables de 10%. Le sol naturel est recouvert à 75% de végétation rase dans tous les scénarios excepté U1 et U3. Dans les scénarios U3, U4 et U8, une canopée végétale est présente et constituée d'arbres de 18m de hauteur dont la densité de feuilles est représentée par une distribution verticale de densité donnée par Dupont & Brunet (2008) pour un LAI=2. Le maximum de densité foliaire est situé à 10m et la surface projetée au sol correspond à une occupation de 14% de la surface totale. Pour toutes les simulations, la canopée bâtie est décrite dans le modèle par sa densité frontale volumique de $0.0167 \text{ m}^2.\text{m}^{-3}$ (à chaque niveau) et par un coefficient de traînée dont le profil vertical est donné sur la Figure 21. La végétation sur l'enveloppe des bâtiments est prise en compte dans les scénarios U5 à U8, sous forme de végétation basse couvrant 50% des toits dans les scénarios U5, U7 et U8 et de murs végétaux sur 50% des façades dans U6, U7 et U8.

La taille du domaine de calcul est de 960 x 960 x 2000 m discrétisé en 51 x 51 x 59 mailles de 20m dans les directions horizontales, et de 2m entre le sol et 23m, un étirement de maillage étant appliqué au-dessus pour atteindre un Dz moyen de 21m. Les conditions initiales correspondent à une stratification neutre et à un vent de 7m/s à 200m au-dessus de la canopée.

Pour mettre en évidence l'impact des différents types de végétation en ville, nous avons analysé différentes variables microclimatiques telles que la température de l'air et les flux d'énergie associés aux différentes surfaces. Les quantités analysées résultent de moyennes horizontales des champs instantanés simulés en LES, à chaque niveau dans la canopée.

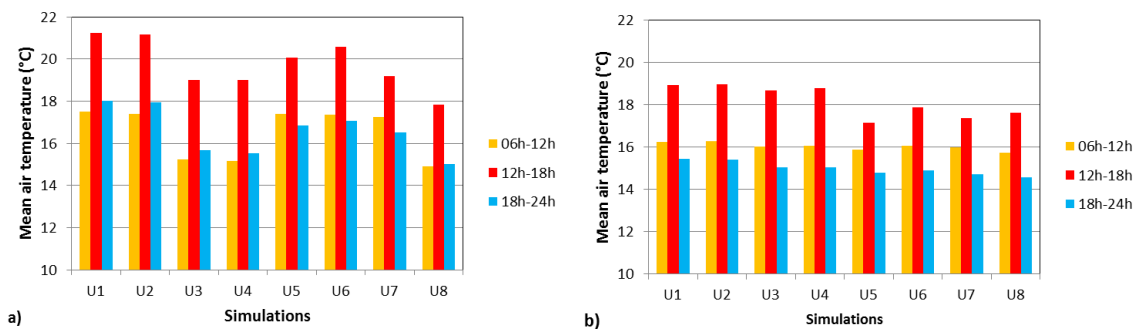


Figure 24 : Température de l'air moyennée sur des périodes de 6h (a) à l'intérieur de la canopée à 2 m au-dessus du sol et (b) au niveau des toits (20 m).

La Figure 24 illustre l'influence générale de la végétation, telle qu'elle est prise en compte dans notre modèle, sur la température de l'air au niveau des piétons et en haut de la canopée par périodes de 6h à partir du lever du soleil. Au niveau des piétons (Figure 24 a), nos simulations montrent que l'air est toujours le plus chaud dans les simulations sans végétation (U1 et U2) et que la végétation rase au sol a peu d'influence. La végétation présente sur les bâtiments contribue au rafraîchissement de l'air à partir du milieu de la journée et la nuit (U5, U6 et U7). Il est important de constater que le scénario U5, qui ne considère que des toitures végétales, conduit à un rafraîchissement de l'air dans les bas niveaux de la canopée. Cependant, la présence des arbres semble plus efficace pour réguler la température de l'air dès le lever du soleil et tout au long du cycle diurne (U3 et U4), en raison de l'ombrage sur les surfaces artificielles. La combinaison des arbres et de la végétation sur les bâtiments semble être le meilleur moyen de réguler la température de l'air en milieu urbain près du sol (U8). Au niveau des toits (Figure 24 b), les écarts de température entre les différents scénarios sont beaucoup plus faibles en raison de l'absence d'ombrage par les arbres à ce niveau. De façon générale, les scénarios incluant la végétation sur les bâtiments (U5 à U8) conduisent à une légère réduction de température de l'air à ce niveau en comparaison des autres scénarios.

Les Figure 25 et Figure 26 présentent les cycles diurnes de température de l'air aux deux niveaux (piétons et toits) pour différents scénarios. L'influence des arbres est mise en évidence

sur la Figure 25 qui compare les scénarios U2 et U4. La présence d'arbres au sein de la canopée (scénario U4) conduit à l'homogénéisation de la température de l'air sur l'épaisseur de la canopée en milieu de journée et au rafraîchissement de l'air principalement la nuit et de façon plus marquée dans le bas de la canopée.

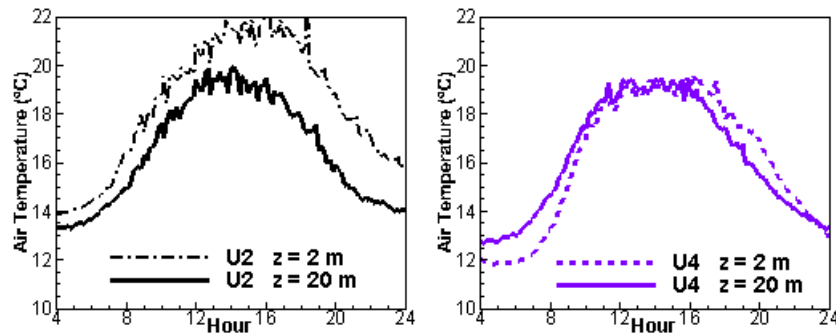


Figure 25 : Cycle diurne de température de l'air à deux niveaux pour les scénarios U2 et U4.

La Figure 27 vise à illustrer l'influence des enveloppes végétales au cours du cycle diurne. Par comparaison à la simulation de référence (U2), on voit que les toitures végétales (U5) abaissent la température de l'air d'abord au niveau des toits mais ont aussi une influence aux niveaux bas de la canopée avec un décalage de quelques heures. Ce phénomène, qui n'est généralement pas reproduit par les modèles de canopée, s'explique par la capacité de notre modèle à simuler la dynamique des transferts entre l'intérieur et le sommet de la canopée.

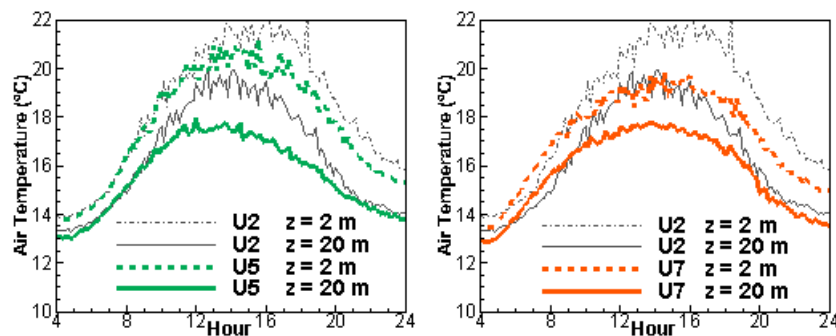


Figure 26 : Cycle diurne de température de l'air à deux niveaux pour les scénarios U5 et U7 (comparés au scénario de référence U2).

L'ajout de murs végétalisés (scénario U7) conduit à une température d'air légèrement plus élevée qu'avec des murs artificiels depuis le lever du soleil jusqu'en milieu de matinée, mais permet d'abaisser la température durant le reste de la journée et la nuit.

L'influence particulière des toits et murs végétaux est à relier au comportement thermo-radiatif des surfaces dont les propriétés ont été modifiées en introduisant une couche de végétation sur les bâtiments. La Figure 27 (a) montre les différents termes du bilan d'énergie au niveau des toits pour les scénarios U2 et U7. La simulation U7 inclut des toits et des murs végétaux mais c'est l'impact des toits qui est prépondérant à ce niveau. Pour un rayonnement net (R_n) équivalent avec ou sans végétation, on voit clairement une réduction du flux de chaleur sensible H_s et du stockage de chaleur dans les matériaux G_s , compensés par une augmentation du flux de chaleur latente LE (évapotranspiration). La diminution du flux de chaleur sensible est bien sûr à relier à la baisse de température en particulier au niveau des toits (Figure 26). La Figure 27 (b) compare le flux de chaleur sensible des surfaces de murs végétalisés ou artificiels en présence ou non d'arbres. Ces flux sont caractérisés par 2 maxima dépendant de l'angle d'incidence du rayonnement solaire. La dissymétrie du profil constatée pour les façades artificielles s'explique par une phase de stockage en début de matinée (comme on le voit aussi sur la Figure 27 (a) où le stockage est plus fort que le flux de chaleur sensible). Ce processus de stockage étant beaucoup plus faible dans le cas d'une façade végétale, le flux de chaleur sensible

est plus important en tout début de matinée, ce qui explique d'une part les températures d'air légèrement plus élevées observées précédemment et d'autre part la symétrie du profil de Hs. L'effet de l'ombrage des façades par les arbres, réduisant le rayonnement, est aussi illustré ici, au travers de la réduction de Hs pour les scénarios U4 et U8.

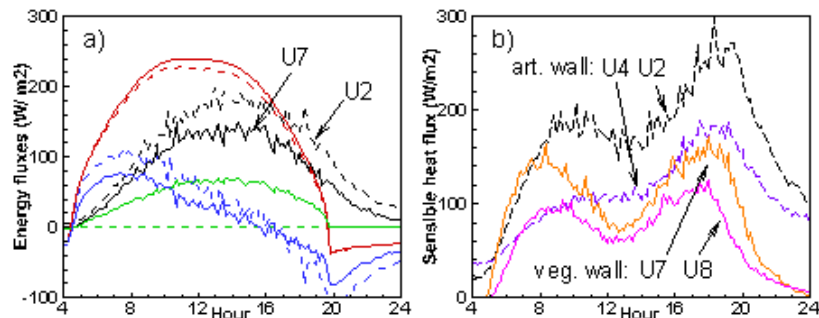


Figure 27 : Comparaison des flux d'énergie simulés: a) Rn (rouge), Hs (noir), LE (vert) et Gs (bleu) pour les scénarios U2 (pointillés) et U7 (solide) au niveau des toits; b) Hs des murs artificiels (pointillés) et végétaux (solide) à mi-hauteur de la canopée.

Les résultats présentés dans cette section démontrent à la fois la pertinence de la physique du modèle ARPS-VUC que nous avons développé dans le cadre du post-doctorat de Richard Tavares et son potentiel pour des études microclimatiques à l'échelle de la ville ou de plusieurs quartiers. L'influence de différents dispositifs végétaux allant des arbres jusqu'aux bâtiments végétalisés a pu être évaluée. Le modèle est désormais prêt aux applications en site réel qui nous permettra de caractériser les interactions entre différents quartiers, plus ou moins végétalisés. On ne peut que regretter le temps pris pour mettre au point le modèle, ce qui a eu un impact sur son application finale à la ville de Lyon.

3.3. Modèle d'humidification

Deux travaux de stage ont contribué à la mise en place du modèle d'humidification. Le premier, celui d'Ilyes Smadi a permis de montrer que le modèle de sol, dans son état actuel ne permettait pas, comme nous l'avions imaginé, de représenter correctement les cycles d'arrosage et l'ensemble des phénomènes physiques en jeu. Dans le second sage, celui de Marie Héléne Azam, nous sommes donc revenus sur la modélisation afin de l'améliorer. C'est ce travail qui est présenté ici.

Représentation d'une surface humidifiée, état de l'art

Bilan énergétique d'une surface

Les différentes composantes du bilan énergétique à la surface sont (Figure 28) :

- Le rayonnement net Rnet
- Le flux de chaleur sensible H
- Le flux de chaleur latente LE.
- Le flux de chaleur conduit dans le sol Qs

$$R_{net} = Q_s + H + LE.$$

Rayonnement net

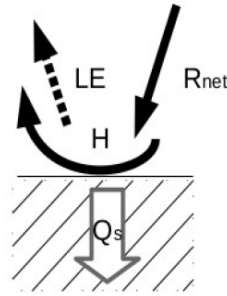


Figure 28 : Bilan de flux à la surface d'un sol

Le rayonnement net est le bilan des échanges radiatifs à la surface du sol (Figure 29). On réalise la somme des rayonnements de courte longueur d'ondes (CLO) (le rayonnement solaire K_{\uparrow} , K_{\downarrow}) et grande longueur d'ondes (GLO) (le rayonnement infrarouge L_{\uparrow} , L_{\downarrow}).

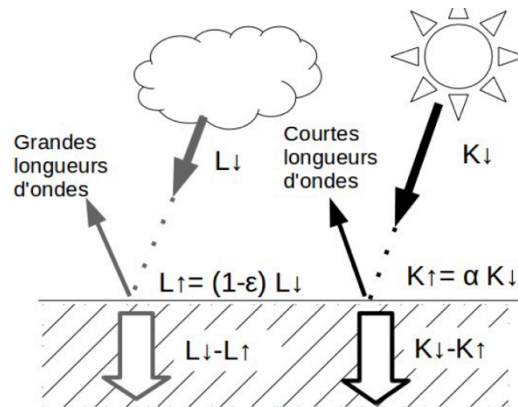


Figure 29 : Bilan de flux radiatifs à une surface

Cette partie est actuellement bien traitée dans SOLENE-microclimat et nous ne l'avons pas modifiée.

Convection

D'après la loi de Newton, le flux thermique échangé entre une surface et un fluide en mouvement s'exprime de la manière suivante :

$$H = h_c(T_{\text{fluide}} - T_{\text{surface}}) \text{ en } [W/m^2]$$

Pour les surfaces urbaines, soumises au vent, il existe un très grand nombre de lois pour la plupart empiriques qui permettent de calculer le coefficient d'échange à partir de différents paramètres. (Defraeye et al., 2011; Palyvos, 2008) listent une partie de ces lois.

La plus simple et la plus utilisée est une relation linéaire fonction de la vitesse du vent de la forme :

$$h_c = a + bV_{\text{air}}$$

En fonction des situations, (Palyvos, 2008) propose une quarantaine de combinaison pour les coefficients a et b. Dans notre cas pour une surface horizontale plate, peu rugueuse, et des vents faibles ($V_{\text{air}} < 5 \text{ m/s}$), il propose d'utiliser les coefficients suivants (Tableau 1).

Référence	A	B
(MacAdams, 1954)	5,7	3,8

(ASHRAE, 1993)	5,62	3,9
(Cristofari et al., 2006)	5,67	3,86

Tableau 1 : Valeurs des coefficients a et b pour le cas d'une surface plate peu rugueuse et un faible vitesse de vent

La deuxième formulation est une loi de puissance.

$$h_c = a + bV_{air}^n$$

Dans le cas d'une surface plate, (Palyvos, 2008) propose d'utiliser la formule de (Jurges, 1924) avec un a nul, un b égale 7.11 et un n de 0.775. Cette loi s'applique dans le cas de vents importants ($V_{air} > 5\text{m/s}$).

Enfin il existe des formules de corrélation faisant intervenir des nombres caractéristiques sans dimension (Reynolds \mathfrak{R} et Grashof Gr) à partir du calcul du Nusselt, (Taine and Petit, 1998) proposent différents coefficients en fonction du régime et de l'écoulement, pour une plaque plane horizontale.

$$Nu = e (a\mathfrak{R}^b cGr^d)$$

Celui-ci est défini comme le rapport entre le coefficient de convection, une longueur caractéristiques et la conductivité thermique du fluide :

$$Nu = h_c L_c / \lambda_{fluide}$$

Ce type de corrélation permet de définir le coefficient d'échange en fonction du régime :

- Convection libre : le mouvement du fluide est provoqué par un gradient de température
- Convection forcée : le mouvement de l'air est provoqué par le vent.
- Convection mixte : On rencontre ce cas lorsque le vent est faible. Les mouvements de l'air sont alors produits par le gradient thermique et le vent.

Cette méthode est plus adaptée, à des situations où le vent est très faible et/ou les différences de température entre la surface et l'air sont élevées et donc où la convection naturelle prime sur la convection forcée. Cependant, la question de la longueur caractéristique à utiliser pose problème dans le cas d'une simulation à multi-échelles.

Type de Convection	Régime d'écoulement	cGr^d		$a\mathfrak{R}^b$		e
		C	d	A	B	
Libre	Laminaire			0,49	1/4	
	Turbulent			0,13	1/3	
Mixte	Laminaire	1	3/2	0,57	3/4	0,68
	Turbulent	1	4/5	12,1	1/3	0,03
Forcée	Laminaire	0,56	1/2			
	Turbulent	0,03	4/5			

Tableau 2 : Coefficients en fonction du régime pour une plaque plane horizontale (Taine and Petit, 1998)

Dans notre cas, les vitesses de vent seront assez faibles et les gradients de températures entre la surface et l'air seront élevées, ce qui laisse supposer que la part de convection libre sera importante. Avec ces hypothèses, la loi de puissance peut être écartée. Nous nous intéresserons donc à la méthode de calcul par corrélation avec les coefficients donnés par (Taine and Petit, 1998) ainsi qu'à la formule linéaire proposée par (MacAdams, 1954).

Conduction en régime périodique

D'après la loi de Fourier, le flux thermique échangé à l'intérieur d'un solide en régime permanent s'exprime par :

$$\overline{Q_s} = \lambda \overline{\text{grad}T} \quad (\text{W.m}^{-2})$$

En régime transitoire, la variation de la température dans un matériau isotrope en fonction de la distance z et du temps t peut être déterminée par la résolution de l'équation fondamentale de la chaleur de Fourier pour des conditions limites définies :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{sol} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Si on résout cette équation pour les conditions limites suivantes:

- Pour $z=0, T=T_s(t)$
- Pour $z \rightarrow \infty, T \rightarrow T_m$

et avec un signal sinusoïdal en entrée qui correspond à une onde annuelle

$$T_s = T_m + A \sin(\omega(t - t_m))$$

On obtient une solution amortie et déphasée dépendant de la distance à la surface z et du temps t :

$$T(z, t) = T_m + A \exp\left(\frac{-z}{zd}\right) \sin\left(\omega(t - t_m) - \frac{z}{zd}\right)$$

Cette fonction permet d'estimer la température à une profondeur donnée en fonction du jour de l'année. Elle est utilisée pour définir une condition limite en profondeur. Z_d , la distance à partir de laquelle on considère l'onde amortie :

$$zd = \sqrt[2]{2\alpha_{sol}}$$

Flux de chaleur latente

Le flux de chaleur latente est l'énergie nécessaire à un système pour évaporer une masse d'eau, à température et pression constante. Pour évaporer une lame d'eau d'1mm d'épaisseur, il faut $2,45 \text{ MJ.m}^{-2}$ (Guyot, 1999).

En cas d'apport d'eau sur une surface imperméable, une partie de l'eau s'évapore (flux latent), une partie ruisselle vers les évacuations.

La densité du flux de chaleur latente peut s'écrire en fonction du gradient vertical de tension de vapeur d'eau et un coefficient d'échange de vapeur d'eau (Guyot, 1999) :

$$LE = L \frac{\rho_{air}}{Ra} (q_{sat}(T_{eau}) - q(T_{air}))$$

Le processus d'évaporation est conditionné par la demande évaporative de l'air. Le terme $q_{sat}(T_{eau}) - q(T_{air})$ représente le gradient d'humidité entre l'air considéré comme saturé au niveau de la surface d'eau et l'air situé à distance de la surface. L'hypothèse est faite que la température de l'air en surface est la même que celle de la surface d'eau. Il y a différentes relations pour estimer l'humidité spécifique pour l'air saturé et non saturé. Les formules de Magnus-Tetens :

$$q_{sat} = 0,622 \frac{PV_{sat}}{101325 - 0,378PV_{sat}}$$

$$q = 0,622 \frac{PV_{sat} \frac{HR}{100}}{101325 - 0,378PV_{sat} \frac{HR}{100}}$$

$$PV_{sat} = 611,2 \exp\left(\frac{17,67T}{243,5 + T}\right)$$

Il y a différentes manières d'estimer la résistance aérodynamique R_a , dont deux sont présentées ici.

La première permet de calculer cette résistance en fonction du coefficient de convection calculé précédemment (Morille, 2012).

$$Ra = \rho_{air} C_{pair} / h_c$$

La deuxième utilise la vitesse du vent et de la rugosité de la surface (Musy and Higy, 2004) (Musy, Higy 2004) :

$$Ra = \frac{\log\left(\frac{z}{zR}\right)}{\kappa^2 V_{air}}$$

Modification du modèle de sol

Etude préliminaire

Le modèle de sol initial a été testé sur la rue de la Buire pour laquelle nous avons les mesures de 2013 au moment des premiers tests.

La rue de la Buire fait 50 m de long et est équipée de buses d'arrosage. Celles-ci envoient une fine lame d'eau sur la chaussée légèrement en pente, arrosant ainsi le sol de façon théoriquement uniforme. On remarque cependant (Figure 30), que toute la surface de la rue n'est pas humide. De même, nous n'avons pas les éléments nécessaires (photos au cours du temps ou films) pour savoir si la rue reste humide entre deux périodes d'humidification.



Figure 30 : Rue humidifiée

Veolia a installé 3 types de capteurs sur la rue de la Buire (Rue arrosée) et la Rue Danielle Faynel Duclos (rue témoin, Figure 31). Chacun enregistre une information spécifique :

- au niveau du sol, les capteurs mesurent la température de la chaussée,
- à 1,50 m du sol, les capteurs mesurent la température de l'air, l'hygrométrie et la température moyenne de rayonnement,
- à 4 m du sol, les capteurs mesurent la température de l'air, l'hygrométrie, la direction et la vitesse du vent ainsi que l'ensoleillement.

Il est important de noter que le capteur qui mesure la température du sol n'est pas en surface, mais à environ 1cm en profondeur dans la chaussée.

En 2012 et 2013, différents cycles d'humidification ont été testés.

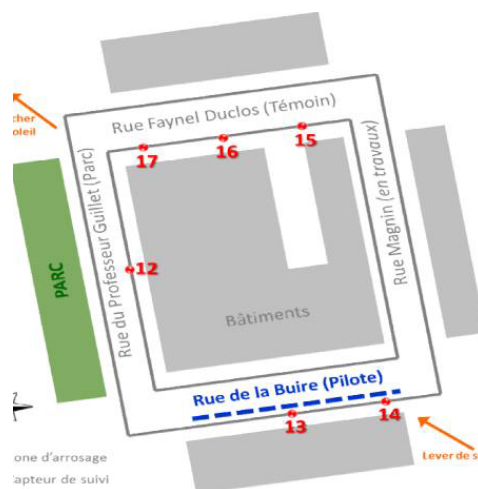
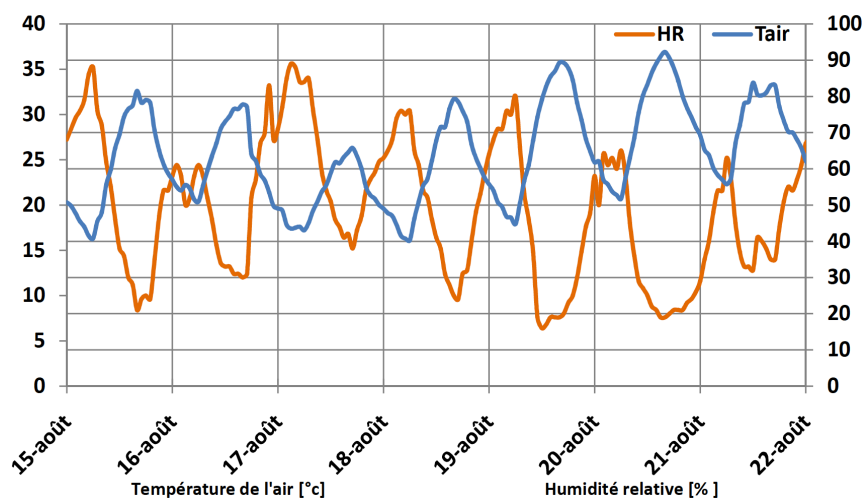


Figure 31 : Emplacement des capteurs

Paramètres de la simulation :

La période d'étude est choisie entre le 15 et le 22 août 2012. Il s'agit de la semaine la plus chaude de l'année. Les graphiques suivants présentent l'évolution du flux solaire incident, la température et l'humidité de l'air et la vitesse de l'air pendant cette semaine. Les données ont été récupérées sur le site de la station IDMP Vaulx-en-Velin (Figure 32).



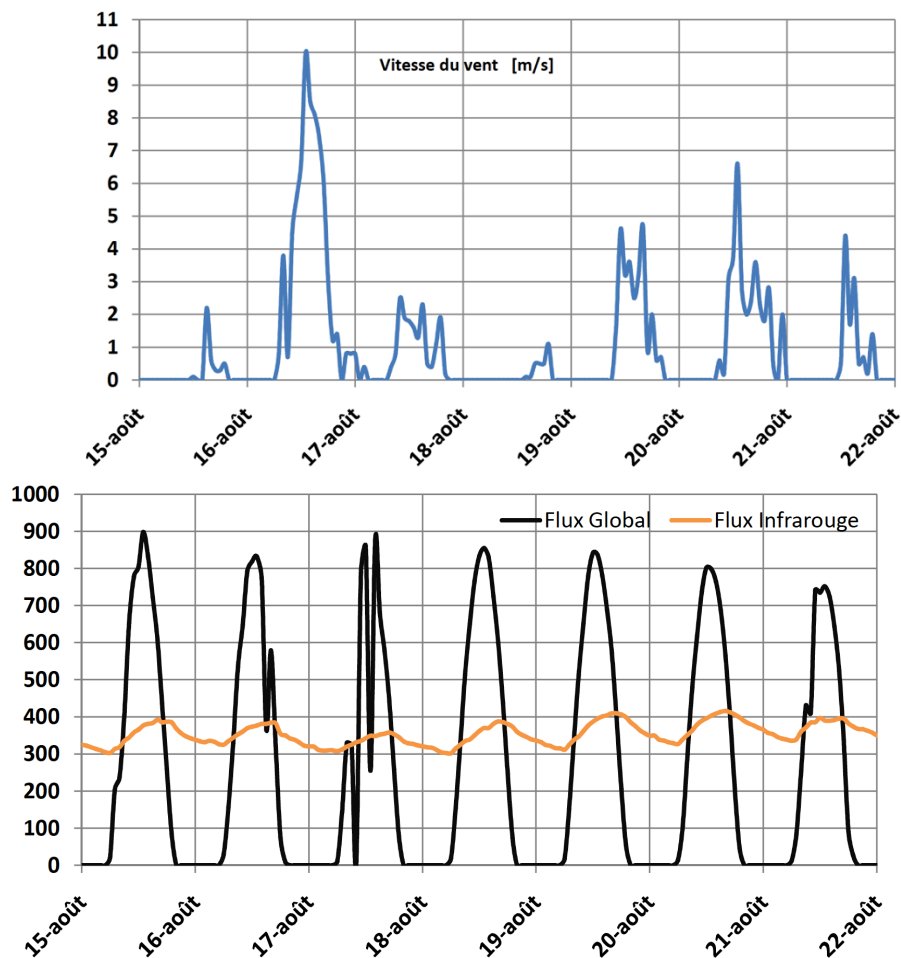


Figure 32 : Température, humidité relative, vitesse de vent et flux radiatifs à la station de Vaulx-en-Velin

Les caractéristiques des matériaux utilisées sont données dans le Tableau 3 et le Tableau 4. Ces caractéristiques ont été prises dans des tables.

Tableau 3: Caractéristiques radiatives et évaporatives des matériaux.

Configuration	Familles	Classe	Albédo	Matériau	Emissivité	F Coefficient Evaporation
Rue de la Buire.med	Trottoir	Sol	0.1	Asphalte	0,9	×
	Rue	Sol	0.1	Béton	0,9	1
	Etages	Bâtiments	0.25	Béton	0,9	×
	Toit	Bâtiments	0.25	Béton	0,9	×

Tableau 4: Caractéristiques thermiques des matériaux.

Matériaux	Conductivité W/m²/K	Capacité thermique J/K	Masse volumique kg/m³
Asphalte	0,75	950	2100
Béton	1,75	1000	2300
Terre	0,7	900	1600

En résultat, nous donnons les simulations solaires de la rue. En effet, il est important de noter que compte tenu de son orientation et de son rapport de forme, la rue n'est ensoleillée qu'une petite partie de l'après-midi.

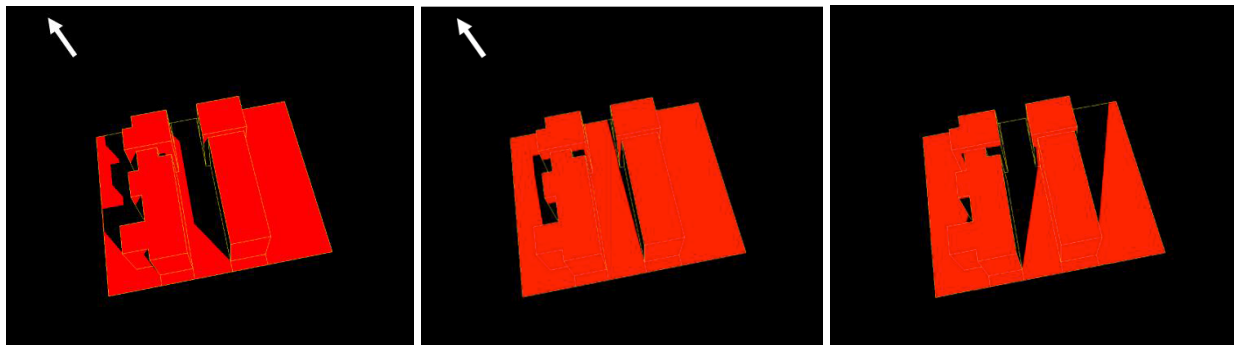


Figure 33 : Ensoleillement de la rue à 14h, 16h et 17h (de gauche à droite)

La rue n'est ensoleillée que pendant une courte période (de 15h à 17h) avec un maximum d'ensoleillement atteint à 16h (Figure 33) traduit par un pic sur la courbe de la température de surface de la chaussée et du flux latent dans notre bilan.

Nous simulons le 20/08/2012, journée pendant laquelle, les cycles d'arrosage ont été réalisés toute la journée, de 6h - 18h, toute les 60 min avec un débit de 2,9m³/h pendant 2 minutes.

La Figure 34 donne les résultats de simulation et la Figure 35 les mesures sur site.

Nous pouvons constater qu'alors qu'il n'y a pas de déphasage entre les deux courbes des calculs, on retrouve le déphasage structurel déjà relevé pour les rues.

La température maximale calculée est de 52°C alors que la température maximale mesurée est de 36°C dans la rue témoins (soit 16°C d'écart). S'agissant des températures de la surface humidifiée, elle est de 44°C contre 29°C (soit 15°C d'écart). Les atténuations sont très proches à 1°C près au moment du pic de température (moment ensoleillé), mais celle calculée est très faible en dehors de la période d'ensoleillement alors que l'écart de température relevé entre les deux rues est plus élevé.

A ce stade, la comparaison ne peut être que partielle, en effet, ce sont les températures de surface qui sont simulées et comme nous l'avons vu, les capteurs ne sont pas en surface. La température mesurée est certainement un peu inférieure à la température de surface.

Il s'agit donc maintenant de calculer une température dans le sol, ce qui a nécessité une modification du modèle.

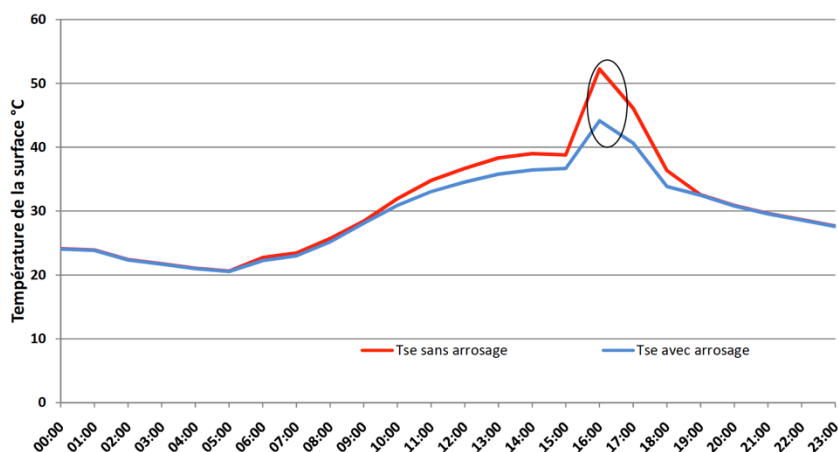


Figure 34 : Calcul de la température de chaussée avec et sans humidification pour le 20/08/2012

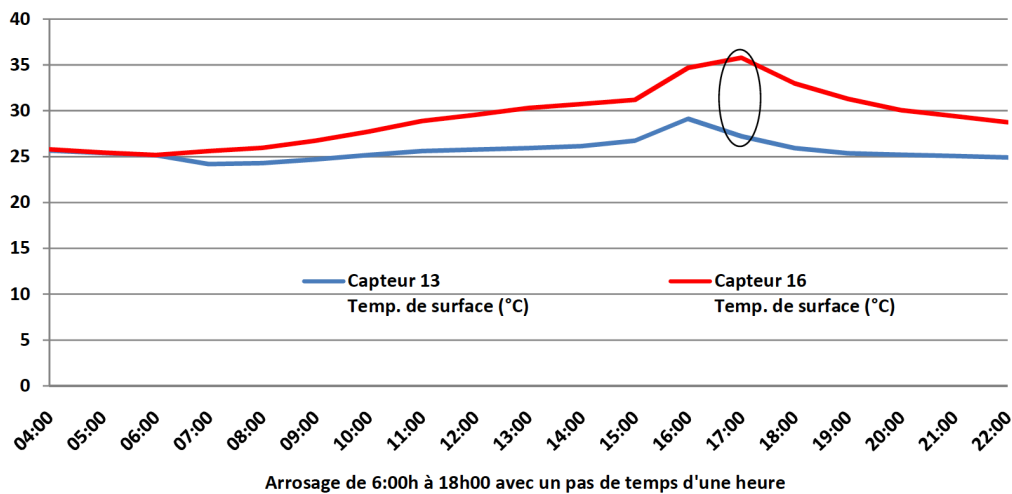


Figure 35 : Températures mesurées au niveau des capteurs 13 (portion de rue humidifiée) et 16 (rue témoins) le 20/08/2012

Le modèle donne des résultats peu satisfaisants. Plusieurs facteurs d'erreurs peuvent être relevés :

- du cas d'étude qui est complexe est modélisé d'une manière approximative (géométrie, matériaux, végétal)
- les températures comparées ne sont pas tout à fait les mêmes : surface du sol et 1cm en dessous
- le modèle de sol lui même et le modèle pour représenter l'évaporation.

Compte tenu de ces résultats, il a été décidé de reprendre le modèle de sol pour le rendre plus représentatif des phénomènes en présence.

Reprise du modèle de sol

La modélisation des sols est une des contributions du travail de thèse de (Bouyer, 2009) pour l'enrichissement de l'outil de simulation microclimatique. Il propose une modélisation simplifiée reposant sur une analogie électrique et une discrétisation nodale avec :

- des résistances thermiques,
- des capacités thermiques : d'après le principe de conservation de l'énergie, la différence entre le flux thermique qui entre dans l'élément de sol et celui qui sort, est égale à la quantité de chaleur stockée dans celui-ci.

Le modèle schématisé est composé de 4 nœuds. Le premier correspond à la surface, le deuxième est situé après la couche superficielle de revêtement (définie par l'utilisateur) . Le dernier nœud est placé à une profondeur de référence $z_{ref} = 2,00$ m, où on impose

Une température comme condition limite et le troisième nœud est à mi-distance des nœuds 2 et 4 (Figure 36).

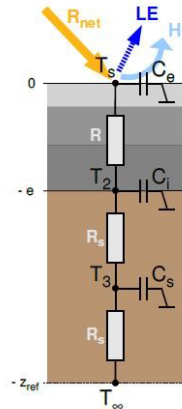


Figure 36 : Discrétisation nodale du modèle de sol

Les différentes couches de matériaux sont considérées homogènes et isotropes, à l'exception de la couche superficielle de revêtement qui est composée de sous-couches. La première couche représentée en gris dans la Figure 36 est donc composée d'une succession de matériaux, pour laquelle on calcule une résistance thermique équivalente.

La première équation correspond à un bilan de flux surfaciques. Elle représente l'équilibre entre le flux conduit dans le sol Q_s et les flux microclimatiques. On discrétise ensuite nœud par nœud le modèle.

Au nœud 1 en surface :

$$\frac{T_s - T_{air}}{R_c} + \frac{T_s - T_2}{R} + C_e \frac{dT_s}{dt} = R_{net} - L + H$$

Au nœud 2 après la couche superficielle de revêtement :

$$\frac{T_2 - T_s}{R} + \frac{T_2 - T_3}{R_s} + C_i \frac{dT_2}{dt} = 0$$

Au nœud 3 à mi-distance entre le nœud 2 et 4 :

$$\frac{T_3 - T_2}{R_s} + \frac{T_3 - T_{\infty}}{R_s} + C_s \frac{dT_3}{dt} = 0$$

Au nœud 4, à une profondeur de référence de 2,00 m la température est considérée constante au cours de la journée. Elle est calculée à partir de l'équation détaillée précédemment.

Après une synthèse bibliographique qui portait sur l'ensemble des flux, plusieurs points d'amélioration ont été relevés :

- La surface imperméable d'asphalte est caractérisée par un albédo inférieur à 0,10 et une émissivité inférieure à 0,95. Ces valeurs peuvent être recalculées à partir des données expérimentales de rayonnement grande et courte longueur d'onde. Les valeurs d'albédo pour de l'eau sont inférieures. De ce fait lors des cycles d'arrosage, l'albédo de la surface devrait chuter brutalement.
- La condition limite en profondeur peut être fixée à partir de la résolution de l'équation de la chaleur pour un signal sinusoïdale en surface et une température constante en profondeur. Cependant, la limite inférieure du modèle devra être située au-delà de la profondeur d'amortissement d'un signal journalier. Pour que le

calcul de cette condition soit représentatif de la température réelle en profondeur, les paramètres T_m , A_t et t_0 doivent être ajustés.

- Comme le montre la littérature abondante sur ce sujet, le calcul du coefficient de convection n'est pas facile. Un choix doit être fait sur la méthode de calcul à utiliser. Dans ce cas précis, deux méthodes (une loi linéaire et la corrélation à partir de nombres adimensionnels) ont été retenues et seront comparées aux mesures de flux de chaleur sensible.
- la discrétisation nodale proposée actuellement pour la conduction dans le sol est grossière. A l'image des autres modèles, pour améliorer la précision, il est nécessaire d'augmenter le nombre de nœuds et leur espacement. Il faudra donc rechercher un optimum entre le nombre de nœuds et le temps de calcul.
- Nous n'avons pas trouvé d'article concernant la simulation d'arrosage sur un sol imperméable. L'article de (Herb et al., 2008) même s'il est éloigné de nos conditions donne quelques pistes sur l'intégration des cycles au modèle. Il démontre que le flux de conduction entre l'eau et la surface est aussi important que l'évaporation : l'un ne peut être négligé.
- Pour les flux d'évaporation, de même, l'estimation de la résistance aéraulique comporte une incertitude. Elle peut être évaluée à partir du coefficient de convection calculé précédemment ou à partir de la vitesse de l'air et de la rugosité du sol. L'influence de ce choix sera évaluée sur le calcul de ce flux.

Comparaison aux résultats de la campagne Rosure

Les données d'une campagne de mesures dans un environnement simple, celui d'un parking, ont été utilisées pour analyser le comportement de notre modèle et l'améliorer.

Présentation de la campagne Rosure

Le projet ROSURE (Rôle des Surfaces Revêtues) a été mené par le LCPC (Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées, maintenant IFSTTAR) et financé par le PNRH (Programme National de Recherche en Hydrologie). Il avait pour but d'étudier le séchage de chaussées mouillées et l'impact de l'humidification d'une chaussée sur l'adhérence. Au total, trois campagnes de mesures de températures et de flux ont été réalisées entre 2002 et 2004. Pour cette étude, nous exploitons les données les plus complètes et les plus récentes qui sont celles de ROSURE n°3 (28 mai au 18 juin 2004).

L'expérience a été réalisée à Bouguenais sur un parking de 2500 m² et une pente de 1 à 2 % vers l'avaloir au centre (Vilella Escuté, 2004). La composition de la surface est la suivante :

- 5 cm d'enrobé bitumineux,
- 45 cm de grave non traitée,
- Terrain naturel.

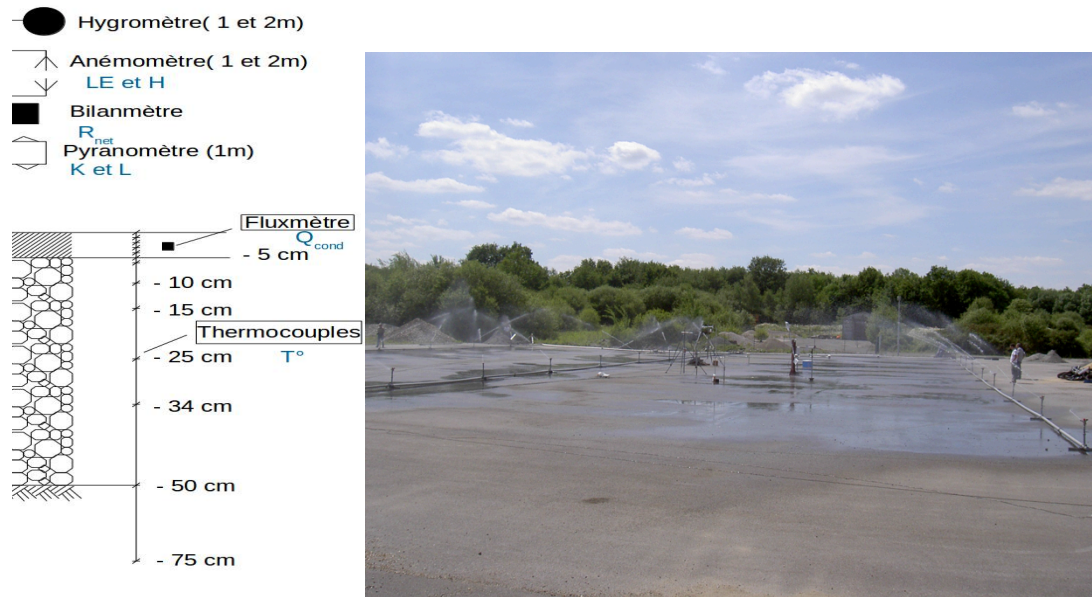


Figure 37 : Schématisation de la mesure (gauche) et visualisation de l'expérience (droite)

La surface bitumée était soumise à des cycles d'arrosage d'environ 20 à 30 minutes. Durant toute l'expérience des mesures (Figure 37) ont été réalisées.

Le Tableau 5 récapitule les données utilisées en entrée dans le modèle de sol et SOLENE-microclimat (après intégration du modèle) et celles utilisées pour valider le modèle.

	Données d'entrée	Validation
Modèle de sol	Rayonnement CLO Rayonnement GLO Données météo Profil de température	Températures Flux chaleur latente Flux chaleur sensible
Solene Micro.	Profil de température initial Données météo	Températures Flux chaleur latente Flux chaleur sensible Flux-conduit

Tableau 5 : Récapitulatif des données d'entrées et de validation du modèle

Pour travailler à l'amélioration du modèle de sol, 4 journées ont été sélectionnées, avec des conditions météorologiques différentes et certaines avec ou sans arrosage (Tableau 6). L'ensoleillement (courbe bleu) et la température de surface (courbe rouge) pour ces 4 journées sont présentées dans la Figure 38 . Les chutes de température de surface lors des deux dernières journées illustrent bien l'effet des arrosages.

Date	Ciel	Arrosage
5 juin 2004	nuageux	Non
6 juin 2004	clair	Non
7 juin 2004	clair	Oui
8 juin 2004	nuageux	Oui

Tableau 6 : Caractéristiques des journées simulées

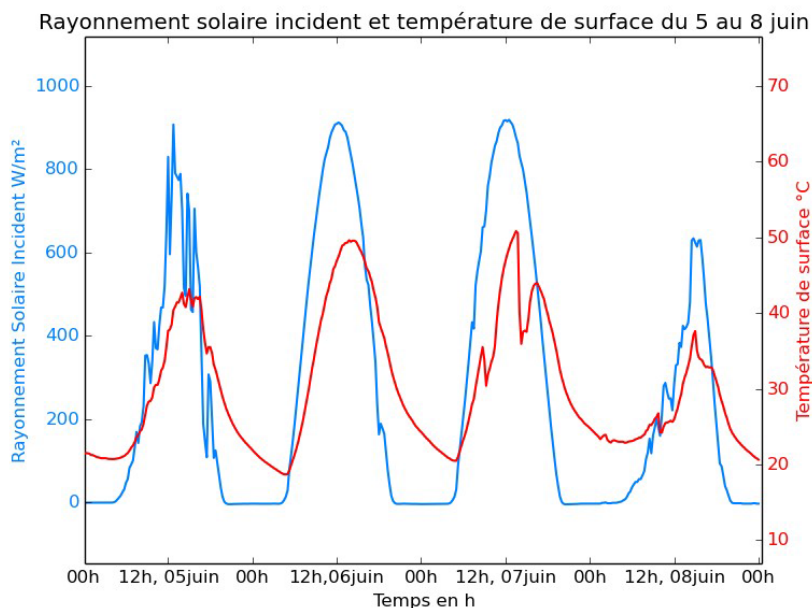


Figure 38 : Rayonnement incident et température de surface du 5 au 8 juin

A partir des données du 6 et 7 juin, l'albédo et émissivité de la surface ont été calculés. Ils permettent de caractériser plus précisément la surface. L'albédo et l'émissivité mesurés sont supérieurs aux valeurs données par Guyot (1999). On remarque également que la valeur de l'albédo chute durant les arrosages, ce qui est cohérent puisque l'albédo de l'eau est plus faible (0,03-0,10) que l'albédo de la surface mesuré.

	ROSURE
Albédo	0,173 <i>Moyenne pour $K_{\uparrow} > 20W/m^2$</i>
Émissivité	0,965 <i>Moyenne</i>

Tableau 7 : Caractéristiques de surface pour le modèle de sol

Les performances du modèle de sol de SOLENE-microclimat ont été évaluées en comparant les résultats expérimentaux à la modélisation du parking pour la journée du 6 juin (ciel clair sans arrosage). La simulation a été réalisée avec les caractéristiques données par les rapports de la campagne de mesure Rosure de (Vilella Escuté, 2004) (Tableau 8). Les données météo sont celle mesurées et la simulation est réalisée avec un pas de temps d'une heure.

Couche	Profondeur	Conductivité	Capacité thermique	Coefficient de convection
n°	z	λ (W/m.K)	$\rho * C_p 10^6$ (J/m³K)	h
1	0,05	1,1	2,4	3,8* v _{air} +5,7
2	0,5	1,5	1,4	
3	1	1,5	2,4	

Tableau 8 : Caractéristiques initiales du sol

Comparaison des mesures aux simulations réalisées avec le modèle existant

Une deuxième partie est consacrée à la comparaison des mesures aux simulations réalisées à partir du modèle de sol existant de SOLENE. Ceci permettra d'identifier les points à améliorer pour mieux reproduire les échanges de chaleur en surface et dans le sol.

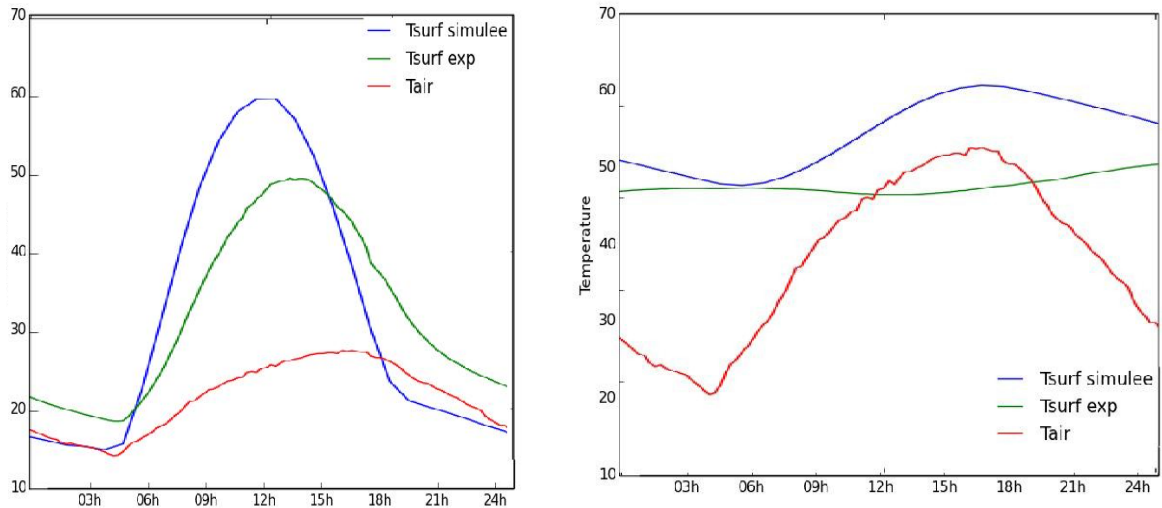


Figure 39 : Température de surfaces simulée avec SOLENE-microclimat et mesurée (à gauche) - Températures à 50 cm de profondeur simulée avec SOLENE-microclimat et mesurée (à droite)

De fortes différences existent entre les températures simulées et observées. La modification des caractéristiques des matériaux ne permet pas de caler les courbes simulées sur la mesure. Il faudrait entrer des caractéristiques non réalistes. On s'est donc intéressé aux flux pour tenter d'identifier les causes.

Flux conduit entre 0 et 50 cm : Les flux de conduction simulés sont plus importants que ceux mesurés. Le modèle reproduit mal le stockage et déstockage de la chaleur dans le sol.

Ceci explique la surestimation de la température de surface en journée et sa sous-estimation la nuit.

Flux convectif : La température en surface étant surestimée le jour, le flux convectif simulé est logiquement plus important que celui mesuré. Cet écart peut être dû à :

- une mauvaise estimation du coefficient de convection,
- une mauvaise estimation de la conduction dans le sol, et par conséquent de la température de surface.

Les phases de stockage/déstockage de la chaleur dans le sol sont mal reproduites. On peut supposer qu'augmenter le nombre de noeuds du modèle comme le fait (Asaeda and Ca, 1993) permettra d'améliorer la conduction dans le sol.

Comparaison des mesures aux simulations réalisées avec différents niveaux de discrétisation

Le but de la modification du modèle de sol est d'améliorer la répartition et le nombre de points dans le modèle pour reproduire au mieux les phénomènes de stockage/déstockage et donc l'évolution de la température en surface. L'étude a été réalisée tout d'abord sur un modèle « idéal » avec 1 point tous les centimètres pour s'affranchir de leur répartition et caler les autres paramètres du modèle :

- La condition limite en profondeur
- L'estimation du coefficient de convection
- Les caractéristiques des matériaux

La sensibilité de ces paramètres a ensuite été étudiée afin de connaître l'importance de rentrer précisément leur valeur. Enfin le modèle a été réduit et validé.

Le modèle de sol repose sur une condition limite de température en profondeur constante au cours de la journée. Pour calculer cette température, il faut répondre à deux questions :

- à quelle profondeur doit être placé z_{ref} ?
- Quels paramètres (demi-amplitude A_t , température moyenne T_m et déphasage t_0) doit-on utiliser pour calculer la condition limite à z_{ref} ?

Nous avons dans un premier temps calculé la profondeur à laquelle un signal journalier aura peu d'impact sur la température en profondeur. Pour un catalogue de matériaux (asphalte, terre, béton...) le matériau le plus diffusif est le marbre. Pour ce matériau la profondeur d'amortissement du signal journalier à 99 % est de 0,89 cm. Nous avons donc fait l'hypothèse qu'au delà d'un mètre, la température est constante au cours d'une journée quel que soit le matériau. Il n'est pas nécessaire de placer z_{ref} à une distance supérieure comme le font certains modèles de sol.

Les paramètres T_m , A_t et t_0 ont été estimés avec les données météorologiques de 2010 à 2013 issues de 3 stations du réseau TRH mis en place à Nantes. Ces valeurs variaient légèrement d'une station à une autre, elles ont été fixées à la valeur moyenne (Tableau 9).

Paramètre étudié		Moyenne
Température moyenne	T_m	12,50
Amplitude	A_t	11,86
Déphasage	t_0	30

Tableau 9 : Valeurs des paramètres pour la condition limite de température

Pour estimer correctement le flux de chaleur sensible dans le modèle, différentes méthodes ont été comparées aux flux obtenus lors de la campagne de mesure :

- Calcul de h_c à partir de la formule de (MacAdams, 1954).
- Calcul de h_c à partir des nombres adimensionnels et avec différentes longueurs caractéristiques (ici choisies pour 1 m (modèle de 1 m²) et 50 m (la taille du parking étudié))

Après calcul des nombres adimensionnels, le régime de convection varie au cours du temps : il est mixte la nuit et forcé en journée. La convection naturelle a donc une part importante qui n'est pas représentée lors de l'application de la première formule. Comme on peut le voir sur la Figure 40 , la nuit la 2^{ème} méthode est plus proche de la mesure. En journée c'est également ce calcul du coefficient de convection qui se rapproche le plus de l'expérimental. Pour la suite, la méthode des corrélations sera utilisée avec une longueur caractéristique de 1 m.

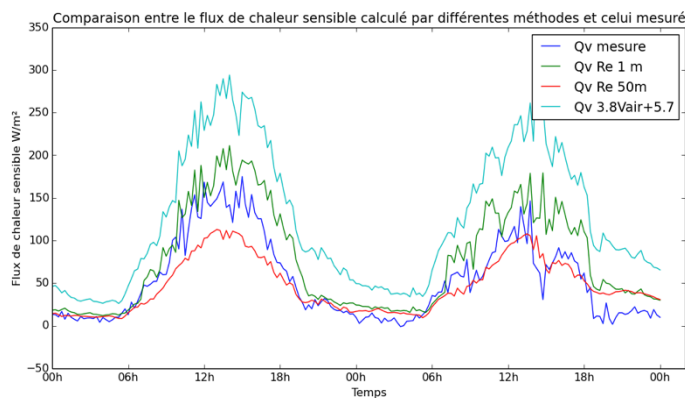


Figure 40 : Comparaison des flux de convection simulés et expérimentales

Les caractéristiques des matériaux sont souvent mal connues et doivent être ajustées. C'est pourquoi, à partir des caractéristiques initiales des matériaux du sol (Tableau 9), le modèle a été calé. Les journées ensoleillées sont plus difficiles à reproduire, c'est pourquoi l'ajustement est réalisé sur la journée du 6 juin. Le système a été initialisé avec le profil des températures mesurées le 6 juin à 00h comme le proposait les modèles de sol de (Asaeda and Ca, 1993). La condition limite en profondeur a été fixée avec les données expérimentales et non le calcul de la température de référence, ce qui permet d'éviter une simulation sur plusieurs jours.

Les résultats de simulation obtenus avec les paramètres initiaux mais le nouveau modèle (Figure 41 Gauche) sont plus proches de la mesure que ceux obtenus lors de l'évaluation du modèle initial de SOLENE-microclimat. Cependant, pour obtenir une modélisation proche des données expérimentales, les caractéristiques des matériaux ont été ajustées (Tableau 10). Les résultats alors obtenus (Figure 41 Droite) présentent pour la température de surface un écart maximal de 1,34°C et un écart quadratique moyen de 0,53°C avec les données expérimentales. De même, les courbes à différentes profondeurs sont proches des mesures de températures expérimentales. Le modèle reproduit donc bien la conduction dans les différentes couches du sol.

Couche	z	λ (W/m.K)	$\rho^* C_p 10^6$ (J/m ³ .K)	h
0	0,01	2,5	2,3	Fonction du régime, Re, Gr, Nu, L=1m
1	0,06	2,5	2,1	
2	0,5	1,8	2,3	
3	1	1,3	2,1	

Tableau 10 : caractéristiques de sol obtenues après ajustement

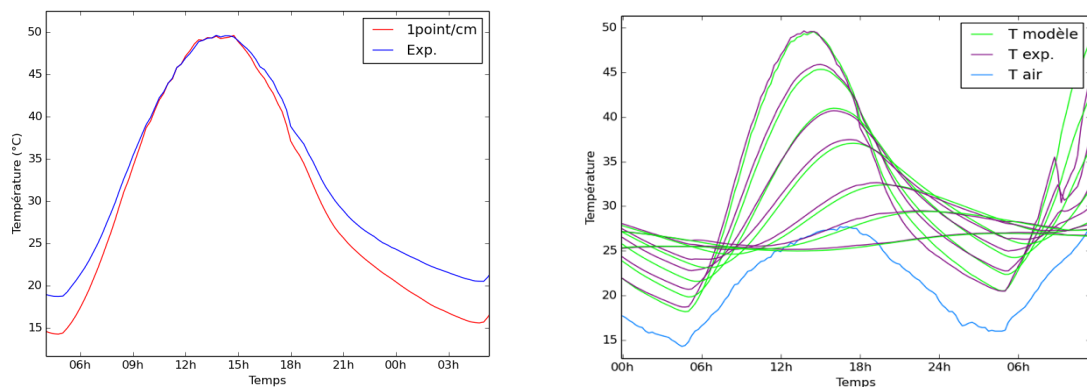


Figure 41 : Gauche : Résultats de température de surface avec le nouveau modèle et les paramètres initiaux, Droite : Résultats avec le nouveau modèle et les caractéristiques de sol recalées.

Plusieurs études sur les paramètres ont alors été réalisées et il a été montré que

- La variation des paramètres de la condition limite en profondeur a peu d'influence sur la température en surface : si la température en profondeur est surestimée de 1°C, il n'y aura qu'un écart de 0,05°C en surface.
- L'estimation du coefficient de convection a donc une forte influence sur la température de surface.
- Les caractéristiques thermiques (conductivité thermique, masse volumique, épaisseur) des couches les plus importantes du revêtement (Couche 0 à 2) ont le plus d'influence sur la température en surface, alors que la couche de sol (n°3) en profondeur a peu d'influence

Pour optimiser les temps de calcul, il a été nécessaire de réduire le nombre de points du modèle, sans altérer drastiquement la précision du modèle. Avec l'étude des profils des températures au cours d'une journée on observe différentes dynamiques.. Il faut plus de points en

surface qu'en profondeur. On retrouve une distribution de points similaire à celle de (Herb et al., 2008), avec des couches plus minces en surface qu'en profondeur.

Le modèle a été découpé en trois couches à l'intérieur desquelles la répartition des points est différente. Pour fixer l'épaisseur de ces couches, nous avons travaillé sur la profondeur d'amortissement d'un signal tri-horaire (correspondant potentiellement au passage de nuages) et journalier. Différents nombres de points ont été étudiés et un compromis de 22 points a été adopté

Modèle d'humidification

Comme présenté par (Herb et al., 2008), lors de l'humidification d'une surface, l'eau se répartit de la manière suivante :

- une partie de l'eau ruisselle : conduction entre l'eau froide en contact avec la surface chaude,
- une partie de l'eau s'évapore : évaporation de la lame d'eau qui reste en surface,
- une partie de l'eau s'infiltré : dans le cas d'un sol imperméable, cette partie est infime.

Le modèle doit donc reproduire un flux de conduction et un flux d'évaporation.

L'étude des cycles d'arrosage est réalisée dans un premier temps sur la journée du 7 juin (ciel clair) puis validée sur la journée nuageuse du 8 juin (ciel nuageux). Les caractéristiques des arrosages sont décrites dans le Tableau 11.

Date	Heure début	Durée (min)	Volume total (m3)
7 juin	8h51	20	13,75
	14h43	30	21,33
8 juin	9h45	19	12,4
	17h11	5	3,06

Tableau 11 : Caractéristiques des arrosages du 7 et 8 juin

Un premier flux est à estimer, il s'agit de l'échange conductif entre l'eau ruisselée et la surface. Il est calculé à partir de la différence de température entre l'eau à l'entrée du système et l'eau en sortie (entre l'instant où l'eau touche le sol et le moment où elle arrive à l'exutoire).

$$\Phi_{eau/sol} = \rho_{eau} C_{p_{eau}} \delta T \frac{V_{eau}}{(S_{parking} * t)} (W/m^2)$$

Lorsque l'eau ruisselle sur la surface, sa température augmente rapidement jusqu'à atteindre la température de surface. Ce phénomène se produit pendant les vingt premières minutes. On peut donc faire l'hypothèse que ce transfert d'énergie entre l'eau et la surface se produit uniquement au début de l'arrosage et que la température de l'eau atteint instantanément la température de la surface. Dans le modèle, la totalité du flux eau/surface est intégré au premier pas de temps d'arrosage (15 min).

Le flux d'évaporation est calculé à partir de l'équation:

$$LE = L \frac{\rho_{air}}{R_a} [q_{sat}(T_{eau}) - q(T_{air})]$$

uniquement en présence d'eau sur la surface. Lors du calcul du flux, la résistance aérodynamique a été calculée à partir du coefficient de convection.

Une hauteur d'eau initiale à évaporer est estimée à partir des données expérimentales. Cette hauteur d'eau diminue à chaque pas de temps en fonction du flux d'évaporation calculé. Pour les 16 arrosages réalisés pendant ROSURE, la hauteur a été estimée de deux manières :

- Bilan de masse : la différence entre le volume d'eau qui est amenée à la surface et celui qui est récupéré à l'exutoire divisé par la surface permet d'estimer la hauteur évaporée

$$h_{eau} = \frac{L E}{L} * \delta t$$

- A partir du flux de chaleur latente mesuré :

Les méthodes de calcul ont été comparées. Lorsque les volumes d'eau arrosés sont faibles (< 3 m³) les deux estimations donnent des hauteurs d'eau sensiblement équivalentes. Au contraire lorsque les volumes d'eau sont importants (12 à 20 m³), la méthode de bilan de masse donne des résultats en moyenne 1,6 fois supérieurs à l'autre méthode. Pour le modèle la méthode d'estimation à partir des flux de chaleur latente est retenue.

La Figure 42 schématise l'intégration du flux de conduction en bleu au premier pas de temps d'arrosage et du flux d'évaporation en rouge au pas de temps suivant. Le Tableau 12 donne les écarts entre la température simulée et mesurée lors de la modélisation du 7 juin, les écarts sont conséquents lors des arrosages, cependant l'écart quadratique moyen reste inférieur à 1°C. Pour rappel (Herb et al., 2008) constate un écart quadratique moyen de 1 à 2°C sur les journées avec arrosage.

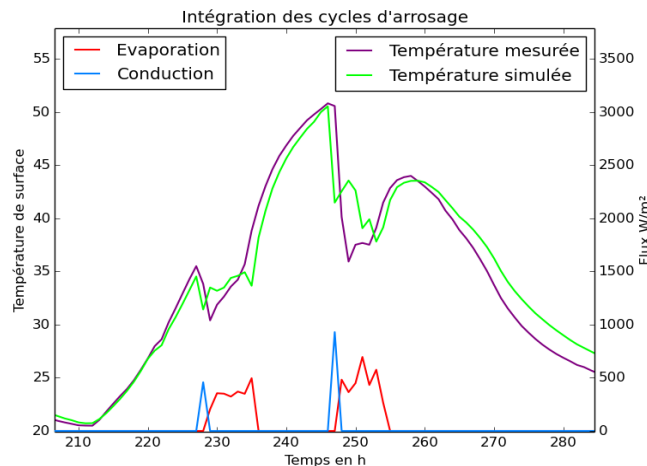


Figure 42 : Intégration des cycles d'arrosage sur la journée du 6 juin

Référence	Modèle	1pt/cm
Données expérimentales	Écart moyenne abs	0,98
	Écart-type	1,15
Erreur quadratique moyenne le 7 juin		0,96

Tableau 12 : Écart entre la température simulée et mesurée le 7 juin

Sur les quatre arrosages modélisés sur la journée du 7 et 8 juin, le flux conduit entre l'eau et la surface représente 1654 W/m² alors que le flux évaporé représente 9255W/m². Le flux évaporé est 5 fois plus important que le flux conduit. Le refroidissement de la surface est du à 84 % à l'évaporation de l'eau. Le flux de conduction est incorporé de manière ponctuelle, il contribue à la chute brutale de la température lors du contact entre l'eau et la surface. Même si en proportion, il ne représente que 16 % du refroidissement de la surface, il est essentiel à la bonne reproduction de la dynamique au premier pas de temps.

Le nouveau modèle de sol présente une erreur de 0,56°C (EQM) hors simulation d'arrosages. La précision du modèle a donc nettement été améliorée. Lors de sa thèse, Malys (2012) avait mesuré une erreur de 1,5 à 5°C (EQM) avec l'ancien modèle. La modification de la répartition des points et l'augmentation du nombre de points permet d'améliorer la retranscription

de la conduction dans le sol. Cependant, la simulation est accompagnée des incertitudes suivantes :

- modification des caractéristiques des matériaux (de 10 %), écart de 0,70°C en surface,
- modification de la condition limite en profondeur (de 1°C), écart de 0,05°C en surface,
- modification de l'estimation du coefficient de convection, écart moyenne en surface de 2,88°C.

Ces incertitudes liées aux paramètres d'entrée pour la simulation sont nettement supérieures à l'erreur constatée entre le modèle et l'expérimentation. La précision du modèle est donc tout à fait satisfaisante

Après intégration des cycles d'arrosage sur les journées du 7 et 8 juin, l'erreur quadratique moyenne est de 1,37°C EQM. Le modèle de (Herb et al., 2008) propose une précision équivalente de 1 à 2 °C. L'application est ici faite sur des journées ensoleillées (et donc avec des fluctuations de températures mises en jeu bien plus élevées) alors que Herb applique le modèle à des journées pluvieuses, donc nuageuses. La simulation peut également être erronée par les incertitudes suivantes :

- la modification de la hauteur d'eau (0,1mm), induit un écart pendant l'arrosage de 2°C
- la modification de la mesure de HR de 10 %, induit une diminution du flux d'évaporation de 8 %, avec un impact de 0,5°C pendant l'arrosage
- la modification de l'estimation du coefficient de convection pour la résistance aérodynamique de 10 % induit une diminution du flux d'évaporation de 10 %, avec un impact de 1°C pendant l'arrosage.

La simulation de la période d'arrosage a donc une incertitude totale de 3,5°, ce qui explique les forts écarts maximums entre la simulation et les données expérimentales.

La Figure 43 présente l'impact des arrosages sur la température de surface. Les simulations ont été réalisées les 7 et 8 juin avec un pas de temps de 15 min et successivement avec et sans arrosages.

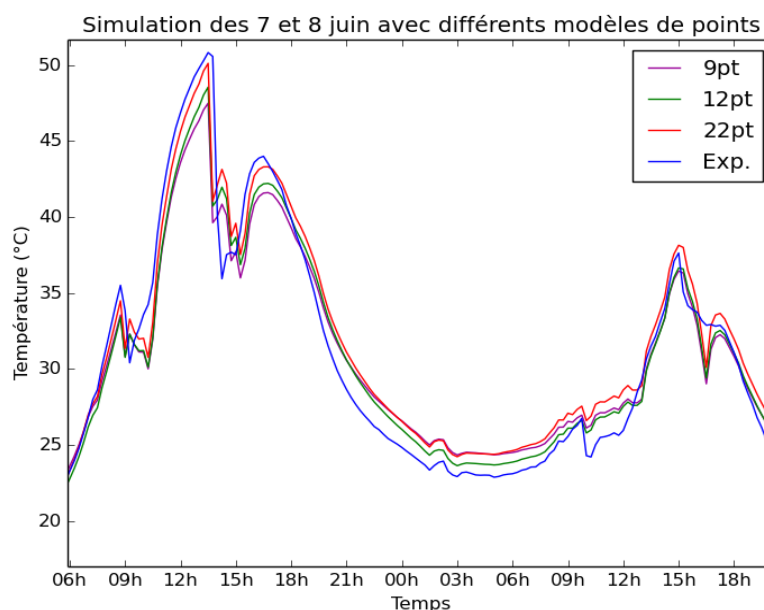


Figure 43 : Intégration des cycles d'arrosage sur la journée du 6 juin

Le 7 juin (journée ciel clair), le premier arrosage a lieu à 8h45, il permet de diminuer la température de surface de 9,4°C. Sur le deuxième arrosage (à 14h45), la diminution de la température est plus importante car les effets des deux arrosages sont cumulés : la température de surface diminue de 20,3°C. L'effet est aussi important sur une journée nuageuse (8 juin), sur le premier arrosage 8,7°C et sur le deuxième 11,3 °C

Il y a également un impact sur le long terme, une fois la surface sèche. L'arrosage permet de diminuer la température du sol en journée 3,0 °C (écart minimum observé entre les arrosages en journée le 7 juin, Illustration 33). La nuit, la température du sol est abaissée de 3,3°C (écart minimum observé entre le 7 et le 8 juin).

L'arrosage de la surface a donc un réel impact sur la température de surface du parking en journée et la nuit. Il permet de diminuer la température de 3°C en moyenne sur les deux journées.

Application à la rue de la Buire

Après intégration du modèle dans SOLENE-microclimat, celui-ci est employé pour l'étude du cas de la rue de la Buire à Lyon.

Parmi l'ensemble des données de 2014, les deux journées les plus ensoleillées ont été sélectionnées. L'idée est d'avoir des journées aux conditions météorologiques « idéales » pour qu'elles soient semblables à celles simulées par SOLENE-microclimat (journées au ciel clair)(Tableau 13). L'ensoleillement (Figure 44) pour ces deux journées est présenté.

Date	Ciel	Arrosage	Précipitations
26 juillet 2014	Ciel clair	Non	8,0 mm à 01h 3,2 mm à 14h
27 juillet 2014	Ciel clair	Oui	-

Tableau 13 : Caractéristiques des journées étudiées

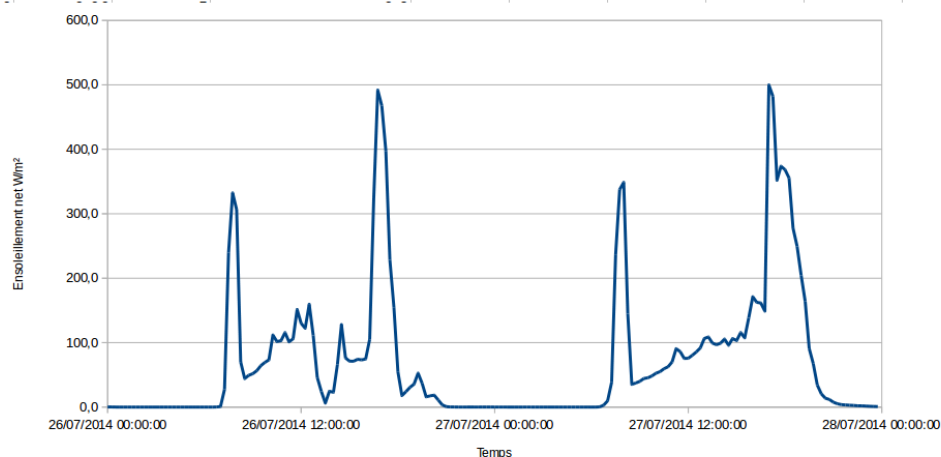


Figure 44 : Ensoleillement du 26 et 27 juillet 2014

Les pics dans la courbe du rayonnement solaire net en début et fin de journée illustrent bien la faible durée d'ensoleillement de la rue. Il est donc difficile de déterminer avec certitude les conditions d'ensoleillement de ces journées sur la seule connaissance des flux radiatifs mesurés dans la rue. De plus d'après les données météo France pour la station de Bron (à proximité de Lyon), les journées du 26 et 27 juillet, sont faiblement ensoleillées, respectivement 9,2h et 11,5h contre 14,5h pour les journées les plus ensoleillées de juillet.

La journée du 26 juillet est nuageuse entre 12h et 13h pendant un épisode pluvieux (3,2 mm) ce qui correspond à la chute brutale d'éclairement au centre. De nouveau vers 17h, la nébulosité est de 8/8 selon météo France, d'où la chute brusque après le pic de 16h. Il n'y a pas de précipitation le 27 juillet, cependant le ciel devient nuageux vers 14h à Bron. La courbe

d'ensoleillement de la rue n'est cependant pas impactée à 14h mais vers 16h. On peut supposer que les nuages sont apparus plus tard sur le site.

Pour modéliser la rue de la Buire dans son microclimat, l'environnement direct de la rue a été conservé : les bâtiments voisins, le parc, les routes et les trottoirs (Figure 45). Pour minimiser le temps de calcul, la représentation des bâtiments a été simplifiée (pas de fenêtres ou portes...), et certains éléments urbains ne sont pas représentés (les arbres par exemple).

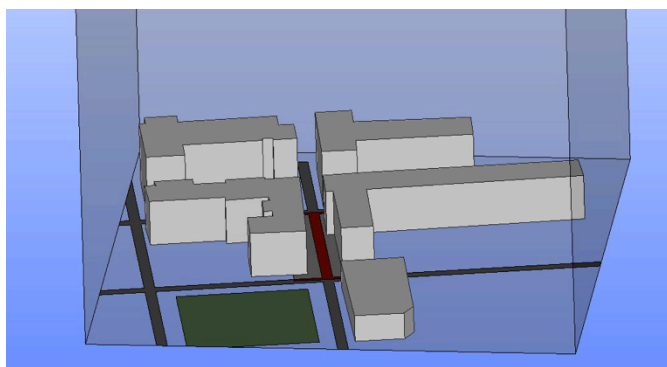


Figure 45 : Modélisation 3D de la rue

Les caractéristiques des parois sont définies comme indiqué dans le Tableau 14 : Caractéristiques des surfaces

. Les données manquantes sont issues de matériaux aux caractéristiques semblables. De même les albédos et l'émissivité des surfaces sont indiqués dans le Tableau 14. L'albédo et l'émissivité des routes et trottoirs correspondent aux valeurs mesurées sur ROSURE. Les façades des bâtiments sont considérées comme bien isolées. Un albédo moyen a été calculé en fonction de leur taux de vitrage.

Zone	Batiments		Route et trottoirs
	Façade	Toiture	
Albédo	0,54	0,40	0,17
Émissivité	0,90	0,90	0,95

Tableau 14 : Caractéristiques des surfaces

Surface	matériaux	épaisseur (cm)	λ	Cp	ρ (kg/m ³)
Route	BB 0/6	2,5	2	869	2350
	BBS G	7	2	869	2142,8571429
	GNT031	7,5	0,52	838	1703
	Fraisat	8	2	869	2350
	GNT031	10	0,52	838	1703
	GNT080	35	0,89	837	1750
Trottoirs	Asphalte	2	0,7	920	2120
	Béton ciment	10	1,51	880	2200
	GNT 031	8	0,52	838	1703
	GNT 080	50	0,89	837	1750
Mur et toiture	Béton	20	1,75	1000	2300
	Laine de roche	15	0,04	1030	30

Tableau 15 : Caractéristiques thermiques des parois

La Figure 46 compare la température simulée à 1 cm et en surface au coin de la rue avec la température mesurée à 1 cm. La dynamique est bien reproduite cependant les écarts de températures lorsque la rue est ensoleillée sont importants, de l'ordre de 5°C. De même, au centre de la rue, le 27 juillet en début de journée (6h à 15h), lorsque la rue est à l'ombre les températures simulées et mesurées sont équivalentes et lorsque le point de mesure est éclairé la simulation restitue mal la variation de température (Illustration 40).

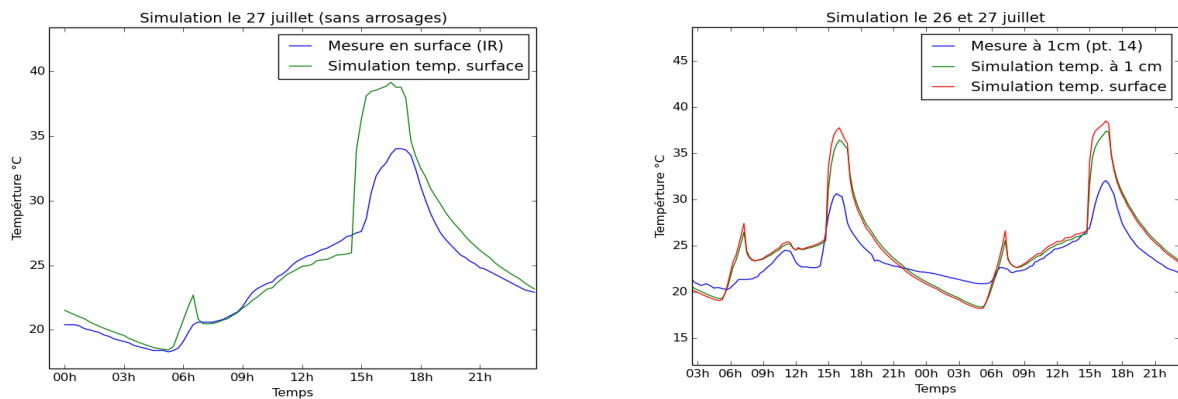


Figure 46 : Gauche : Températures de surface simulées et mesurées au centre de la rue ; Droite : Températures simulées et mesurées à 1cm de profondeur au coin de la rue

Nous avons recherché les causes explicatives de ces écarts et il y a de fortes incertitudes liées à la fois à la mesure et à la simulation :

- La localisation des mesures n'est pas connue précisément.
- Sur la journée du 26 juillet, la mesure de la température de l'air varie brusquement. Celle-ci est réalisée sous abri ventilé au centre de la rue. Il est probable que lorsque l'abri est éclairé, il surchauffe. Par conséquent la mesure augmente brusquement. Cette surestimation a un impact sur l'estimation du coefficient de convection. La température de l'air étant ponctuellement surévaluée, le gradient de température entre le sol et l'air est sous-estimé, et la convection libre sous-évaluée.
- La vitesse de vent mesurée est très faible, il est possible que la mesure n'ait pas fonctionné correctement ou que la convection libre soit prépondérante. Notre estimation des échanges convectifs n'est peut-être plus adaptée.
- Les caractéristiques des matériaux ne sont pas connues. La forte augmentation en journée et la forte diminution la nuit, peut être expliquée par une conductivité thermique et une capacité trop importante. Le matériau stocke et déstocke l'énergie trop rapidement. Un ajustement des caractéristiques thermiques pourrait permettre de mieux reproduire cette dynamique.
- L'éclairement net au centre de la rue est sous estimé le matin et surestimé en fin de journée. SOLENE simule une journée parfaitement ensoleillée, le flux solaire incident simulé est donc supérieur au flux réel, ce qui explique le second pic en fin de journée. Cependant pour le premier pic, la simulation est inférieure à la mesure. Le flux réfléchi calculé par SOLENE est donc trop important. Il dépend des inter-réflexions entre les bâtiments et la surface et donc des albédos des surfaces.

Des comparaisons des résultats avec et sans arrosage ont été réalisées.

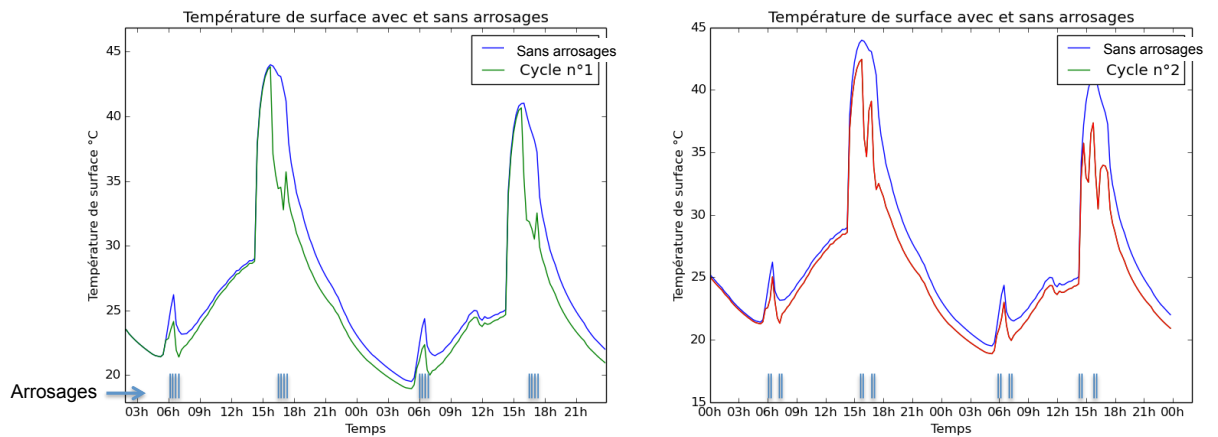


Figure 47 : Températures de surfaces avec et sans arrosage. Gauche : chaussée humide pendant 1h à 6h et 16h ; Droite : chaussée humide pendant 1/2h à 6h, 7h et 16h et 17h.

3.4. Mise en place des scénarios

Scénarios et périmètres de modélisation

Scénarios

Les réunions entre les différents intervenants du projet EVA et acteurs du territoire du Grand Lyon (Mission Part-Dieu, Agence d'urbanisme, Plant Climat) ont permis de décider des modélisations qui allaient être réalisées dans le cadre du projet. Ce paragraphe détaille les différents points.

Afin de ne pas rendre l'étude trop rapidement obsolète, il a été choisi de modéliser la forme future des lieux, dans la limite des connaissances que l'on peut avoir des futurs projets, mais au moins pour la forme du bâti.

La modélisation sera faite selon plusieurs scénarios d'aménagement des solutions de rafraîchissement :

- A. état existant, ou cas minéral classique pour les zones en projet (« Place de Francfort»).
- B. scénario maximaliste (chaque solution d'atténuation est mise en place au maximum sur la zone), scénarios appelés monodispositifs ;
- C. scénario optimisé (combinaison des solutions pour arriver à une forme viable et efficace)
- D. scénarios obtenus par déduction d'un dispositif à partir du scénario optimisé, scénarios appelés soustractifs.

Les scénarios sont représentés dans la Figure 48 .

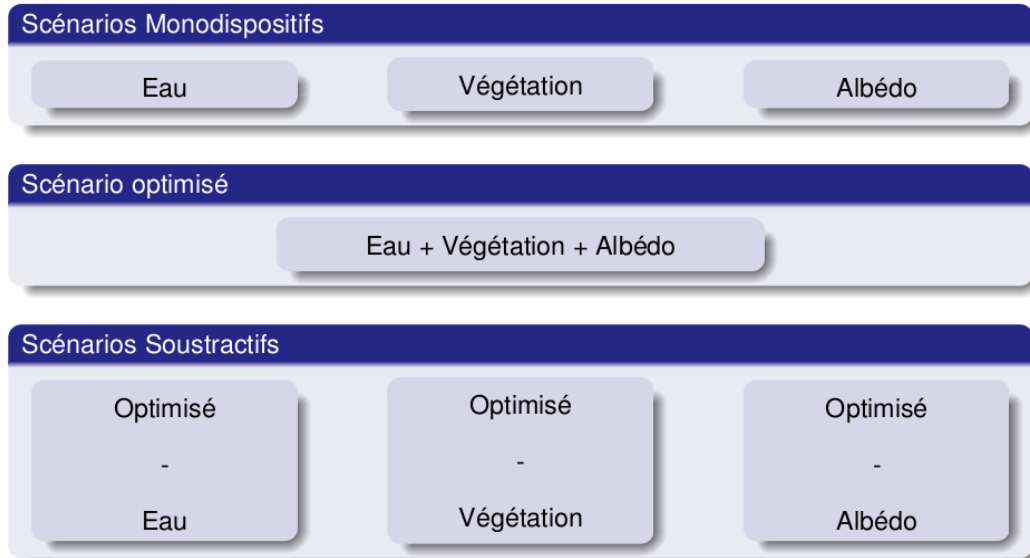


Figure 48 : Synthèse des scénarios

Au final, il y a donc par site : 1 cas A, 3 cas B, 1 cas C et 3 cas D, soit 8 cas pour chaque site et le domaine englobant.

Si le scénario C est a priori le plus intéressant en termes de résultats effectifs, les 2 scénarios A, B et C sont nécessaires pour pouvoir juger de l'efficacité des solutions et les effets de cumul.

Domaines de calcul

Les modélisations macro du climat urbain (sous ARPS) nécessitent de définir un domaine de calcul « haute résolution », et un domaine « basse résolution ».

Les modélisations sous Solene-Microclimat nécessitent de définir un quartier de quelques centaines de mètres de côtés.

Les modélisations sous EnviBatE reprendront ces quartiers, mais en les étendant à un domaine géographique un peu plus large.

Géographiquement les 3 zones retenues sont (Figure 49) :

- Quartier de la Buire
- Place de Francfort
- Les barres Moncey

Domaine
résolution

haute

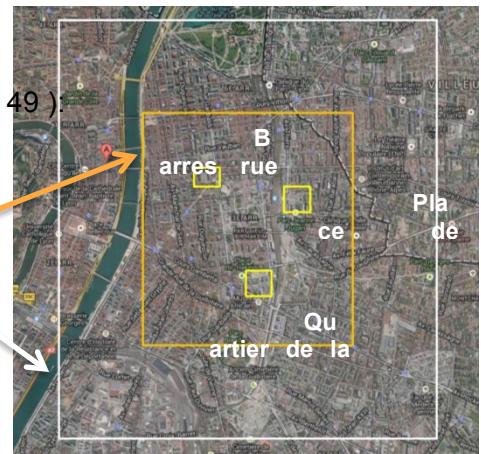


Figure 49 : Localisation des sites et des domaines de modélisation

Quartier de la Buire

Caractéristiques :

C'est un quartier urbanisé de centre-ville, avec des bâtiments neufs en cours de finalisation.

Il a déjà été modélisé en partie sous Solene-Microclimat pour la mise au point du modèle d'humidification.

Le quartier possède aussi des aspects intéressants : présence d'un parc, d'une grande avenue en bordure, du pilote d'humidification de chaussée situé rue de la Buire et d'un stockage d'eaux pluviales dans le parc.

Enjeux de rafraîchissement:

Les résultats observés seront :

- consommation énergétique des bâtiments (demande froid associé à la climatisation pour les bâtiments équipés /
- ou confort intérieur (pour les bâtiments non équipés de climatisation)
- et confort extérieur

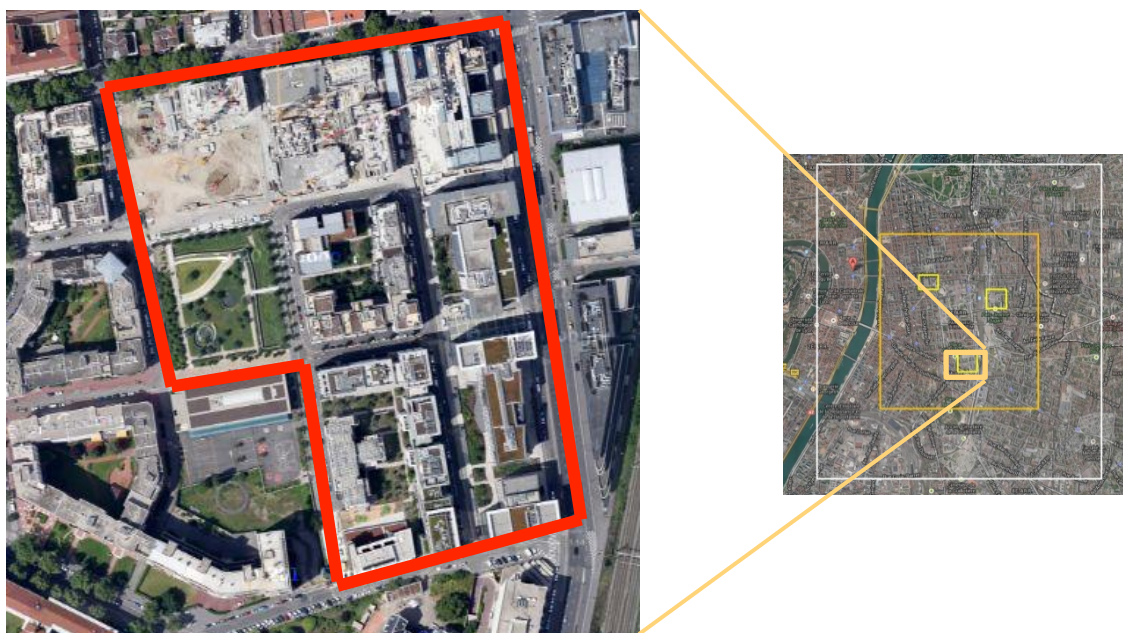
La forme de ce quartier neuf est assez standard et les résultats sont donc reproductibles pour des projets similaires.

Possibilités d'aménagement:

- L'humidification de la chaussée
- Arbres et gazon sur les trottoirs des rues
- Façades végétalisées







Figure 50 : Exemples de photos du site



Maille d'environ 300m x 300m
 Figure 51 : Zoom sur le quartier de la Buire

Les usages



-  Bâtiment à usage majoritaire d'habitation
-  Bâtiment à usage majoritaire de Bureaux
-  Infrastructure (école)
-  Parc (qui récupère les eaux de pluie)

Espaces végétalisés et point d'eau







-  Bassins d'eau (avec plantes aquatiques)
-  Ilot central végétal
-  Gazon, végétation basse (arbustes)
-  Parc (qui récupère les eaux de pluie)

Figure 52 : Les usages et la végétation sur le quartier de la Buire

Place de Francfort

Caractéristiques :

La place va faire l'objet d'un réaménagement total, avec la volonté d'en faire un espace de détente. Les travaux se feront en plusieurs phases : d'abord des premiers travaux sur la place, puis l'installation des fonctionnalités au fur et à mesure de l'évolution de la gare.

Dans le document « la Mission Part Dieu », la place Francfort est un lieu à proximité de la gare qui devra répondre à plusieurs objectifs :

- Lieu de passage qui devra faciliter les circulations et les flux de population,
- Lieu de rencontre et de mixité sociale
- Lieu vitrine
- Hub en matière culturelle et artistique

La place est intéressante car elle fait l'objet d'une véritable ambition de valorisation : actuellement certaines activités (restauration notamment) sont impraticables aux heures les plus chaudes de la journée à cause de l'inconfort thermique

C'est un endroit où les gens passent, mais également un lieu où les passagers peuvent patienter.

Travailler sur un espace public présente aussi l'intérêt de toucher plus de gens.

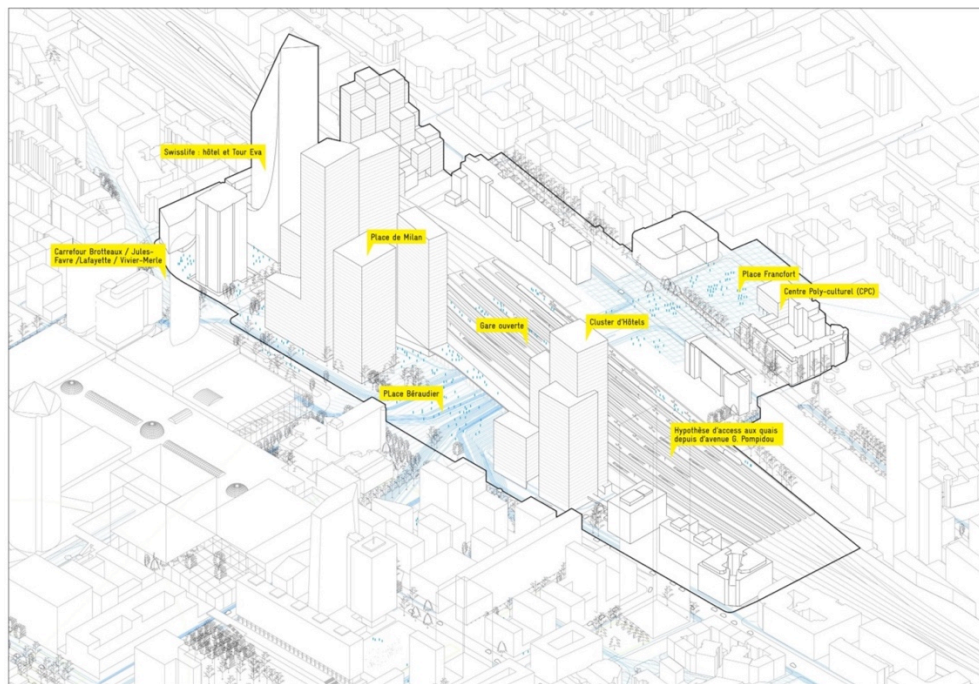


Figure 53 : Vue du projet de la Gare Part-Dieu
(Extrait du plan de référence V1 décembre 2011)

Enjeux dispositifs de rafraîchissement urbain

Les résultats observés seront : le confort extérieur

La forme de cet espace est assez reproductible sur d'autres espaces similaires (place ouverte).

Possibilités d'aménagement:

- Humidification
- Végétation
- Albédo



Maille d'environ 300m x 300m
Figure 54 : Zoom sur la place de Francfort (Google Maps ©)



Figure 55 : Vue 3D de la place de Francfort (Google Earth©)

Enquête terrain

Une enquête de terrain, avec prises de vues a été réalisée en 2013.

Le trajet commence par l'avenue Thiers qui se prolonge en rue de la Villette. Continue devant l'entrée de la gare Part-Dieu puis fait un tour « intérieur » de la place de Frankfort dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (le parcours rouge).

Il y a ensuite un tour « extérieur » de la place avec observations à l'intérieur des cours et des ilots centraux (le parcours orange).

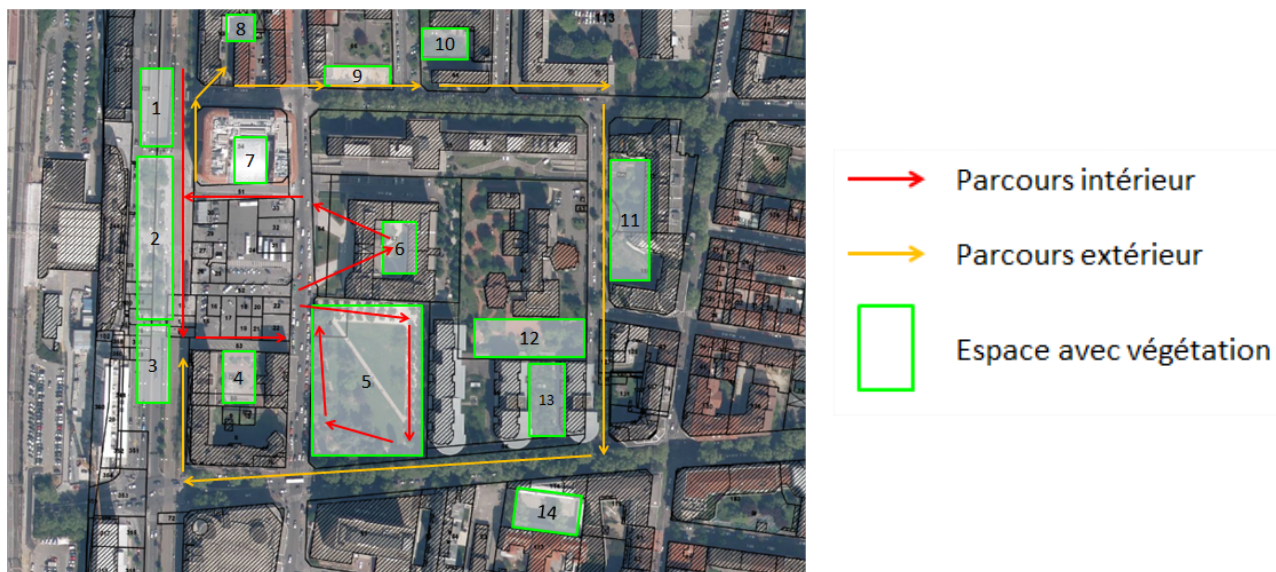


Figure 56 : Description du site et du parcours de l'enquête terrain (Google Maps ©)

Photos du site

Environ 250 photos ont été prises et décrites sur le site. Les commentaires sont compilés dans un fichier Excel.



Figure 57 : Exemples de photos du site

Barres rue Moncey

Caractéristiques :

Il s'agit de deux immeubles de logements parallèles construits en 1963-65. Ils mesurent environ 135m de long sur 53m de haut. A noter que ces immeubles possèdent le label «patrimoine du XXème siècle».



Figure 58 : Photos des barres rue Moncey (Google Maps © & skyscrapercity.com)

Ces deux copropriétés sont intéressantes pour une étude de l'habitat dense (pas forcément social). Par ailleurs, le Grand Lyon a cherché à végétaliser ces lieux, mais n'est pas parvenu à convaincre, faute d'arguments « chiffrés ». L'étude EVA pourrait être l'occasion de remédier à ce problème.

Le site est aussi intéressant à cause du développement sauvage des climatisations aux fenêtres.

Il n'y a pas d'aménagement à venir à priori.

Enjeux dispositifs de rafraîchissement urbain

Possibilités d'aménagement:

- Végétaliser la toiture des halles
- Perméabiliser le sol de la place
- Aménagement d'un parc

Bien que la forme de cet espace soit assez particulière, elle permettra d'imaginer les résultats possibles sur d'autres grands ensembles construits à cette époque et qui font souvent l'objet de projet de réaménagement.

Les résultats observés seront :

- consommation énergétique des bâtiments
- confort extérieur
- confort intérieur



Maille d'environ 300m x 300m



Figure 59 : Zoom sur les barres rue Moncey (Google Maps ©)

Enquête terrain

En résumé, l'enquête terrain a permis d'apporter quelques informations :

- La barre EST (en jaune) n'est composée que de locataires
- La barre Ouest (en rouge) est composée de propriétaire
- La zone hachurée est actuellement en travaux
- Bâtiments non rénovés thermiquement, simple vitrage

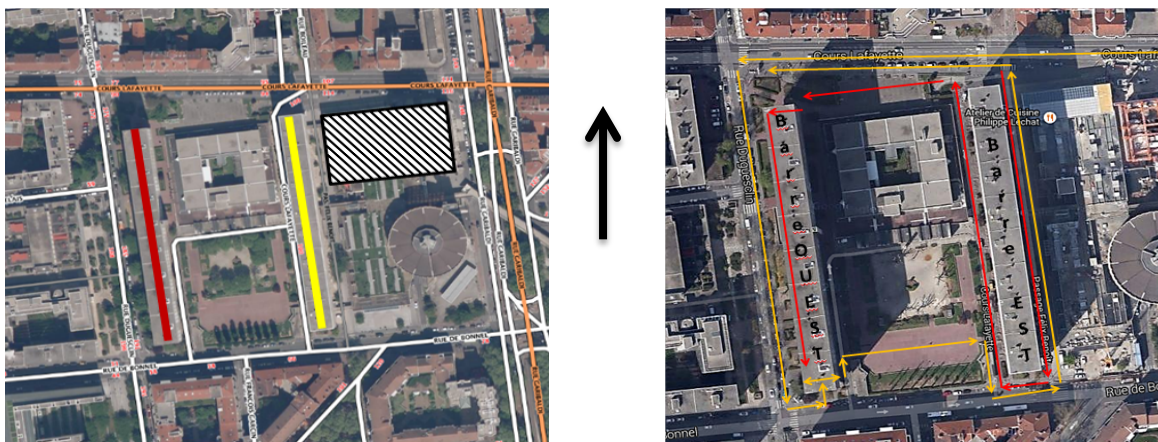


Figure 60 Distinction des barres et descriptif du parcours (Google Maps ©)

Photos du site

Environ 100 photos ont été prises et décrites sur le site. Les commentaires sont compilés dans un fichier Excel.



Figure 61 Exemples de photos des barres rue Moncey

Synthèse de l'approche de gestion des données nécessaires à la simulation

Chacun des logiciels de modélisation nécessitent un ensemble de données, listées ci-dessous :

Solene Microclimat

- Fichier météo
- Géométrie de la zone
- Matériaux
- Energie/bâtiment
- Végétation (précise : type, localisation surface occupée)
- Eau (bassins, rivières)

ARPS

- Fichiers météo
- Caractéristiques morphologiques moyennes sur des mailles de 200mx200m
- Surfaces végétales
- Ancienneté des quartiers (isolation)
- Matériaux types des quartiers

EnviBatE

- Idem Solene Microclimat

Période d'étude

La temporalité de l'étude sera variable suivant les logiciels (pas de temps et durée différente) mais sera aussi l'une des variantes des modèles (période « actuelle » et période « future »).

Période de l'année : pour les évaluations énergétiques (Solene-Energie), toute la période où le rafraîchissement peut être nécessaire sera simulée : avril-septembre. Pour les évaluations relatives au confort extérieur (Solene Microclimat), seule une semaine chaude sera simulée.

Epoque d'étude : chaque scénario d'aménagement sera simulé sur deux époques. Une « actuelle » (année de référence : 2013) et une « future » pour simuler les modifications apportées par le changement climatique.

Sources

Afin d'obtenir ces données, plusieurs sources seront utilisées. Elles sont énumérées ci-dessous :

- Fichiers météo : station aéroport à proximité, prise sur MeteoNorm pour l'année 2013. Pour le scénario futur, les données correspondront aux paramètres régionaux du modèle A2 et les données seront récupérées auprès de la DRIAS.
- Caractéristiques morphologiques/géométrie : BD Topo (construite par l'IGN)
- Matériaux : Etude terrain (voir les paragraphes suivants).
- Végétation : Smart Data Grand Lyon + Etude terrain + données fournies par les services Grand Lyon
- Eau : Bd Topo (pour les fleuves et rivières) + Etude terrain (fontaines, jeu d'eau, ...).

Les 3 quartiers d'étude ont été modélisés et documentés (sur la base, entre autres, des travaux d'Elsa Barel) pour répondre aux besoins des simulations numériques. Ainsi chaque bâtiment de chaque quartier s'est vu affecter :

- une valeur d'albédo pour le toit,
- une valeur d'albédo pour les façades,
- un pourcentage de vitrage,
- un degré d'isolation,
- un type de bâtiment.

Les empreintes des bâtiments sont issues de la BDTopo. Une table shp a été renseignée dans OrbiGis pour affecter ces valeurs sous forme d'attributs pour chaque bâtiment. Afin de faciliter les discussions, les bâtiments ont été numérotés pour chaque quartier. Jointe à cette numérotation, l'élévation de chaque bâtiment est également fournie.

Les valeurs sont données par classes

Albédo des toits (Figure 62) :

- 1 : faible (noir, couleurs sombres) ~ 0.15
- 2 : moyen (orange, gris) ~ 0.4
- 3 : fort (blanc, couleurs claires) ~ 0.8

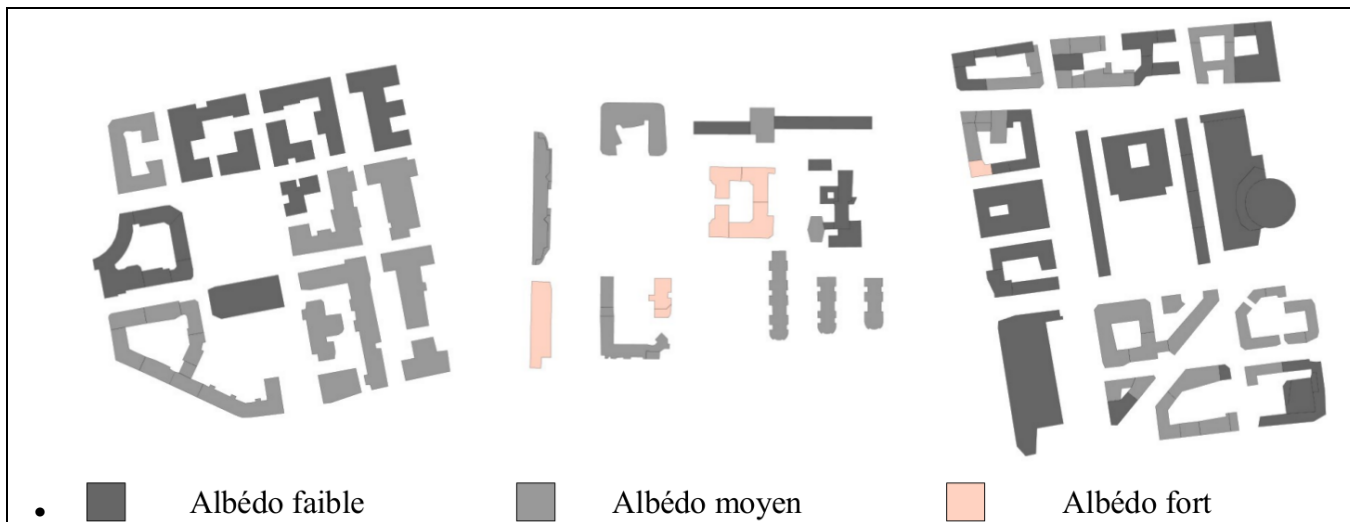


Figure 62 : Albédo des toits pour les quartiers Buire, place de Francfort et Barres Moncey (dans l'ordre)

Albédo des façades (Figure 63) :

- 1 : faible (noir, couleurs sombres) ~ 0.15
- 2 : moyen (orange, gris) ~ 0.4
- 3 : fort (blanc, couleurs claires) ~ 0.8

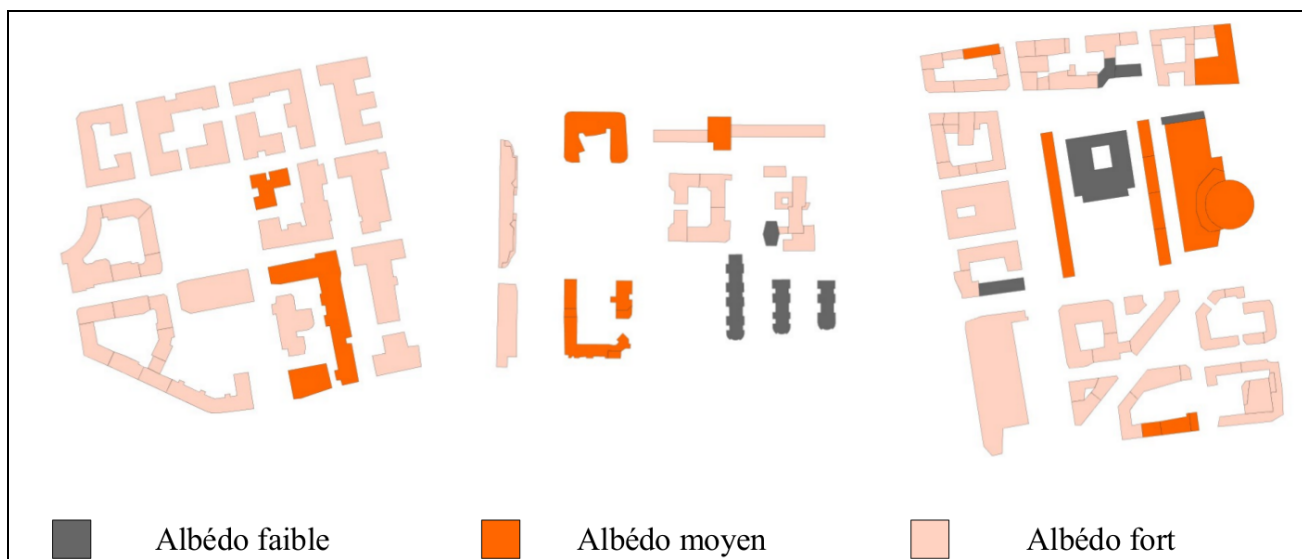


Figure 63 : Albédo des façades pour les quartiers Buire, place de Francfort et Barres Moncey (dans l'ordre)

Pourcentage de vitrage (Figure 64) :

- 1 : faible : 10-40 % → valeur utilisée ~ 25%
- 2 : moyen : 40-70 % → valeur utilisée ~ 50%
- 3 : fort : 70-100 % → valeur utilisée ~ 80%

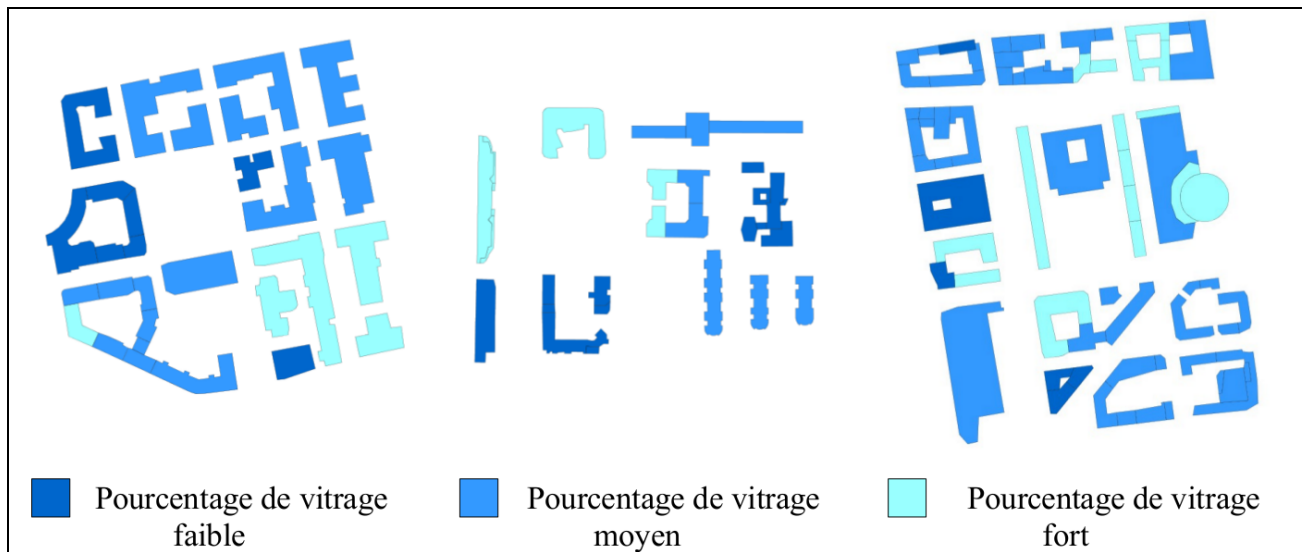


Figure 64 : Pourcentage de vitrage des bâtiments pour les quartiers Buire, place de Francfort et Barres Moncey (dans l'ordre)

Isolation (Figure 65) :

- 1 : pas d'isolation → composition de l'enveloppe ~ 20cm béton
- 2 : isolation moyenne → composition de l'enveloppe ~ 20cm béton + 5cm isolant
- 3 : isolation forte → composition de l'enveloppe ~ 20cm béton + 15cm isolant

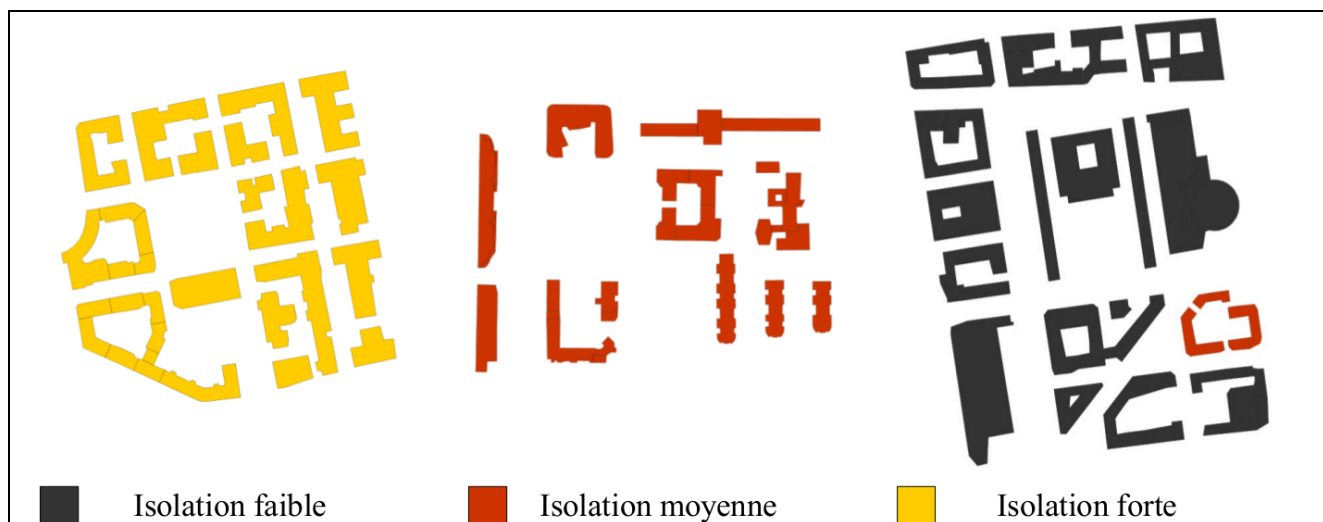


Figure 65 : Types d'isolation des bâtiments pour les quartiers Buire, place de Francfort et Barres Moncey (dans l'ordre)

Types de bâtiment :

- Habitation
- Bureau
- Ecole
- Hôtel
- Parking
- Commerce
- Gare

Récapitulatif des scénarios

Numéro d'étude	Quartier	Scénario	Climat
A-1-a	Buire	Etat actuel	2013 MeteoNorm
A-1-b			2050 Scénario GIEC A2
A-2		Mono dispositif : eau	2013 MeteoNorm
A-3		Mono dispositif : végétation	2013 MeteoNorm
A-4		Mono dispositif : albédo	2013 MeteoNorm
A-5-a		Optimisé	2013 MeteoNorm
A-5-b			Scénario GIEC A2
A-6		Soustraction : Optimisé –végétation	2013 MeteoNorm
A-7		Soustraction : Optimisé - albédo	2013 MeteoNorm
A-8		Soustraction : Optimisé - Eau	2013 MeteoNorm
B-1-a		Francfort	Etat actuel
B-1-b	Scénario GIEC A2		
B-2	Mono dispositif : eau		2013 MeteoNorm
B-3	Mono dispositif : végétation		2013 MeteoNorm
B-4	Mono dispositif : albédo		2013 MeteoNorm
B-5-a	Optimisé		2013 MeteoNorm
B-5-b			Scénario GIEC A2
B-6	Soustraction : Optimisé -végétation		2013 MeteoNorm
B-7	Soustraction : Optimisé - albédo		2013 MeteoNorm
B-8	Soustraction : Optimisé - Eau		2013 MeteoNorm
C-1-a	Moncey	Etat actuel	2013 MeteoNorm
C-1-b			Scénario GIEC A2
C-2		Mono dispositif : eau	2013 MeteoNorm
C-3		Mono dispositif : végétation	2013 MeteoNorm
C-4		Mono dispositif : albédo	2013 MeteoNorm
C-5-a		Optimisé	2013 MeteoNorm
C-5-b			Scénario GIEC A2
C-6		Soustraction : Optimisé -végétation	2013 MeteoNorm
C-7		Soustraction : Optimisé - albédo	2013 MeteoNorm
C-8		Soustraction : Optimisé - Eau	2013 MeteoNorm

3.5. Préparation des simulations avec ARPS-VUC

Pour les simulations à l'échelle de la zone urbaine englobant les quartiers d'étude, le domaine d'étude privilégié est le domaine B (en jaune sur la Figure 66). Les conditions météorologiques qui doivent être simulées ont été définies en fin d'année 2014. Nous ne sommes plus ici en conditions météorologiques stationnaires et en canopée homogène mais en situation réelle, ce qui nous impose de réaliser un emboîtement d'échelles et de définir les paramètres de surface dépendant de la morphologie urbaine. Le plus grand domaine A (en Rose sur la Figure 66) doit servir à prescrire les conditions aux limites du domaine B.

Les caractéristiques des domaines et de leur maillage sont données dans le Tableau 16.

Domaine	A	B
Nombre de mailles	47 x 51 x 59	143 x 143 x 59
Taille du domaine	4400m x 4800m	2800 m x 2800 m
Résolution horizontale	100m x 100m	20m x 20m
Résolution verticale	$z \leq 28 \text{ m} - \Delta z = 2 \text{ m}$ $z > 32 \text{ m} - \Delta z_{\text{mean}} \approx 40 \text{ m}$	$z \leq 28 \text{ m} - \Delta z = 2 \text{ m}$ $z > 32 \text{ m} - \Delta z_{\text{mean}} \approx 40 \text{ m}$

Tableau 16 : Caractéristiques des domaines

La stratégie adoptée a été d'utiliser le modèle ARPS avec une approche « rugosité » bien adaptée à la basse résolution spatiale, avec des longueurs de rugosité définies dans chaque maille de 100m x 100m en fonction de la hauteur moyenne des bâtiments et de passer à l'approche canopée pour les simulations sur le domaine B.

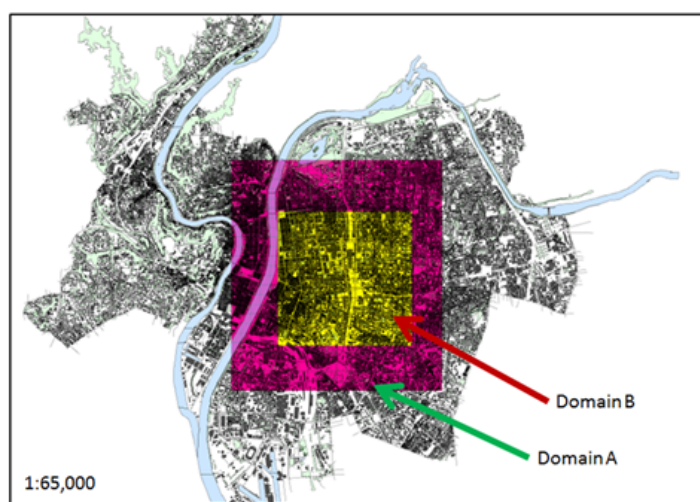


Figure 66 : Domaines d'étude avec ARPS

L'état des lieux du recueil de données et représenté dans le tableau de la Figure 67 .

Paramètre	bâti	Vég	Sol (art/nat)	état de préparation	
				Domaine A	Domaine B
Densité (et type) d'occupation du sol [-]	✓	✓	✓	✓	Densité ✓ Sol : en cours
Hauteur moyenne [m]	✓	✓		✓	Bâti ✓ Vég : en cours
Hauteur max [m]	✓	✓		-	Bâti ✓ Vég : en cours
Densité volumique des surfaces horizontales (a_h) [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$]	✓	✓		-	Bâti : en cours Vég : en cours
Densité frontale volumique (a_f) [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$]	✓	✓		-	Bâti : en cours Vég : en cours
Densité volumique des surfaces de mur (a_v) [$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$]	✓			-	Bâti : en cours Vég : en cours
Coefficient de traînée par section (C_d) [-]	✓	✓		-	Bâti : en cours Vég : en cours
Longueur de rugosité aérodynamique [m]	✓	✓	✓	✓	-

Figure 67 : Etat des lieux du recueil des données pour ARPS

Les caractéristiques morphologiques nécessaires aux simulations sur le domaine A ont été complètement déterminées suivant les grilles des deux domaines et sur des mailles de 200m x 200m. Elles sont représentées dans les Figure 68 à Figure 71 . Les données complémentaires permettant de réaliser les simulations sur le domaine B avec l'approche canopée n'ont pas pu être complétées avant la fin du post-doctorat de R. Tavares. Le travail est donc incomplet à ce jour mais nous prévoyons de reprendre, finaliser et valoriser le travail en dehors du projet EVA dès que des personnels seront disponibles.

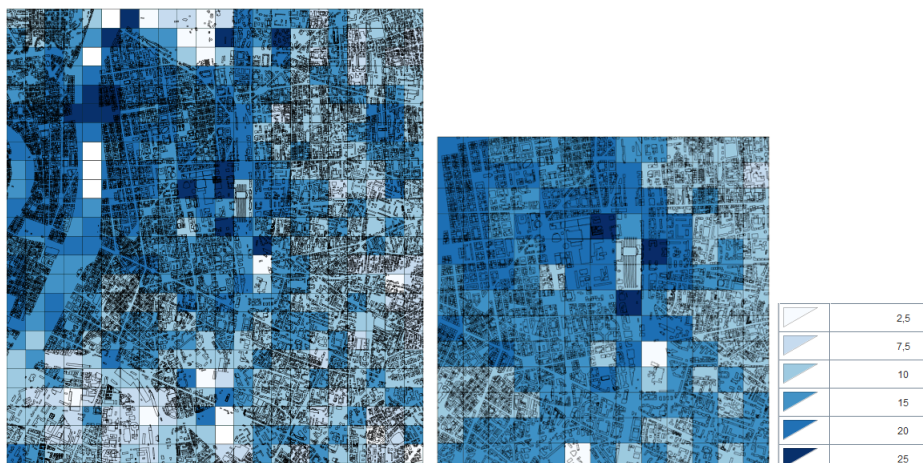


Figure 68 : Hauteur moyenne du bâti (m), pour les domaines A (gauche) et B (droite)



Figure 69 : Hauteur maximale du bâti (m), pour les domaines A (gauche) et B (droite)

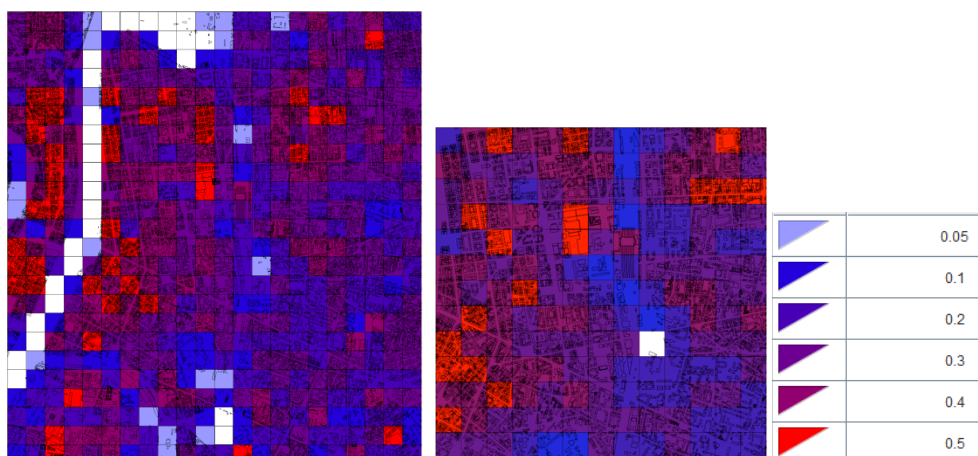


Figure 70 : Densité surfacique du bâti, pour les domaines A (gauche) et B (droite)

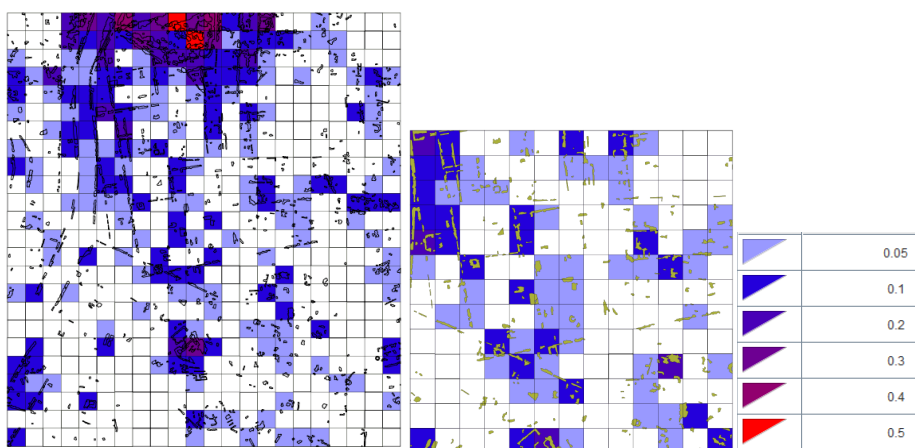


Figure 71 : Densité surfacique de surface de végétation, pour les domaines A (gauche) et B (droite)

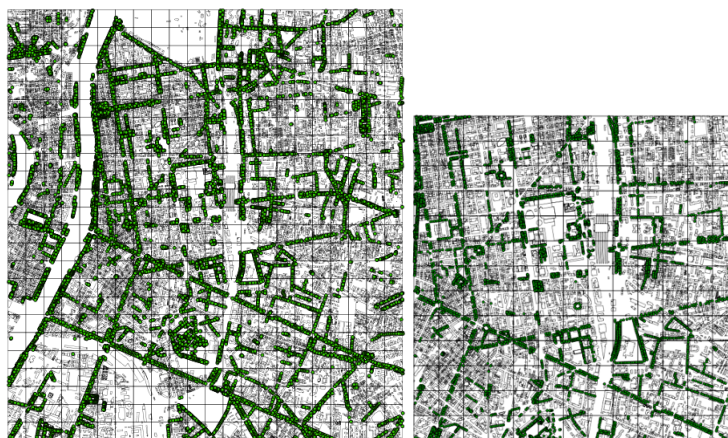


Figure 72 : Distribution des arbres dans les domaines A (gauche) et B (droite)

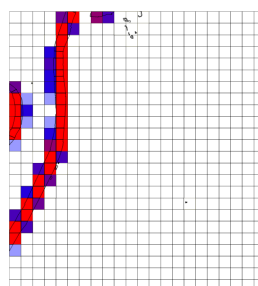


Figure 73 : Surfaces d'eau dans le domaine A

3.6. Préparation des données climatiques

Climat actuel

Selon les types de simulation, les séquences climatiques prises en compte seront différentes. Pour les questions de confort extérieur, des journées type suffisent. Pour l'évaluation de l'impact des aménagements sur les consommations énergétiques, il faut prendre des périodes saisonnières. Pour réaliser les différentes simulations du projet, les données météorologiques utilisées sont celles issues de l'aéroport de Bron d'Avril 2013 à Septembre 2013.

Pour les simulations avec ARPS-VUC, seules des périodes courtes peuvent être simulées. Il s'agit donc de sélectionner, dans les données 2013, une période de 48 h illustrative de conditions 'extrêmes' d'été. Une analyse des données 2013 de la station météorologique Lyon-Bron a donc été conduite par R. Tavares. Les évolutions temporelles des températures

mensuelles (moyenne, maximum, minimum and normales saisonnières) sont données dans la Figure 74 .

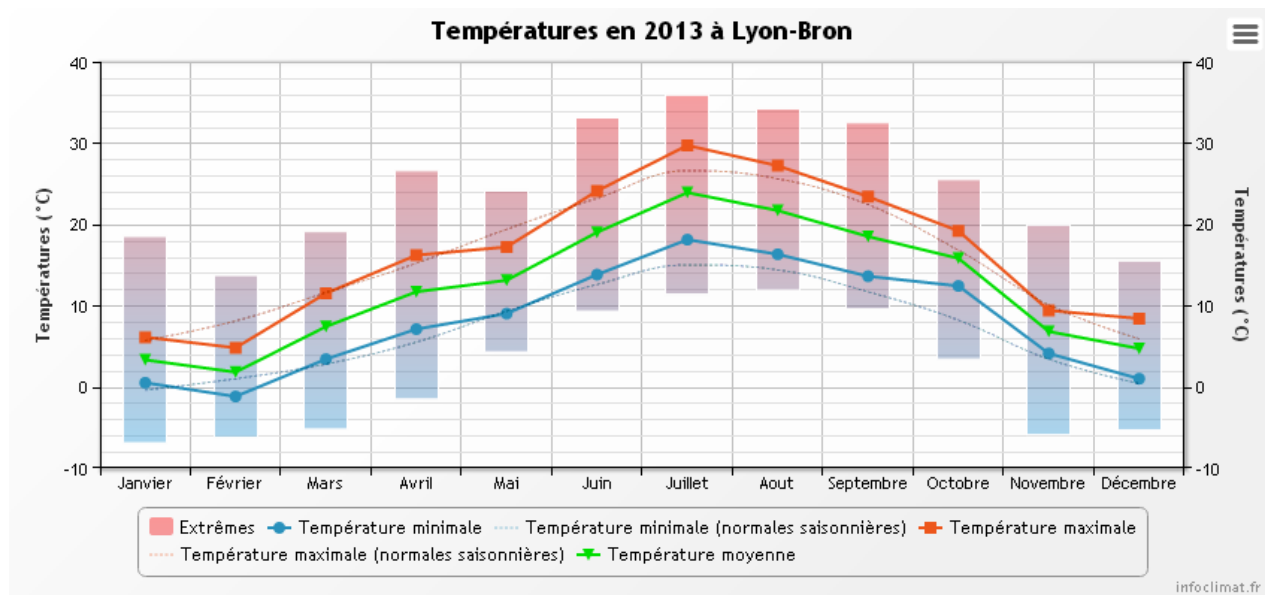


Figure 74 : Evolution mensuelle des températures moyenne, maximales, minimales en 2013, station Météo France de Lyon Bron- - (source : <http://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2013/lyon-bron/valeurs/07480.html>)

Le mois le plus chaud en 2013 a été le mois de juillet, les mois les plus froids, janvier et décembre. Un focus a donc été fait sur juillet afin de sélectionner des journées pour les simulations. Cette sélection concorde avec la période de canicule relevée par Météo France dans la deuxième moitié du mois de juillet (Figure 75).

A partir de l'analyse de cette période, il est possible d'identifier deux principales périodes avec des écarts importants par rapport à la période 2000-2012, celles des 7-11 et 19-27 juillet 2013. La seconde période est comprise dans la période caniculaire référencée par Météo France et inclut les températures les plus élevées. La sélection des 48h de simulation est donc ciblée entre le 19 et le 27 juillet 2013. Les évolutions temporelles des précipitations (Figure 76) de la vitesse et de la direction du vent (Figure 77), sont aussi prises en compte.

En considérant les limitations de ARPS-VUC et les objectifs d'EVA, la sélection d'une période de simulation de 48 h doit aussi prendre en considération les conditions suivantes :

- Pas de précipitation,
- Des vitesses de vent supérieures à 1 m.s-1.

En prenant en compte les précipitations, il apparaît que les 22, 23 and 24 juillet ne représentent pas des jours *idéaux*. Par ailleurs, la valeur pic de vitesse de vent est relevée le 27 juillet, de sorte que cette journée, représente une journée où le phénomène d'ICU sera peu présent du fait du vent. En conséquence, l'analyse a été limitée aux intervalles suivants :

- Période A - 19 – 21 juillet,
- Période B – 25 – 26 juillet.

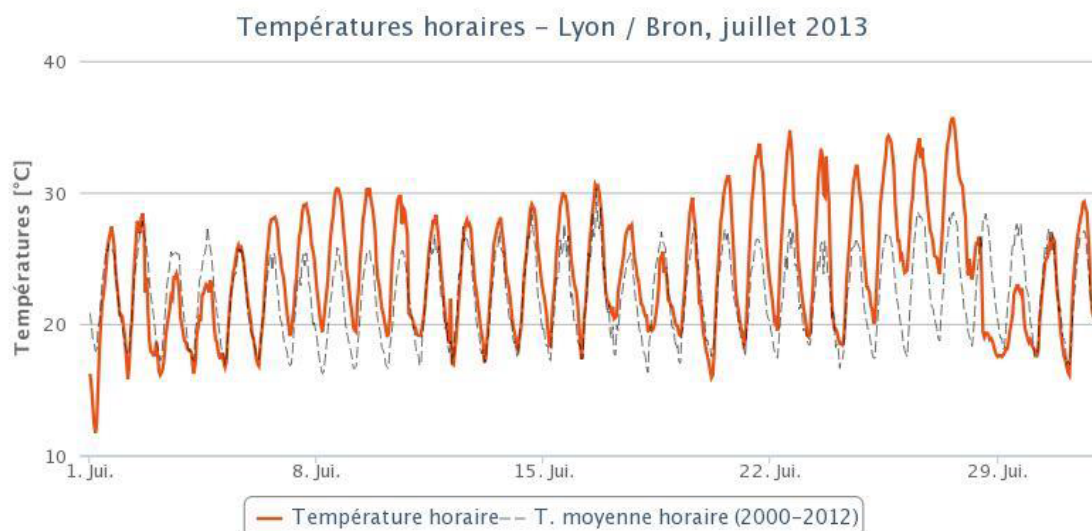


Figure 75 : Evolution horaires des températures en juillet 2013 (orange) en regard des moyennes relevées entre 2000 et 2012, station Météo France de Lyon Bron (source : <http://www.infoclimat.fr/climatologie-mensuelle/07480/juillet/2013/lyon-bron.html>)

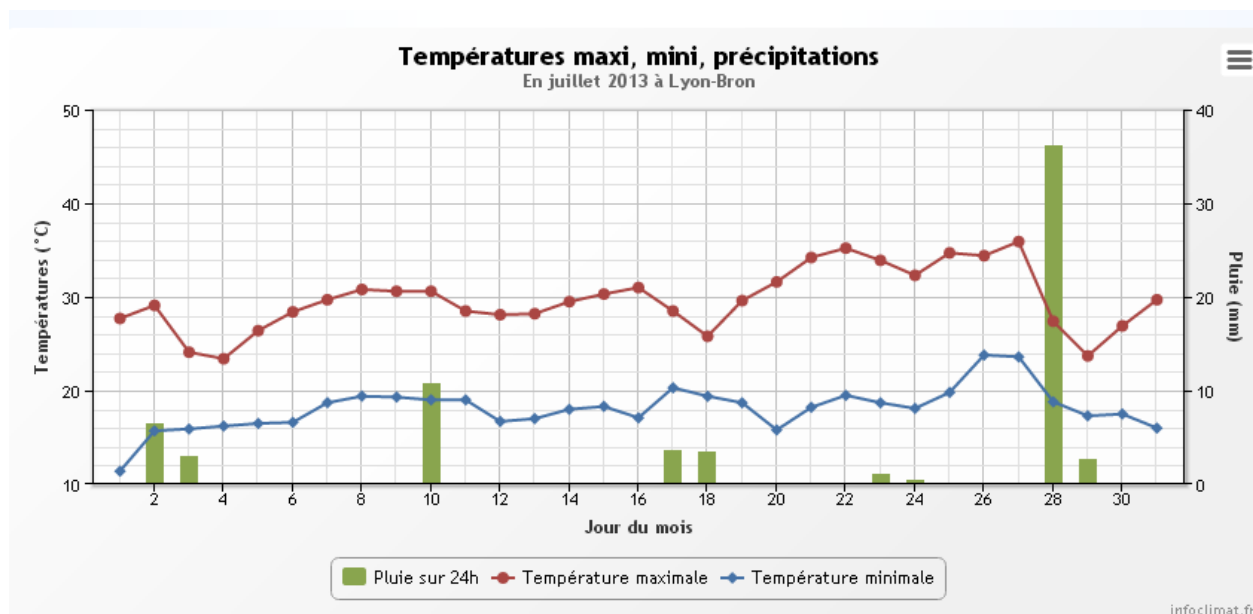


Figure 76 : Evolution journalière des précipitations, températures maximales et minimales, en juillet 2013, station Météo France de Lyon Bron (source : <http://www.prevision-meteo.ch/climat/journalier/lyon-bron/2014-07>)

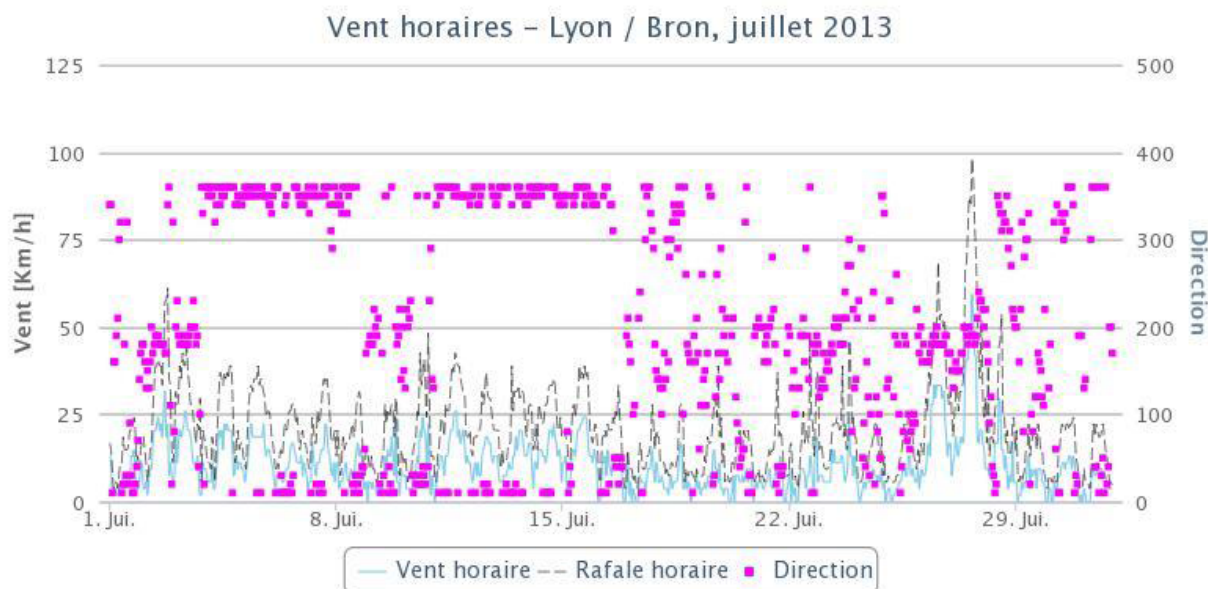


Figure 77 : Evolution horaire des vitesses moyennes (solide bleu) maximales (tiret noir) et direction (rose) du vent mesurées à Lyon Bron en juillet 2013. (source : <http://www.prevision-meteo.ch/climat/journalier/lyon-bron/2014-07>)

Une analyse détaillée des deux sous-périodes a été réalisée et illustrée sous la forme de la représentation graphique de l'évolution temporelle de la moyenne horaire : des variables suivantes :

- Température de l'air (Figure 78)
- Vitesse et direction du vent (Figure 79)
- La Pression atmosphérique (Figure 80)
- Le Rayonnement solaire global entrant (Figure 81)
- Humidité - absolue (Figure 82), relative (Figure 83) et spécifique (Figure 84).

Prenant en considération nos principaux objectifs et limitations, les paramètres météorologiques les plus critiques dans l'analyse sont la température de l'air, la vitesse et la direction du vent L'analyse des autres paramètres permet de compléter l'évaluation des conditions météorologiques dominantes.

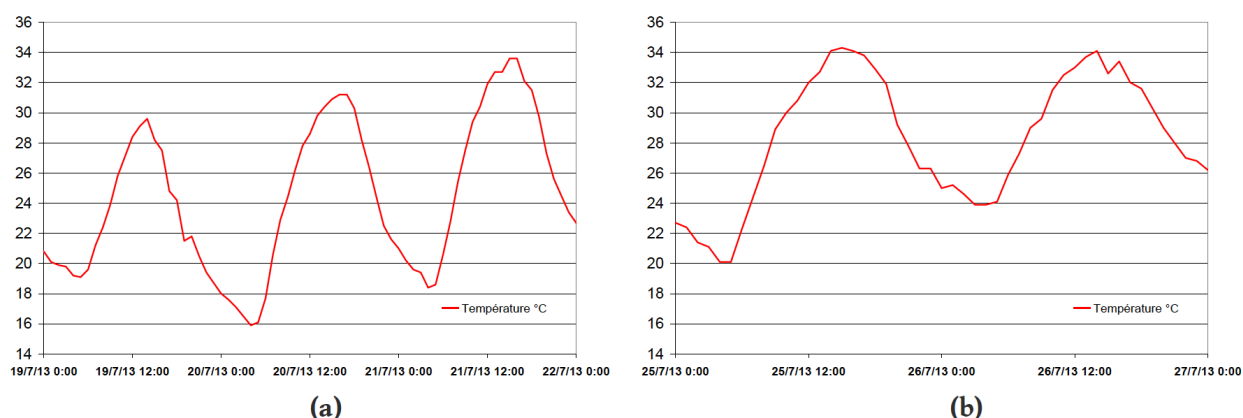


Figure 78 : Evolution temporelle de la température moyenne horaire [° C] entre (a) le 19 et le 21juillet et (b) le 25 et le 26 Juillet 2013, Lyon - Bron station Météo-France .

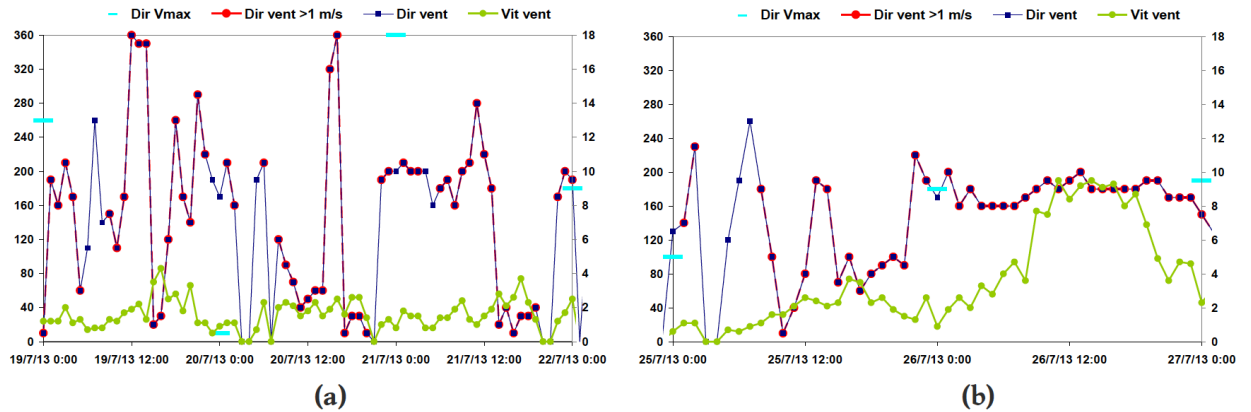


Figure 79 : Evolution temporelle vitesse moyenne du vent [$m.s^{-1}$] et de sa direction [$^{\circ}$] entre (a) le 19 et le 21 juillet et (b) le 25 et le 26 juillet 2013, Lyon - Bron station Météo-France .

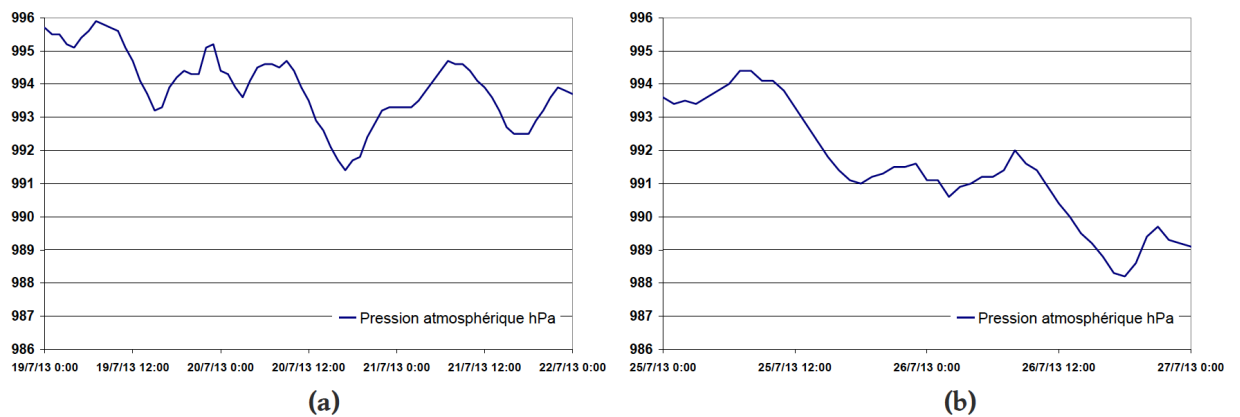


Figure 80 : Evolution temporelle de la pression atmosphérique moyenne [hPa] entre (a) le 19 et le 21 juillet et (b) le 25 et le 26 juillet 2013, Lyon - Bron station Météo-France .

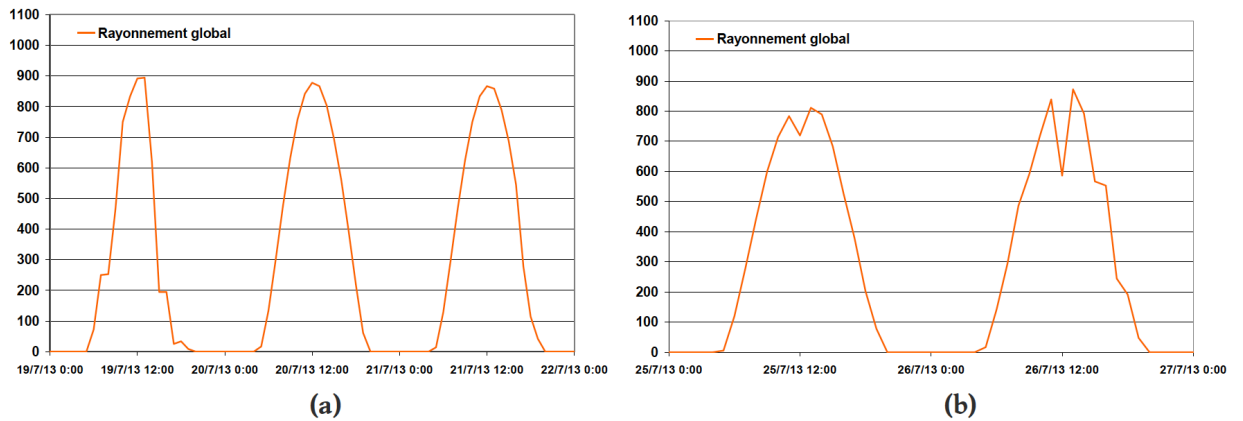


Figure 81 : Evolution temporelle du rayonnement global [$W.m^{-2}$] entre (a) le 19 et le 21 juillet et (b) le 25 et le 26 juillet 2013, Lyon - Bron station Météo-France .

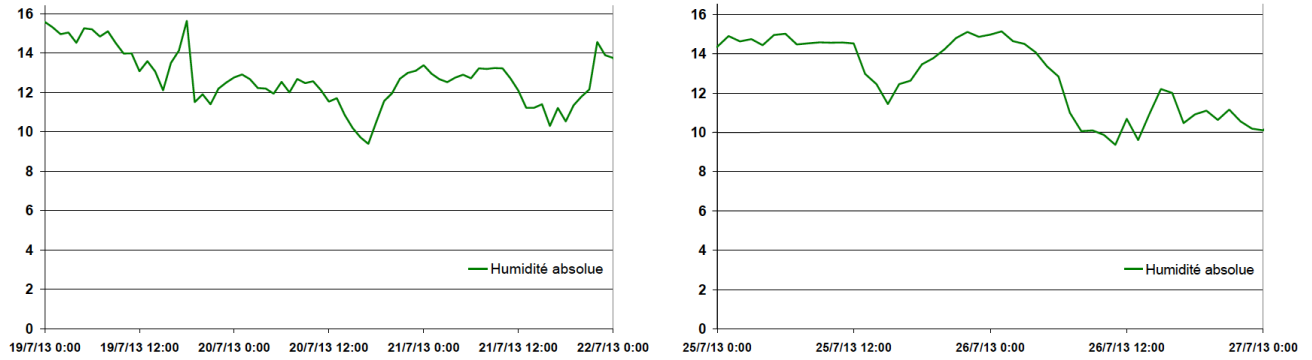


Figure 82 : Evolution temporelle de l'humidité absolue [g.m⁻³] entre (a) le 19 et le 21 juillet et (b) le 25 et le 26 Juillet 2013, Lyon - Bron station Météo-France .

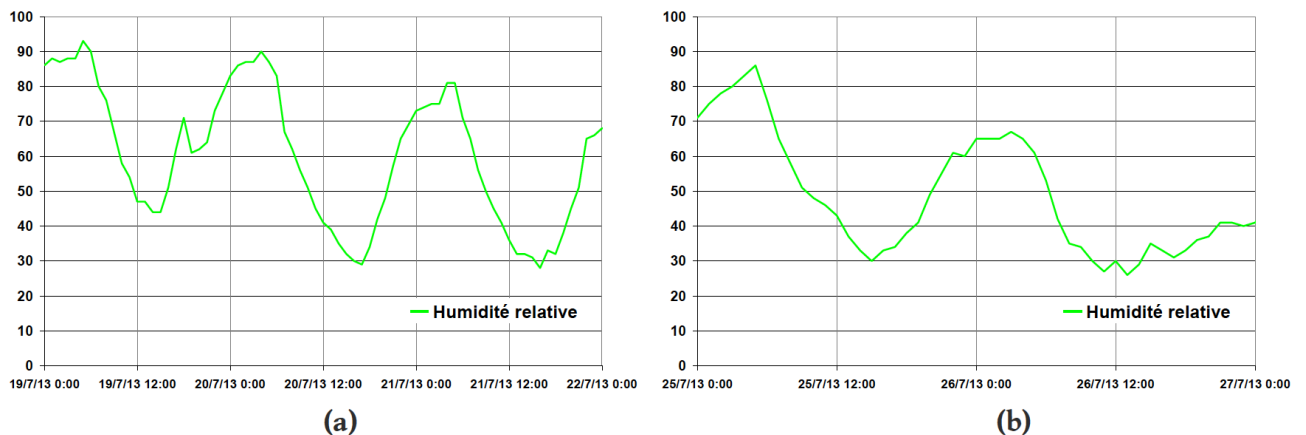


Figure 83 : Evolution temporelle de l'humidité relative [%] entre (a) le 19 et le 21 juillet et (b) le 25 et le 26 Juillet 2013, Lyon - Bron station Météo-France .

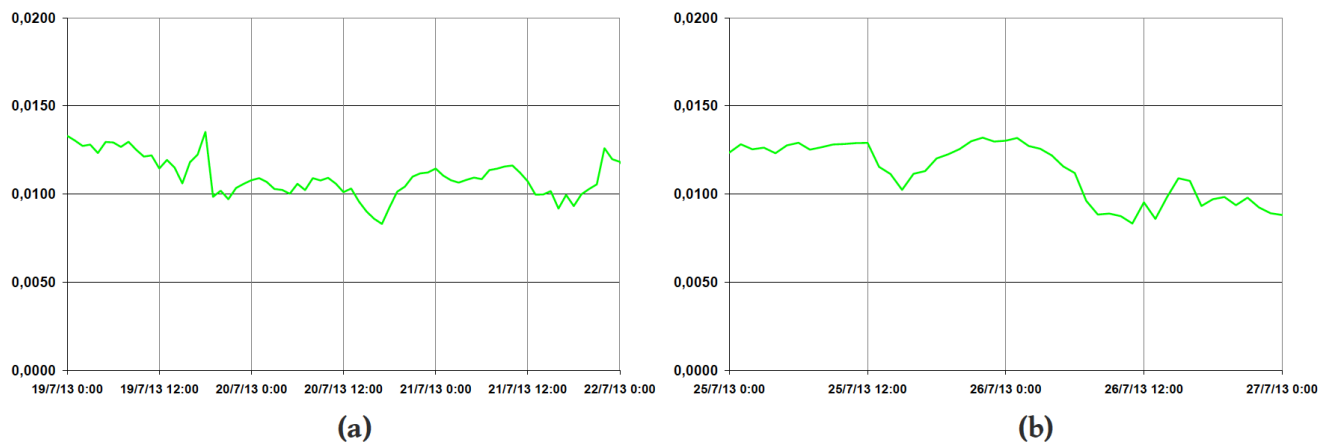


Figure 84 : Evolution temporelle de l'humidité spécifique [kg.kg⁻¹] entre (a) le 19 et le 21 juillet et (b) le 25 et le 26 Juillet 2013, Lyon - Bron station Météo-France .

En se basant sur l'analyse détaillée des figures précédentes, la période de 48 h entre les 25 et 26 Juillet 2013 (période B) a été choisie pour les simulations prévues avec le modèle ARPS - VUC . Les valeurs les plus élevées de la température de l'air sont enregistrées les 25 et 26 Juillet (34°C). ° C (période B) . En outre, la plus grande plage de vitesse du vent observée dans la période B, qui permet ainsi d'évaluer un ensemble plus large de conditions météorologiques que la période A, dans laquelle la vitesse du vent ne dépasse pas 4m.s⁻¹ et la direction du vent varie fortement.

En accord avec l'analyse réalisée par R. Tavares, la période de simulation choisie pour Solene- microclimat inclut les journées du 25 et 26 Juillet 2013 avec ARPS – VU.

Pour simuler les besoins énergétiques des bâtiments à l'aide d'EnviBatE, les données météorologiques du 1^{er} Mai 2013 au 30 Septembre 2013 sont utilisées. Toutes les variables calculées étant initialisées pour commencer les simulations, les données du 1^{er} au 30 Avril 2013 servent de période d'initialisation. Du 1^{er} mai au 30 septembre, le nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C caractérisant cette période est de 1515.7 et le rayonnement solaire est de 676 kWh/m². La température maximale atteinte est de 35.6 °C le 27 Juillet à 14h (heure solaire).

Climat futur

Pour réaliser des séquences climatiques correspondant au climat futur, le générateur de climat futur « CCWorldWeatherGen » a été utilisé. Cet outil a été développé par Jentsch à l'université de Southampton (Jentsch et al., 2013) pour créer à partir de normales climatiques horaires des données météorologiques futures pour les années 2020, 2050 et 2080 avec un pas de temps horaire. Pour créer ce fichier de données, l'outil se base sur les résultats de changement climatique avec le scénario A2 défini par le GIEC (IPCC, 2007). Cet outil permet notamment de calculer des températures, le rayonnement solaire, l'humidité et la pression atmosphérique.

Les données calculées pour l'année 2050 seront donc utilisées pour réaliser les simulations avec EnviBatE et Solene-microclimat. Il est à noter que les modèles utilisés dans l'outil ne calculent pas de nouvelles vitesses d'air. Pour l'ensemble des simulations 2013 et 2050 les mêmes conditions de vent seront donc utilisées.

L'évolution des températures au pas de temps horaire pour les années 2013 et 2050 est présentée sur la Figure 85 . Le nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C est alors de 3047 soit une augmentation de 101% par rapport à l'année 2013. La température maximale atteinte est de 39.8°C le 19 Aout à 15h (heure solaire). Au niveau de l'ensoleillement, l'irradiation solaire est de 729 kWh/m² soit une augmentation de 8% par rapport à 2013.

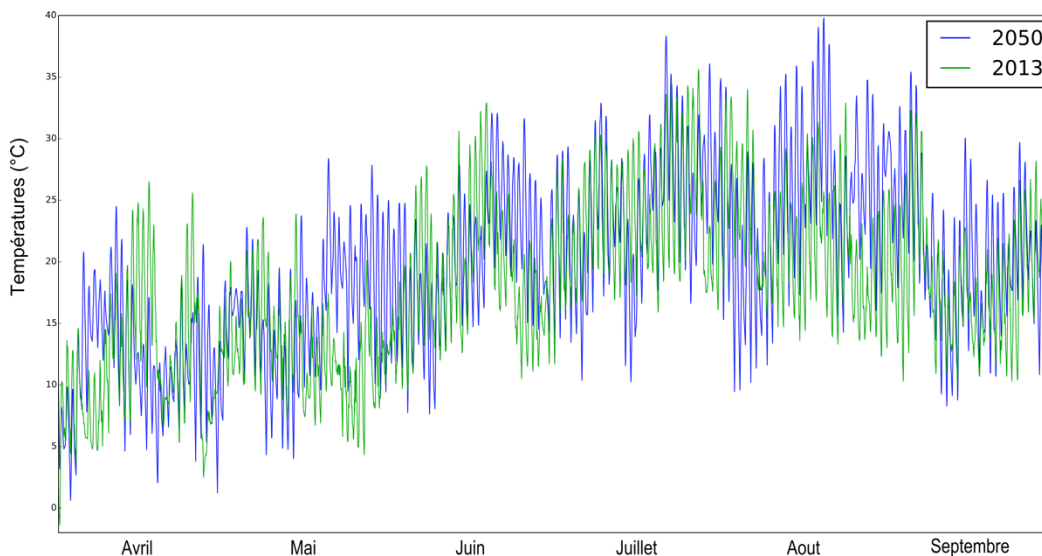


Figure 85 : Evolution temporelle de la température moyenne horaire [° C] entre le 1 Avril et le 30 Septembre 2013 et 2050, Lyon

3.7. Scénarios monodispositifs

Principes et application aux quartiers

Voici les scénarios proposés pour chacun des dispositifs de rafraîchissement et qui seront appliqués pour les simulations des cas mono-dispositifs.

Dispositif « Eau » :

Le dispositif d'humidification des surfaces est appliqué à l'ensemble des rues pour chacun des quartiers. De plus, pour les quartiers de la place Francfort et barres Moncey, la place centrale serait également humidifiée.

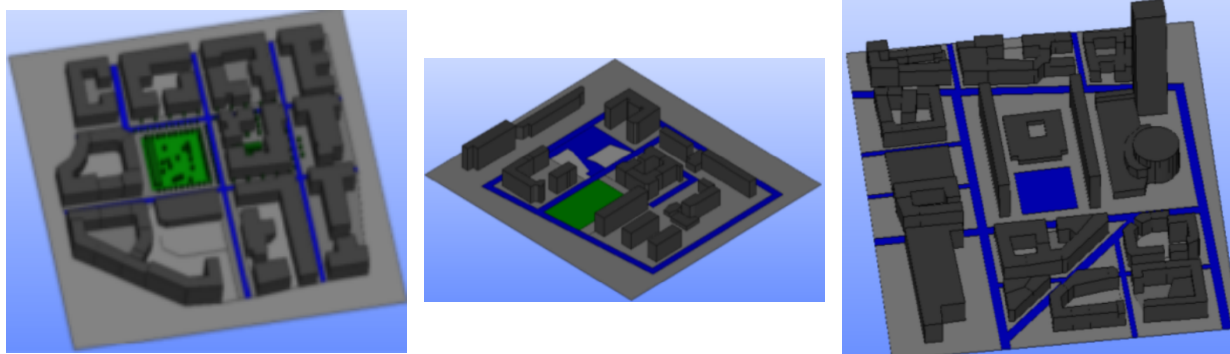


Figure 86 : Application de l'humidification pour les quartiers Buire, place de Francfort et Barres Moncey (dans l'ordre). L'humidification se fait sur toutes les rues et la place de Francfort.

Dispositif « Albédo » :

L'augmentation de l'albédo est fixe pour les chaussées : de 0,15 comme valeur d'albédo de base, l'albédo passe à une valeur de 0,35 (d'une valeur faible à une valeur moyenne).

Pour les toits et les façades, les surfaces passent d'une catégorie à l'autre. Ainsi les surfaces à faible albédo deviennent des surfaces à albédo moyen, les surfaces à albédo moyen deviennent des surfaces à fort albédo. Les surfaces à fort albédo restent ainsi.

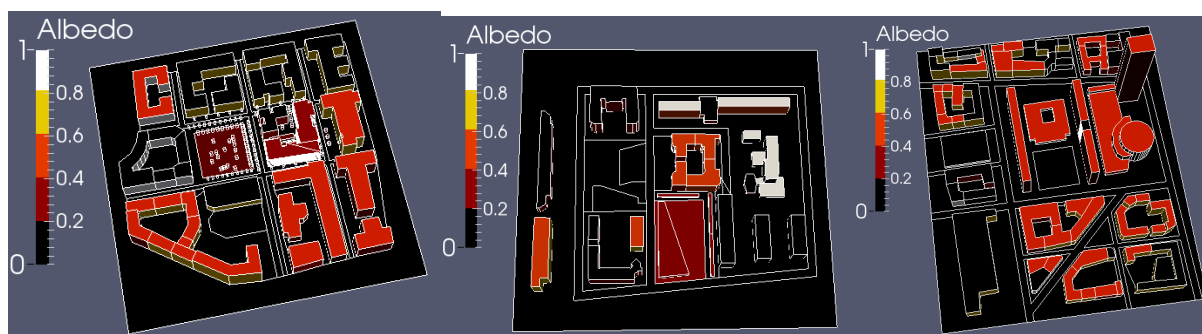


Figure 87 : Application de la modification d'albédo des façades pour les quartiers Buire, place de Francfort et Barres Moncey (dans l'ordre). L'humidification se fait sur toutes les rues et la place de Francfort.

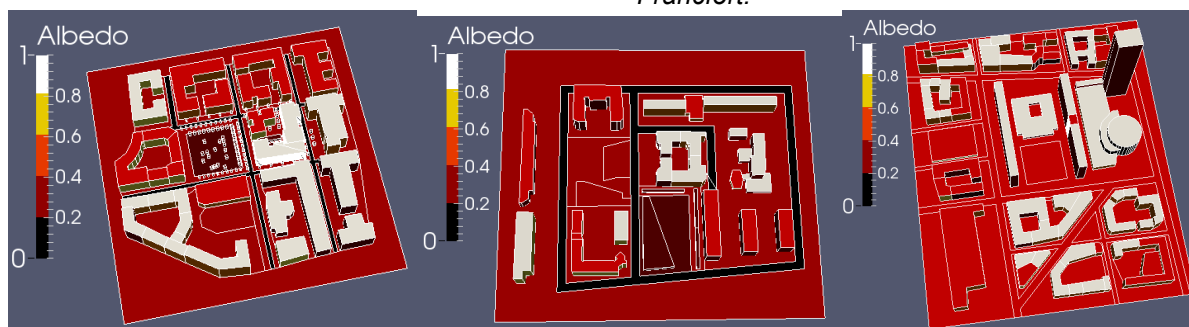


Figure 88 : Application de la modification d'albédo des toits pour les quartiers Buire, place de Francfort et Barres Moncey (dans l'ordre). L'humidification se fait sur toutes les rues et la place de Francfort.

Dispositif « Végétal » :

Les choix de scénarios pour le dispositif végétal sont plus complexes que pour les autres dispositifs. Les propositions sont donc ici décrites quartier par quartier. Nous présentons également la délimitation des quartiers ainsi que les géométries réalisées qui serviront aux simulations numériques.

La question de la végétalisation a entraîné une discussion importante dans le consortium sur les cas de référence.

En effet, les cas mono-dispositifs vont représenter des cas extrêmes. Ceci convient bien aux chercheurs qui vont pour « voir » des choses, mais pour l'équipe Veolia, il était important de ne pas comparer ces résultats à des cas de référence nus (sans végétation), mais à la situation actuelle réaliste. La question se posait surtout pour le quartier de la Buire dans lequel il y a beaucoup de végétation. Il a été décidé que le cas de référence serait la situation actuelle, donc déjà avec beaucoup de végétation, mais encore peu développée du fait de la jeunesse des plantations. Le cas monodispositif consistera à augmenter la taille des arbres. Dans ce choix, nous ne mesurerons pas l'impact du végétal, mais l'impact de l'ajout de végétation, par rapport à une référence où il y en a déjà. Il y aura donc un impact de l'effet de cumul.

Quartier de la rue de la Buire

Le dispositif « végétal » est représenté à partir de l'existant avec ajout de 2 types de végétalisation supplémentaires :

- les arbres initialement présent (points oranges sur la Figure 89) voient leur hauteur doublée, passant de 9m à 18 m.
- les cœurs d'îlots sont végétalisés (Figure 89).

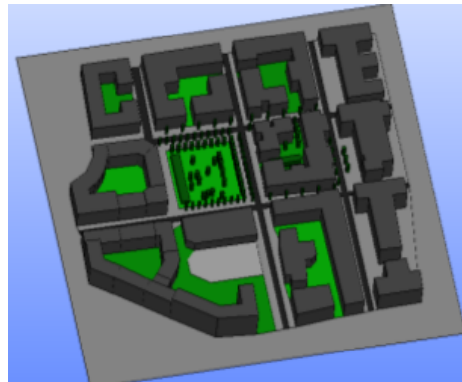


Figure 89 : Végétalisation du quartier de la Buire

Place de Francfort

Le parc adjacent à la place Francfort (sud-est) est considéré pour la simulation de référence. La végétalisation de la place consistera donc en l'implantation de grands arbres puisqu'il s'agit à priori du dispositif qui influe le plus sur le confort extérieur (Figure 90). Suite à la consultation des aménageurs de la place de Francfort, son évolution vers un espace séparé en 3 zones (une zone piétonne, une gare routière et un parking minute) est représentée. La zone piétonne est végétalisée dans ce dispositif

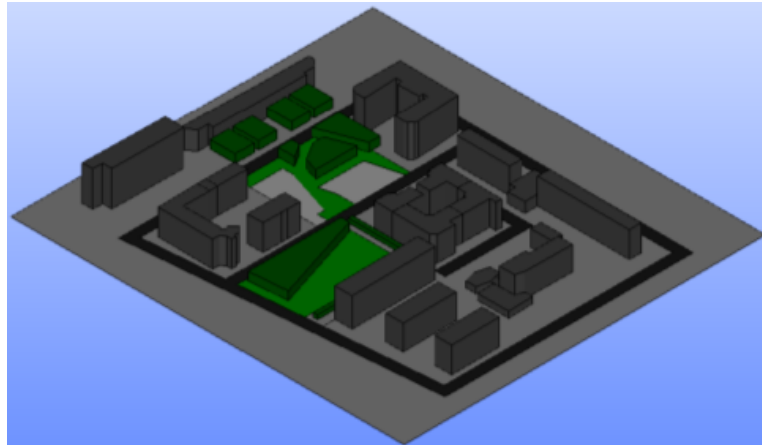


Figure 90 : Végétalisation de la place de Francfort selon l'évolution des formes urbaines à valider. A gauche, arbres sur la place. A droite, arbres sur le parvis.

Barres Moncey

Pour le scénario dispositif végétal, la végétalisation du quartier des barres Moncey est concentrée autour des barres. Des arbres sont implantés tout autour de l'îlot des barres. Les toitures des halles, des barres et du parking sont également végétalisées. Enfin, la place entre les deux barres est également végétalisée (Figure 91).

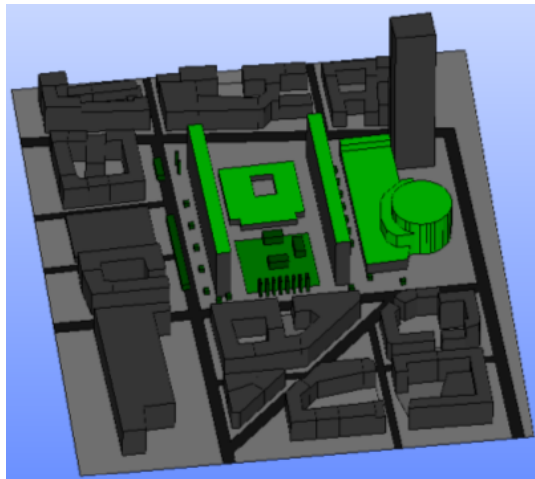


Figure 91 : Végétalisation autour des barres Moncey

Résultats des simulations

Paramètres de simulation :

Les simulations réalisées avec SOLENE-Microclimat ont été réalisées sur la période du 12/07/2013 au 26/12/2013. Un calcul sans couplage avec l'outil de mécanique des fluides Code_Saturne est en premier lieu mené pour les 15 jours puis pour la dernière journée, celle du 26/12/2013, le couplage est activé. L'étude du confort ne porte à chaque fois que sur cette dernière journée. Des simulations préliminaires avaient été menées pour vérifier que la durée de la période de couplage n'avait pas d'influence sur les résultats.

Analyse des températures de surface :

La première étape de l'analyse des simulations numériques réalisées avec SOLENE-microclimat consiste en l'analyse des températures de surfaces. Cette analyse a servi de base

pour pouvoir définir les scénarios optimisés lorsqu'il pouvait y avoir conflit entre plusieurs dispositifs à appliquer sur une même surface.

Cette analyse est présentée ici pour le quartier de la place de Francfort uniquement étant donné que les résultats obtenus pour les autres quartiers sont similaires. Néanmoins les visuels des résultats présentés ici sont disponibles dans le document en annexe 7.4 pour les deux autres quartiers.

L'analyse est faite dans un premier temps en présentant les cartographies des températures de surfaces au midi solaire pour le cas de référence et les différences de températures de surface entre le cas de référence et - successivement - le scénario Eau, le scénario Végétation et enfin le scénario Albédo (Figure 92).

Les températures de surface mises en jeu dans le cas de référence présentent une forte variabilité spatiale. Les sols, à faibles albédos, atteignent, en plein soleil, des températures comprises entre 45°C et 78°C selon si elles sont fortement ou faiblement exposées au vent. En effet, un faible vent induit un coefficient de convection peu élevé si bien que la dissipation de chaleur par convection est peu importante. Il en résulte des températures de surface élevées. C'est en particulier le cas dans la cour intérieure du bâtiment au centre du quartier et au niveau des zones au nord des bâtiments, abritées du vent puisque le vent vient à ce moment de la journée du sud du quartier. Dans le même temps les surfaces de sol qui ne sont pas directement exposées au soleil atteignent une température de 34°C environ. Les températures des surfaces végétalisées, quant à elles, montent très peu en température (entre 18,8°C et 21°C).

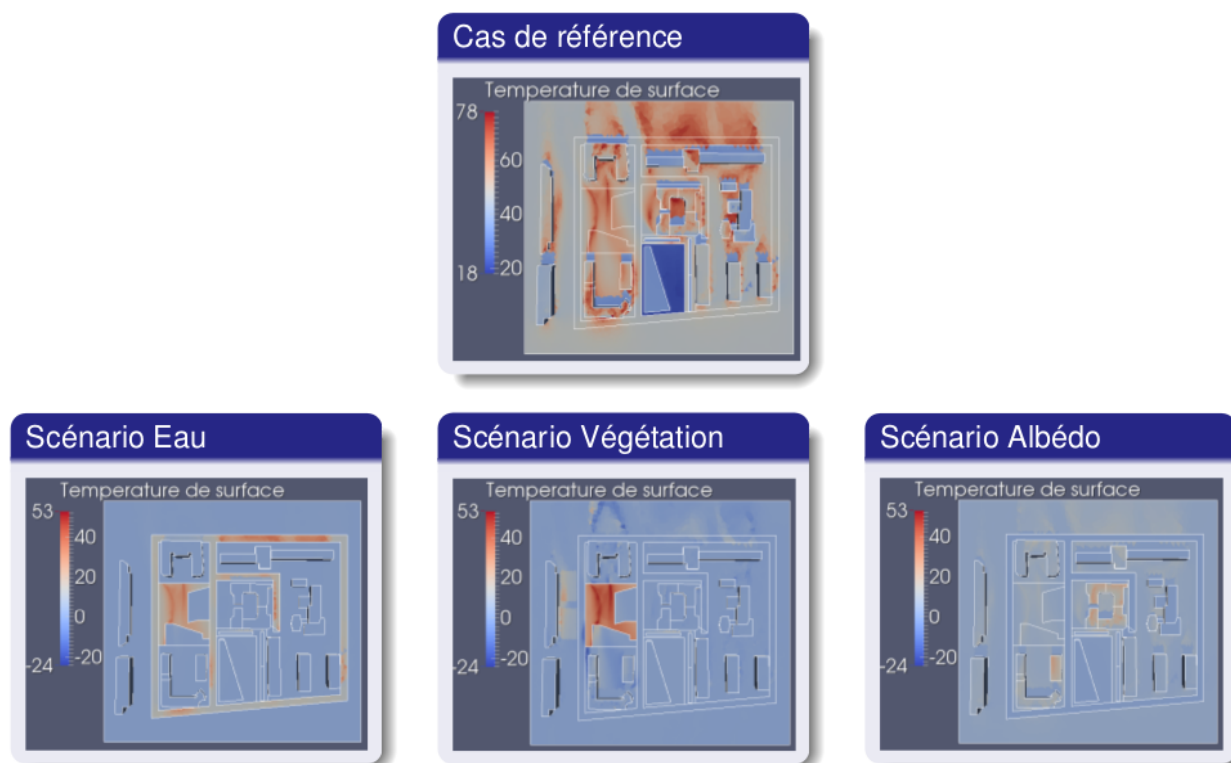


Figure 92 : Cartographies des températures de surface pour le cas de référence et des différences de températures de surface entre le cas de référence et les scénarios Eau, Végétation et Albédo (dans l'ordre de gauche à droite). Résultats pour le quartier de la place de Francfort à 12h le 26/07.

La mise en place du dispositif « Eau » sur l'ensemble des routes et sur la place de Francfort permet de réduire à 12h les températures de surfaces de 12°C à 37°C pour les surfaces exposées au soleil (à nouveau du fait de la variabilité des vitesses de vent) alors que le refroidissement des surfaces à l'ombre ne dépasse pas 4°C.

La mise en place du dispositif « Végétation » sur l'ensemble sur la place de Francfort (sols enherbés et arbres) permet de réduire à 12h les températures de surfaces jusqu'à 53°C notamment au milieu de la place de Francfort qui cumule l'influence de la végétalisation du sol et de la mise en place des arbres. Les surfaces uniquement influencées par l'ombrage de arbres (sur le parvis de la gare) voient leur température diminuer de 7°C, tandis que les surfaces végétalisées mais exposées au soleil ont des températures plus faibles que dans le cas de référence de 26 à 33°C.

On notera que des surfaces présentent des températures plus élevées que celles du cas de référence. Ceci est dû à la présence d'arbre qui modifie l'écoulement d'airs qui augmente par endroit la vitesse de l'air induisant une modification de la dissipation de chaleur par convection. Ces phénomènes ne concernent néanmoins pas un grand nombre de surfaces.

La mise en place du dispositif « Albédo » sur les toitures, les façades et les sols autres que les routes induit une réduction de la température qui atteint 27°C sur les toitures donc l'albédo est passé de moyen à fort mais seulement 8°C maximum pour les toitures dont l'albédo est passé de faible à moyen. En ce qui concerne la réduction des températures de façades, elle n'atteint au maximum que 12°C environ pour les surfaces soumises au rayonnement direct et est particulièrement faible voire inexistante pour les façades à l'ombre. Au niveau de sol enfin, l'influence de l'augmentation de l'albédo est comprise en 3° et 10°C selon l'endroit considéré.

Cette réduction de température directe des surfaces où sont appliqués les dispositifs semble à chaque fois n'être que très locale, et ne pas ou presque pas avoir d'influence sur les températures de surface des surfaces « non traités ». Par exemple, pour le dispositif « Eau » les sols et façades non humidifiées ne voient leur températures quasiment pas réduite, seules quelques rares zones voient leur températures diminuer d'un degré.

Cette réduction de température directe des surfaces où sont appliqués les dispositifs semble à chaque fois n'être que très locale, et ne pas ou presque pas avoir d'influence sur les températures de surface des surfaces « non traités ». Par exemple, pour le dispositif « Eau » les sols et façades non humidifiées ne voient leur températures quasiment pas réduite, seules quelques rares zones voient leur températures diminuer d'un degré.

Cette analyse n'est donnée ici que pour les cartographies de températures à 12h mais les mêmes analyses pourraient être faites à d'autres heures de la journée. En particulier les distributions de température de surfaces à 16h et à 20h sont présentées dans le document en annexe 7.4. Les réductions de températures seraient dans des ordres de grandeurs mais les interprétations et analyses des causes seraient similaires.

Néanmoins, la proportion de l'efficacité de tel ou te dispositif en comparaison des autres pourrait être différent. C'est pourquoi il est aussi intéressant d'investiguer l'évolution temporelle des températures de surface. Ceci n'étant pas possible pour tous les points du quartier, ceci est réalisé pour 3 points de la place de Francfort.

Le point 13928 se situe au bout de la place de Francfort dans une zone ou l'effet de cumul est à priori assez peu présent. Les points 16234 et 18418 sont très proches l'un de l'autre mais sur deux surfaces qui sont traitées différemment. (Figure 93)

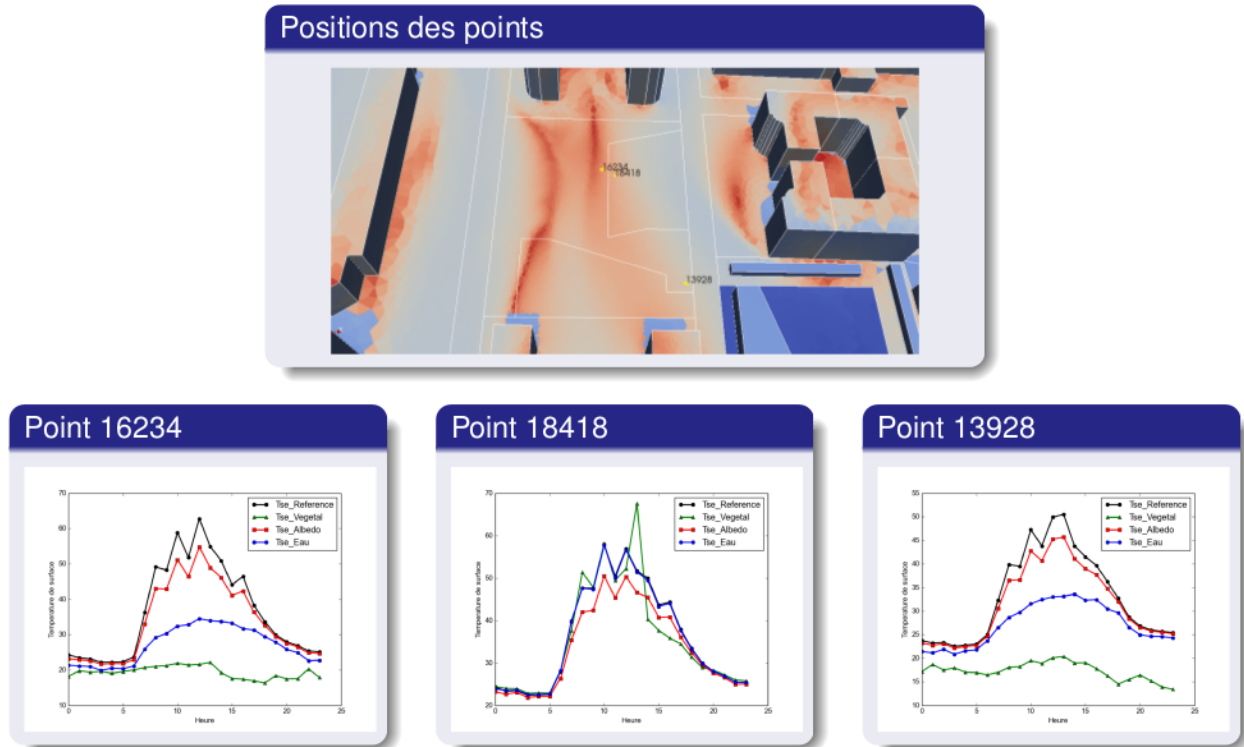


Figure 93 : Évolutions temporelles des températures de surface en 3 points de la place de Francfort pour les différents scénarios.

On constate que la réduction de température de surface au point 16234 est plus importante pour l'ensemble des dispositifs au cours de la journée, au moment où les températures sont les plus élevées, plutôt que la nuit. Le dispositif « Végétation » est le dispositif le plus efficace à tout moment de la journée, le dispositif « Eau » arrive en seconde position et le dispositif « Albédo » ne parvient absolument pas à concurrencer les deux autres dispositifs.

Cependant les évolutions de températures au point 18418, où ni humidification sur surfaces enherbées ne sont appliquées, montrent que le dispositif « Albédo » peut tout de même être intéressant lorsque les surfaces ne peuvent pas. On remarque même que le dispositif végétation peut entraîner des situations où les températures de surfaces sont plus élevées (du fait des vitesses d'air modifiées comme précisé précédemment). De manière générale, les dispositifs « Végétation » et « Eau » ne contribuent à aucune réduction de température sauf pour le dispositif 3 végétation « au moment où le point étudié passe à l'ombre vers 15h.

Enfin les évolutions temporelles des températures au point 13928 sont très similaires à celles au point 16234.

Au final, les dispositif « Végétation » apparaît bien comme étant le plus efficace. Lorsqu'il y aura conflit avec les autres dispositifs, c'est donc celui ci qui sera retenu.

Ces résultats étant similaires (avec des proportions différentes) pour les autres quartiers, ils ne sont présentés que pour le quartier de la place de francfort. Ceci étant, les graphiques et cartographies sont tout de même disponibles dans le document en annexe 7.4.

Analyse des températures de d'air :

De la même manière que les températures de surface, des cartographies de températures d'air sont présentées sur la Figure 94 : une cartographie des températures d'air pour le cas de référence et une cartographie des différences de température d'air entre le scénario de référence et chacun des scénarios mono dispositif.

Alors que l'air entre par le sud dans la scène urbaine à une température d'air de 33°C, il se chauffe ou se refroidit par la suite au contact des différentes surfaces. Ainsi, la distribution des températures d'air dans la scène urbaine à 12h indique que les températures varient de 10 degrés selon l'endroit où l'on se trouve. La fraîcheur causée par le parc au sud-est de la place de Francfort se répand dans l'ensemble du quartier selon l'écoulement du vent et au niveau des surfaces les plus chaudes (les plus exposées au soleil et avec les plus faibles albédos) l'air est réchauffé.

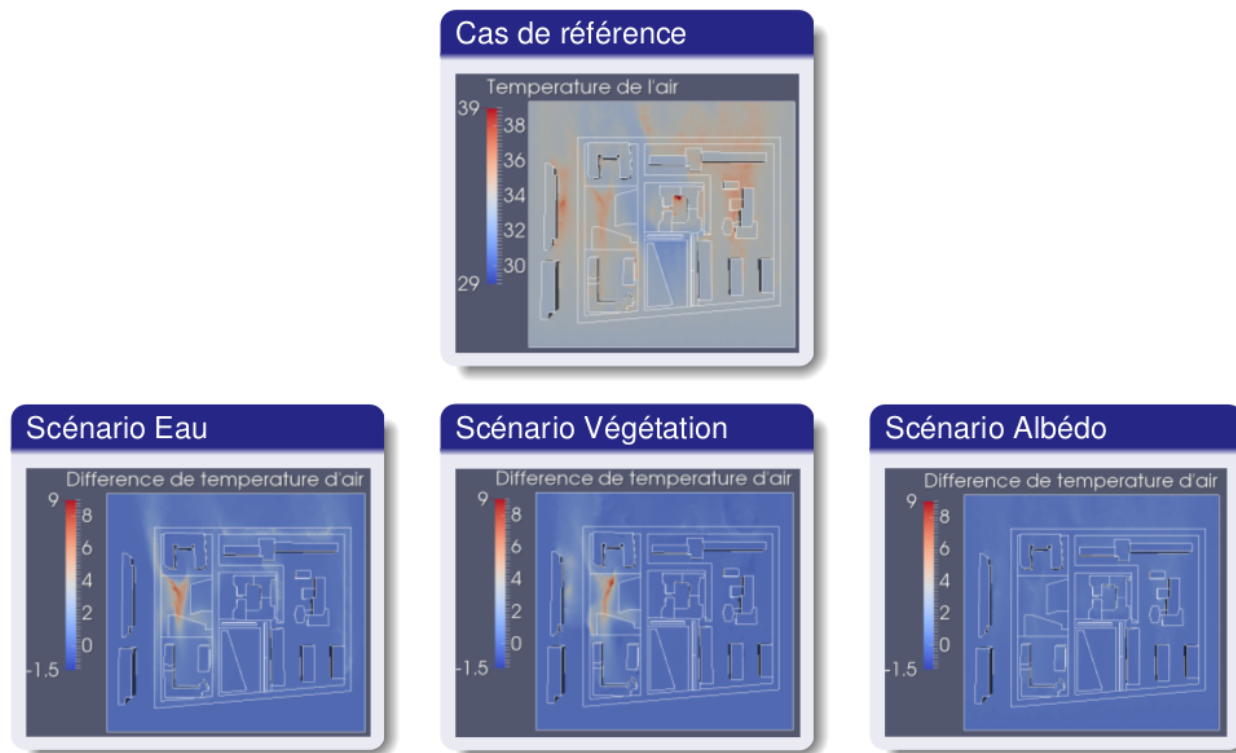


Figure 94 : Cartographies des températures d'air pour le cas de référence et des différences de températures d'entre le cas de référence et les scénarios Eau, Végétation et Albédo (dans l'ordre de gauche à droite). Résultats pour le quartier de la place de Francfort à 12h le 26/07.

Le recours au dispositif « Eau » induit de relativement faibles différences de température. De manière générale, elles ne dépassent pas 1°C. Elles sont en revanche les plus importantes au niveau de la place de Francfort, là où l'humidification est utilisée dans de plus large proportion. La réduction de la température de l'air sur la place peut donc atteindre jusqu'à 8°C.

Le dispositif « Végétation » est le dispositif qui permet de réduire le plus la température de l'air. Au maximum, cette réduction peut atteindre 9°C au niveau de la place de Francfort. Néanmoins ici aussi l'influence est très localisée.

La mise en place du dispositif « Albédo » induit les différences de températures d'air les plus faibles (moins de 0,7°C au niveau des surfaces les plus refroidies par le dispositif) et le fait qu'il soit appliqué sur des surfaces plus grandes ne contribue pas à compenser le fait que les températures de surfaces ne sont que peu réduites par ce dispositif.

De nouveau, à l'image de ce qui a été présenté pour les températures de surface, les évolutions temporelles des températures de l'air sont présentées en 3 points de la place de Francfort (Figure 95).

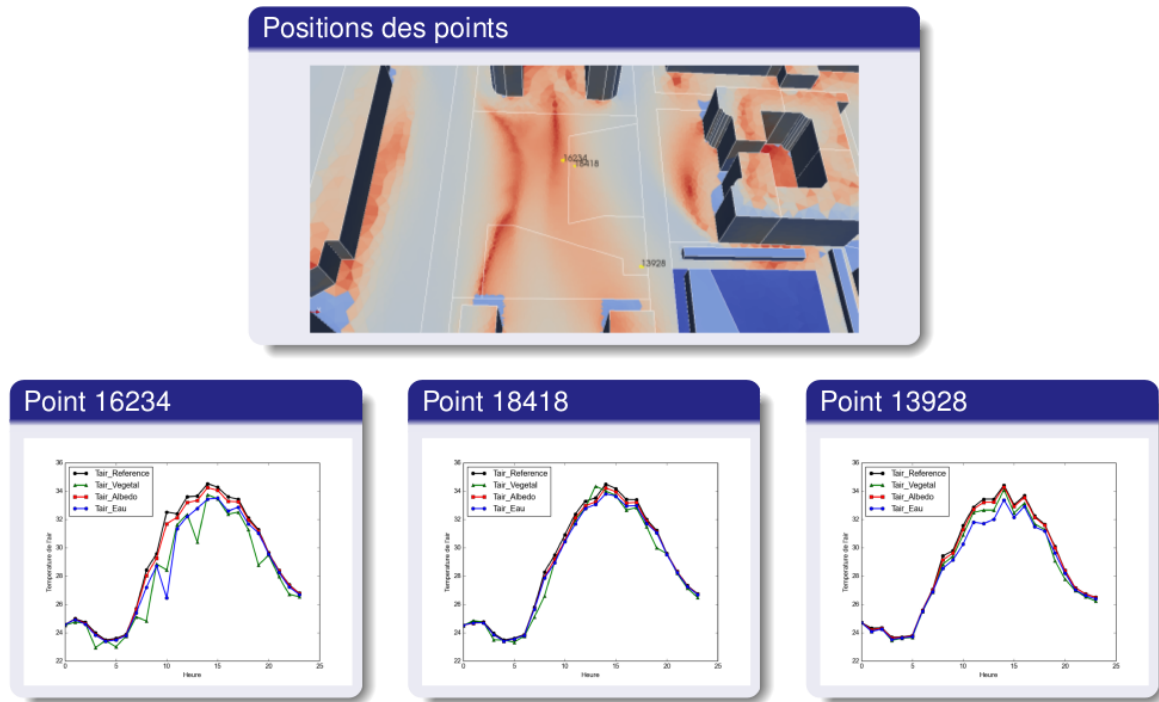


Figure 95 : Évolutions temporelles des températures d'air en 3 points de la place de Francfort pour les différents scénarios.

Sans entrer dans le détail de l'analyse, on constate que la représentation de l'effet des divers dispositifs n'est pas très visible en représentant les évolutions temporelles des températures pour les différents dispositifs. Néanmoins on observe une certaine disparité dans les résultats : au point 18418, l'influence des dispositifs sur la réduction de la température n'est quasiment pas sensible, même en journée, alors qu'elle l'est bien plus au niveau des points 16234 et 13928.

Pour ces raisons, plutôt que d'essayer de rentrer plus dans les détails dans l'analyse, les résultats vont être directement présentés sous forme d'évolutions temporelles des différences de températures entre les scénarios mono-dispositifs et le scénario de référence. Compte tenu de la variabilité spatiale des résultats, il est proposé de considérer l'influence des dispositifs en évaluant la réduction moyenne de température d'air pour l'ensemble de la place de Francfort. Cependant pour ne pas perdre l'information concernant la variabilité spatiale de l'influence des dispositifs, ces moyennes de écart sont accompagnées de deux autres évolutions temporelles : la moyenne des écarts à laquelle on ajoute l'écart type (spatial) des différences de température d'air et la moyenne des écarts à laquelle on retire l'écart type (spatial) des différences de température d'air (Figure 96).

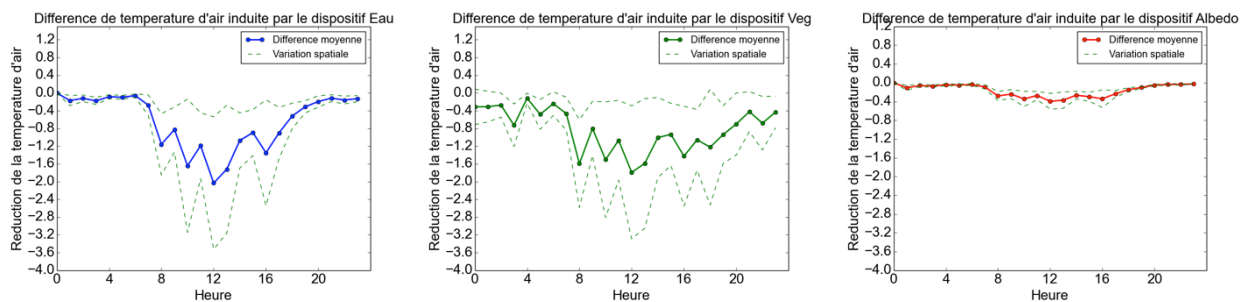


Figure 96 : Évolutions temporelles de la moyenne des différences de température d'air et distribution spatiale autour de cette moyenne (moyenne + écart type et moyenne - écart type). Moyenne calculée pour l'ensemble de la place de Francfort pour les différents scénarios.

Même si le végétal est plus efficace en moyenne au cours de la journée que le dispositif « Eau », il apparaît clairement qu'en un certain nombre de points le dispositif « Eau » peut s'avérer être plus efficace que le dispositif « Végétation ». Dans une très moindre mesure, la même remarque peut être faite pour le dispositif « Albédo ». Il est intéressant de rajouter que la variabilité spatiale des résultats est nettement moins importante pour le dispositif albédo que pour les deux autres dispositifs.

Calcul de l'indice de confort UTCI :

Il existe un certain nombre d'indicateurs permettant de quantifier le confort extérieur prenant en compte un plus ou moins grand nombre de paramètres climatiques. Un des plus complet est l'UTCI (Universal Thermal Climate Index) dont le principe de calcul est basé sur un bilan thermique réalisé sur un être humain. En plus des paramètres climatiques (Figure 97 Figure 97), cet indice considère également le métabolisme du corps humain ainsi que la capacité des vêtements à isoler/protéger des paramètres climatiques.

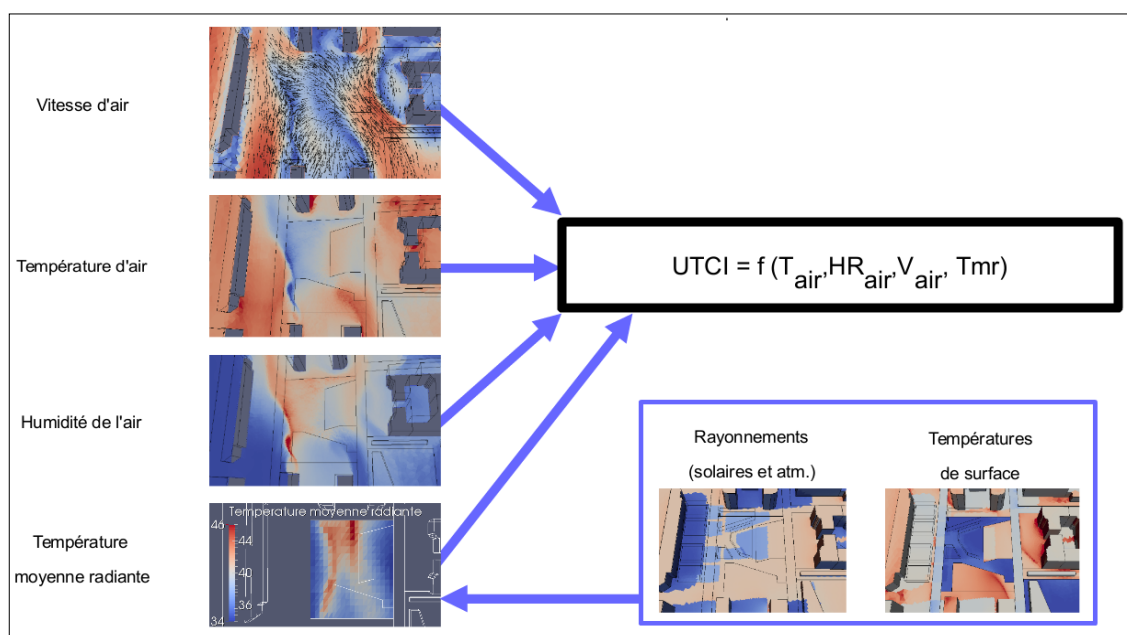


Figure 97 : Paramètres climatique pris en compte pour évaluer l'indice de confort UTCI.

Parmi les paramètres climatiques à évaluer l'un est plus complexe que les autres : la température moyenne radiante. Dans l'outil SOLENE-Microclimat, un passant est représenté par un cylindre qui est discrétisé en 42 faces triangulaires (Figure 98). Pour chacune des faces triangulaires, on réalise un bilan des flux radiatifs échangés : flux solaires directs et diffus, flux infrarouges avec le ciel (qui nécessite la prise en compte de facteur du vu du ciel) et des flux infrarouges avec la scène urbaine. Cette dernière composante peut être vue comme une température moyenne des surfaces environnant la surface sur laquelle on fait le bilan, en pondérant chacune des températures de surfaces par la manière donc les surfaces (celle sur laquelle on fait le bilan radiatif et celle dont on considère la température) en question se voient.

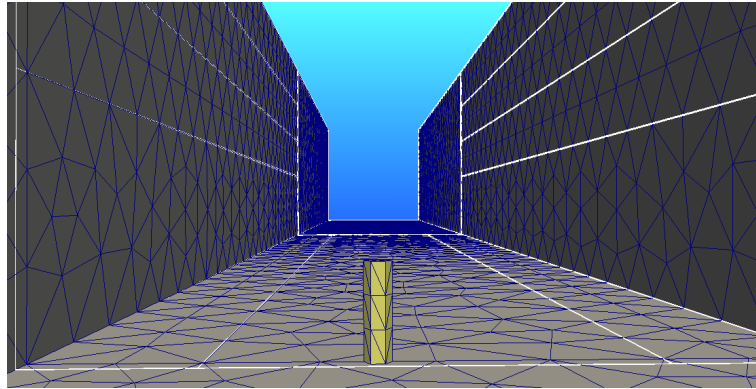


Figure 98 : Représentation du cylindre permettant l'évaluation de la température moyenne radiante dans l'outil SOLENE-Microclimat

Une fois le bilan radiatif calculé sur l'ensemble de faces du cylindre, la valeur moyenne de la température moyenne radiante est calculée. Les résultats étant systématiquement de la position du cylindre, il est déplacé en tous les points de l'espace où l'on veut évaluer l'indice de confort.

Toute cette procédure est donc particulièrement coûteuse en temps de calcul ce qui explique qu'elle ne peut être réalisée que sur une zone limitée du quartier étudié.

Analyse de l'indice de confort UTCI :

La Figure 99 présente la cartographie des valeurs pour la place de Francfort à 12h pour le cas de référence. La variabilité spatiale des valeurs d'UTCI n'est pas très importante. Ceci peut s'expliquer par le fait que la quasi totalité de la place est soumise aux mêmes conditions d'ensoleillement à ce moment de la journée. De manière plus générale, la place étant un espace assez ouvert, il y a peu de moment de la journée durant lesquels les conditions d'ensoleillement seront différentes d'un point à l'autre de l'espace. Il en résulte qu'au final la variabilité spatiale des valeurs d'UTCI est principalement due aux autres paramètres climatiques : distribution des températures d'air, de l'humidité de l'air et des vitesses d'air.

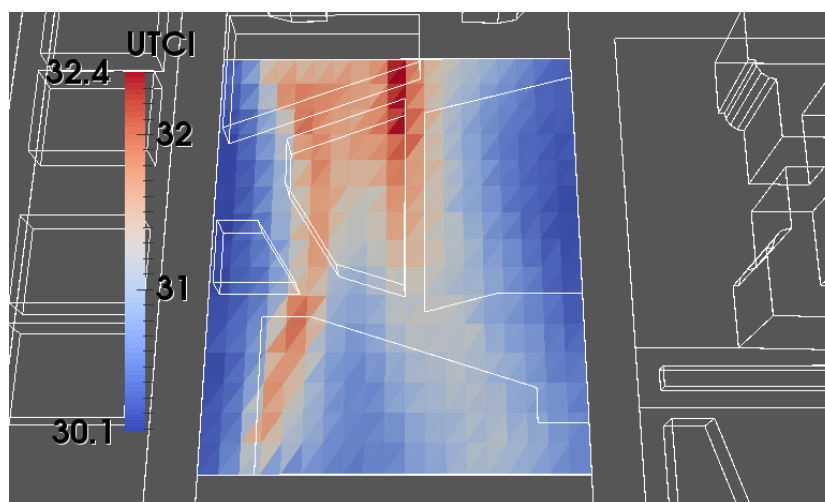


Figure 99 : Cartographie des valeurs d'UTCI pour la place de Francfort à 12h le 26/07 pour le cas de référence.

La suite de l'analyse consiste directement en l'étude de l'évolution temporelle de la moyenne des différences de valeurs d'UTCI entre les scénarios mono-dispositifs et le cas de référence ainsi que la variabilité spatiale de ces différences. Néanmoins, les résultats intermédiaires (les cartographies des différences) sont disponibles dans le support de présentation des résultats réalisée lors du séminaire final du projet.

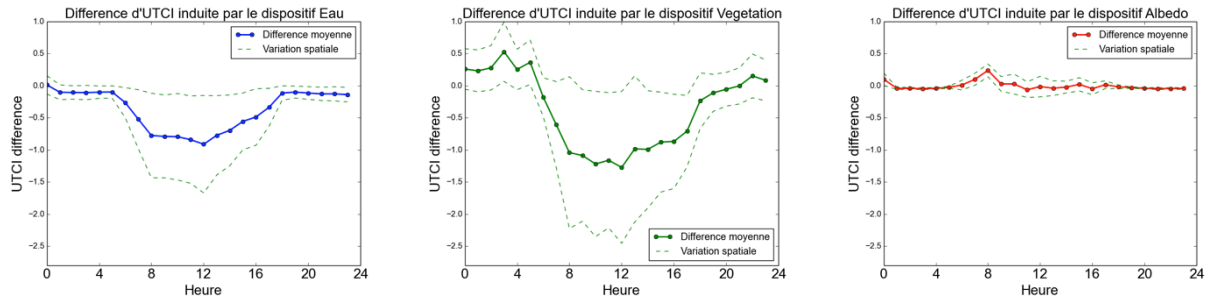


Figure 100 : Évolutions temporelles de la moyenne des différences des valeurs d'UTCI et distribution spatiale autour de cette moyenne (moyenne + écart type et moyenne – écart type). Moyenne calculée pour l'ensemble de la place de Francfort pour les différents scénarios.

Le recours au dispositif « Eau » ne permet pas franchement d'améliorer le confort en conditions nocturnes mais réduit en moyenne d'environ 1°C la valeur de l'UTCI en cours de journée. La variabilité spatiale indique néanmoins qu'il existe des zones de la place de Francfort où le confort n'est pas du tout amélioré voire peut être très légèrement dégradé. C'est en effet le cas lorsque les températures d'air ne sont pas réduites mais que l'eau évaporée contribue à l'augmentation de l'humidité, mais cela n'est pas vraiment significatif.

Le dispositif « Végétation » est, comme attendu, le dispositif qui a le plus d'influence sur l'amélioration du confort. Il permet d'améliorer les valeurs d'UTCI jusqu'à 4°C en certains points situés à l'ombre des arbres. Par contre la variabilité spatiale de la réduction des valeurs d'UTCI est très importante. En effet, dès qu'un point n'est pas à l'ombre des arbres l'influence du dispositif est nettement réduite. A aucun moment de la journée les arbres ne peuvent ombrager l'ensemble de la place si bien que la variabilité spatiale est toujours importante. Il est intéressant de noter que le confort peut être dégradé au cours de la nuit (plus de 1°C d'UTCI). Ceci s'explique par la présence des arbres qui masque le piéton du ciel réduisant ainsi le rafraîchissement par échanges radiatifs infrarouge avec le ciel.

Enfin le dispositif « Albédo » a une influence quasi constante de au cours de la journée avec en plus de cela une très faible variabilité spatiale. Ce dispositif peut contribuer à augmenter les valeurs d'UTCI. Ceci s'explique par le fait que l'augmentation de l'albédo augmente la proportion de rayonnement solaire réfléchi si bien que le piéton reçoit plus de rayonnement que dans le cas de référence.

Simulation des besoins énergétiques

Les résultats des simulations des besoins en climatisation des différents cas sont résumés dans le Tableau 17.

Cas d'étude		Besoins en climatisation (kWh/an)	Diminution des besoins en climatisation (%)
Buire	Référence	13 187 986	-
	Albédo	13 010 979	-1,34
	Végétation	13 100 037	-0,67
	Humidification	13 143 310	-0,34
Moncey	Référence	17 759 648	-
	Albédo	16 764 940	-5,60
	Végétation	17 645 183	-0,64
	Humidification	17 741 537	-0,10

Tableau 17 : Besoins en climatisation et réduction par rapport au cas de référence pour les quartier de la buire et Moncey

Les résultats avec des données climatiques pour l'année 2050 sont résumés dans Tableau 18.

Cas d'étude		Besoins en climatisation (kWh/an)	Augmentation par rapport au cas référence 2013 (%)
Buire 2050	Référence	14 231 164	7,91
	Albédo	14 085 817	6,81
	Végétation	14 179 967	7,52
	Humidification	14 231 169	7,91
Moncey 2050	Référence	20 988 277	18,18
	Albédo	19 777 201	11,36
	Végétation	20 802 209	17,13
	Humidification	20 919 377	17,79

Tableau 18 : Besoins en climatisation de l'année 2050 et augmentation par rapport au cas de référence 2013

3.8. Scénario optimisé

Principes

Les scénarios optimisés sont obtenus en superposant les scénarios monodispositifs. Là où deux types de surfaces « eau », « albédo » ou « végétation » se superposent, nous faisons le choix de retenir celui qui avait le plus d'impact dans les scénarios monodispositifs. Il s'agissait toujours du végétal.

Application aux quartiers

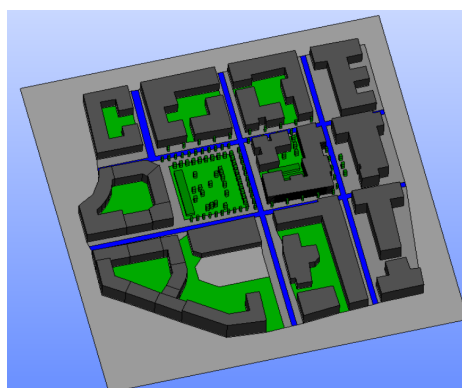


Figure 101 : Scénario optimisé sur le cas de la ZAC de la Buire

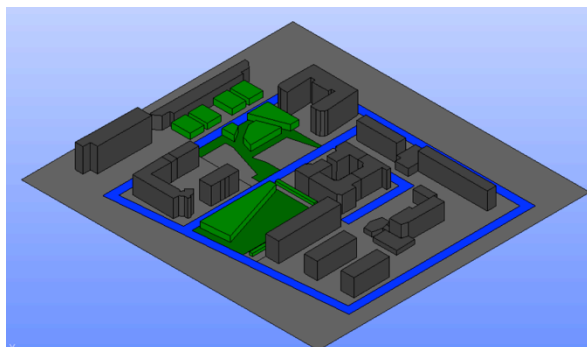


Figure 102 : Scénario optimisé sur le cas de la place de Francfort

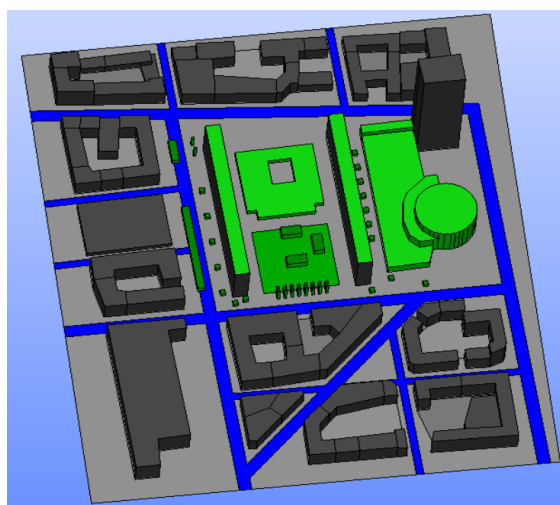


Figure 103 : Scénario optimisé sur le cas de lu quartier des barres Moncey

Résultats des simulations

Résultats de SOLENE-microclimat

L'analyse des résultats des scénarios optimisés se fait de la même manière que les résultats qui ont été présentés précédemment. Les cartographies et les évolutions temporelles de l'influence des dispositifs sont similaires aux résultats déjà présentés pour le dispositif le plus influent (Figure 104). Seuls les ordres de grandeurs changent du fait du cumul des effets sans pour autant les modifier dans de grandes proportions.

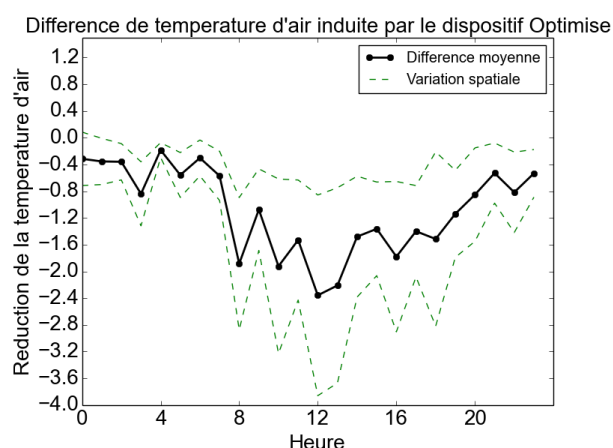


Figure 104 : Évolution temporelle de la moyenne des différences de température d'air et distribution spatiale autour de cette moyenne (moyenne + écart type et moyenne – écart type). Moyenne calculée pour l'ensemble de la place de Francfort pour le scénario « optimisé ».

L'analyse de l'évolution temporelle des différences de valeurs d'UTCI entre le scénario « Optimisé » et le cas de référence (Figure 105) conduit aux mêmes remarques que pour la température d'air. L'évolution temporelle est très semblable à celle de la différence d'UTCI entre le cas de référence et le scénario monodispositif « Végétation » qui est le dispositif le plus influent.

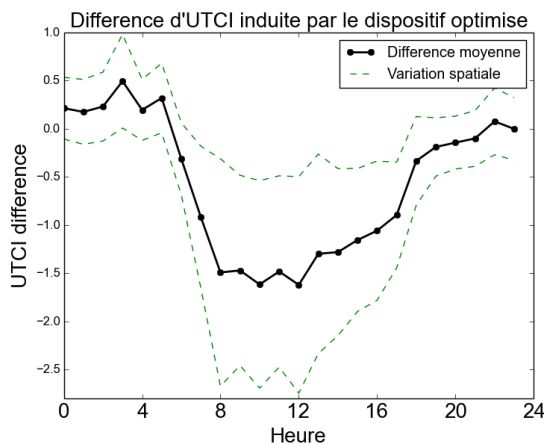


Figure 105 : Évolution temporelle de la moyenne des différences des valeurs d'UTCI et distribution spatiale autour de cette moyenne (moyenne + écart type et moyenne – écart type). Moyenne calculée pour l'ensemble de la place de Francfort pour le scénario « optimisé ».

L'ensemble des résultats pour les différents scénarios monodispositifs et pour le scénario « optimisé » sont synthétisés dans le Tableau 19. Y figurent pour chaque dispositif :

- la moyenne sur l'ensemble de la journée des moyennes spatiales présentées précédemment.
- la moyenne sur l'ensemble de la journée de l'écart type autour de la moyenne spatiale ou autrement dit de la moyenne des courbes en pointillé dans les graphiques présentés précédemment. (Ecart type « espace »)
- de l'écart type autour de la moyenne temporelle de la moyenne spatiale ou autrement dit, la variabilité temporelle de la moyenne spatiale présentée précédemment.

	Scénario	Tair				UTCI			
		Eau	Végétal	Albédo	Optimisé	Eau	Végétal	Albédo	Optimisé
Francfort	Moyenne	-0,64	-0,84	-0,16	-1,08	-0,38	-0,39	0	-0,57
	Écart Type (espace)	0,31	0,49	0,03	0,44	0,31	0,43	0,04	0,4
	Écart Type (temps)	0,46	0,72	0,07	0,7	0,32	0,61	0,06	0,61

Tableau 19 : Différences moyennes entre les divers scénarios et le cas de référence et leurs écarts type (dans l'espace et dans le temps) pour la température de l'air et pour les valeurs d'UTCI

Ces informations donnent donc un indicateur simplifié pour quantifier l'influence de chaque dispositif. Ils confirment la plus forte capacité du dispositif « Végétation » à réduire la température de l'air. Cependant en ce qui concerne l'UTCI, cet indicateur met sur un pied d'égalité le dispositif « Eau » et le dispositif « Végétation » alors qu'on a vu précédemment que le dispositif végétation était le plus efficace pour améliorer le confort. Il se trouve qu'en fait le végétal souffre du fait que la présence d'arbre dégrade le confort en période nocturne, et donc la moyenne cache l'influence plus importante du dispositif « Végétation » au cours de la journée.

Les deux valeurs des écarts type permettent donc de pouvoir avoir un esprit critique sur cet indicateur. Même s'ils ne sont pas tout à fait suffisants, ils permettent de s'assurer que le dispositif « albédo » est le moins efficace des trois dispositifs étudiés que ce soit pour réduire la température de l'air ou pour améliorer le confort.

L'autre enseignement intéressant de ce tableau de synthèse est de constater, comme cela était pressenti, que les performances des dispositifs de rafraîchissement urbain dans le scénario

optimisé ne correspondent pas à la somme de performance de chaque dispositif appliqué individuellement. Cela confirme donc tout l'intérêt de la mise en place des scénarios soustractifs

		Tair				UTCI			
		Eau	Végétal	Albédo	Optimisé	Eau	Végétal	Albédo	Optimisé
Buire	Scénario								
	Moyenne	-0,43	-0,19	-0,25	-0,75	-0,23	0,19	-0,22	-0,27
	Écart Type (espace)	0,19	0,1	0,09	0,24	0,11	0,1	0,08	0,12
	Écart Type (temps)	0,3	0,21	0,12	0,42	0,15	0,23	0,09	0,17

Tableau 20 : Différences moyennes entre les divers scénarios et le cas de référence et leurs écarts type (dans l'espace et dans le temps) pour la température de l'air et pour les valeurs d'UTCI : résultats pour le quartier de la ZAC de la Buire.

La synthèse des résultats pour le quartier de la Buire (Tableau 20) illustre que le dispositif « Eau » est le plus efficace pour cette situation pour réduire la température de l'air, le dispositif « Végétation » étant relégué au niveau du dispositif « Albédo », lui même présentant des performances supérieures à ce qu'elles le sont pour le quartier de Francfort. La configuration urbaine de la rue de la Buire ainsi que la définition des scénarios explique ces constatations. Le fait que la rue de la Buire soit à l'ombre des bâtiments quasiment tout au long de la journée implique que l'efficacité des arbres est bien moins importante. Ajouté à cela, le dispositif « végétation » au niveau de la rue de la Buire ne consiste qu'en une faible modification de l'état existant si bien que l'influence n'est pas vraiment comparable à celle du dispositif « végétation » sur la place de Francfort. En ce qui concerne l'influence des arbres sur l'UTCI, on constate que malgré le faible modification dans le scénario pour la rue de la Buire, l'information principale est que les valeurs de l'UTCI sont dégradées. Ceci s'explique par le fait qu'ils n'ont pas de grands apports bénéfiques en journée si bien que leur apport négatif durant la nuit est bien plus sensible. L'influence plus importante du « scénario « Albédo » sur les valeurs d'UTCI dans la rue de la Buire s'expliquent quant à elles par le fait que l'augmentation de l'albédo augmente la part de rayonnement réfléchi et cette augmentation aura une influence relative bien plus importante dans une rue ombragée que dans un espace fortement ensoleillé comme c'est le cas de la place de Francfort.

Enfin quelle que soit la grandeur d'intérêt, on constate à nouveau que la somme des contribution de chaque dispositif n'est pas égale à la contribution au rafraîchissement du scénario « optimisé ».

		Tair				UTCI			
		Eau	Végétal	Albédo	Optimisé	Eau	Végétal	Albédo	Optimisé
Moncey	Scénario								
	Moyenne	-0,42	-0,09	-0,12	-0,90	-0,41	-0,72	-0,03	-0,75
	Écart Type (espace)	0,13	0,06	0,02	0,24	0,08	0,13	0,02	0,13
	Écart Type (temps)	0,21	0,19	0,04	0,38	0,13	0,28	0,04	0,29

Tableau 21 : Différences moyennes entre les divers scénarios et le cas de référence et leurs écarts type (dans l'espace et dans le temps) pour la température de l'air et pour les valeurs d'UTCI : résultats pour le quartier des barres Moncey.

La synthèse des résultats pour le quartier des barres Moncey (Tableau 21) présente le dispositif « Eau » comme le plus efficace pour réduire la température de l'air. A nouveau cependant le dispositif « Végétation » voit ses effets masqué par la moyenne réalisée car son influence n'est pas la même en début de journée alors que la place entre les barres Moncey est à l'ombre que l'après midi où elle passe au soleil. Néanmoins le végétal reste le plus efficace à l'échelle de la journée pour améliorer le confort. Concernant le dispositif « albédo », il retrouve la

faible efficacité qu'on avait pu constater dans l'application à la place de Francfort que ce soit pour réduire la température de l'air ou pour améliorer le confort thermique.

Enfin à nouveau les effets de cumul ne sont pas linéaires et les performances des résultats dans le scénario optimisé ne sont pas égales à la somme des performances de chaque scénario mono dispositif.

Au final, il est indispensable de retenir que la comparaison de l'influence des divers dispositifs ne peut pas se faire sur la base d'un seul et unique indicateur simplifié. La comparaison requiert à la fois l'analyse des distributions spatiales des divers paramètres climatiques et l'analyse des évolutions temporelles. L'efficacité des dispositifs dépend fortement de la situation urbaine dans laquelle ils sont mis en œuvre et peut être particulièrement variable dans l'espace et dans le temps.

Qualifier l'efficacité d'un dispositif nécessite donc de définir précisément l'objectif que l'on veut atteindre : rafraîchir où et quand ?

Besoins énergétiques

Les résultats des simulations des besoins en climatisation des différents cas sont résumés dans le Tableau 22.

Cas d'étude		Besoins en climatisation (kWh/an)	Diminution des besoins en climatisation (%)
Buire	Optimisé	12 988 173	-1,52
Moncey	Optimisé	16 839 148	-5,18

Tableau 22 : Besoins en climatisation et réduction associé pour le scénario optimisé pour le quartier de la Buire et Moncey

Les résultats pour l'année 2050 sont résumés dans le Tableau 23.

Cas d'étude		Besoins en climatisation (kWh/an)	Augmentation par rapport au cas référence 2013 (%)
Buire 2050	Optimisé	14 060 216	6,61
Moncey 2050	Optimisé	19 862 634	11,84

Tableau 23: Besoin en climatisation pour les scénarios optimisés des années 2050 pour les quartiers de la Buire et Moncey

3.9. Scénarios par soustraction

Les scénarios par soustractions partent du scénario optimisé et pour chacun, on soustrait un dispositif.

Simulations avec SOLENE-microclimat

Les simulations ont été exploitées de manière à faire apparaître la contribution de chaque dispositif au scénario optimisé. On constate bien que la somme des contributions n'est pas également à la performance totale des dispositifs ensemble dans le scénario optimisé. Cela est assez naturel, car par exemple, un système d'humidification ou une surface à fort albédo n'aura pas le même impact si il est ombragé par des arbres.

Les Figure 106 et Figure 107 illustrent, sur le cas de la place de Francfort ces effets de composition sur la moyenne de la réduction de la température de l'air sur la zone étudiée et sur la moyenne de la réduction de l'indice UTCI.

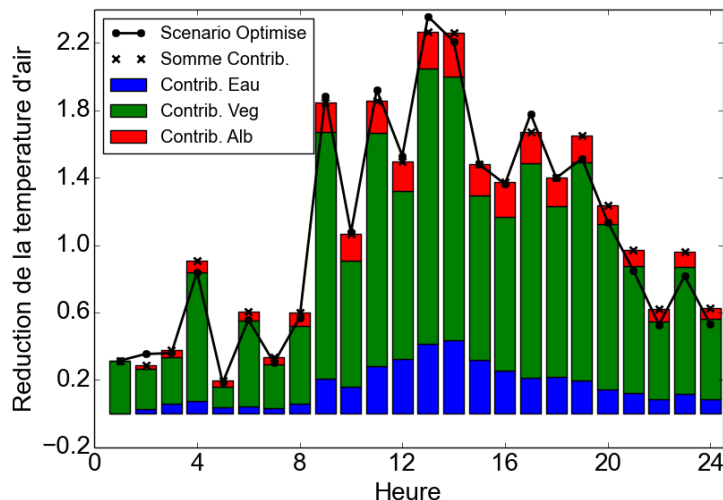


Figure 106 : Contribution de chaque dispositif à la réduction de la température de l'air (Moyenne sur la place de Francfort)

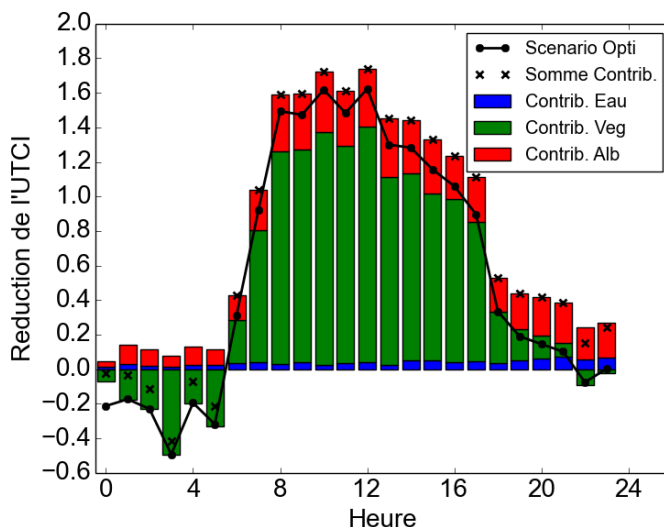


Figure 107 : Contribution de chaque dispositif à la réduction de l'UTCI (Moyenne sur la place de Francfort)

Besoins énergétiques

Les résultats des simulations des besoins en climatisation des différents cas sont résumés dans le Tableau 24.

Cas d'étude		Besoins en climatisation (kWh/an)	Diminution des besoins en climatisation (%)
Buire	Albédo & végétation	13 014 629	-1,31
	Albédo & humidification	13 007 578	-1,37
	Végétation & humidification	13 096 660	-0,69
Moncey	Albédo & végétation	16 853 970	-5,10
	Albédo & humidification	16 748 089	-5,70
	Végétation & humidification	17 629 803	-0,73

Tableau 24 : Besoin en climatisation et réduction associées pour les différents scénarios soustractifs pour les quartiers de la Buire et Moncey

Les résultats des simulations des besoins en climatisation pour l'année 2050 sont résumés dans le Tableau 25.

Cas d'étude		Besoins en climatisation (kWh/an)	Augmentation par rapport au cas référence 2013 (%)
Buire 2050	Albédo & végétation	14 063 927	6,64
	Albédo & humidification	14 085 783	6,81
	Végétation & humidification	14 180 032	7,52
Moncey 2050	Albédo & végétation	19 879 961	11,94
	Albédo & humidification	19 757 473	11,25
	Végétation & humidification	20 784 145	17,03

Tableau 25 : Besoins en climatisation pour l'année 2050 pour les quartiers de la Buire et Moncey

3.10. Synthèse et évaluation en coût global

Description des critères

L'évaluation des différents scénarios sur les trois quartiers d'étude a pour objectif de dresser une analyse sur différents critères à la fois économiques et environnementaux. L'objectif de cette analyse est d'accompagner les acteurs dans les choix d'aménagements afin d'optimiser le dispositif de rafraîchissement à proposer sur un quartier.

Une série de critères a ainsi été définie afin de rendre compte des paramètres climatiques, environnementaux et économiques sous-jacents à la mise en place des dispositifs. Il s'agit des critères listés ci-après :

- **Critère économique** en coût global intégrant les critères liés au coût d'investissement ainsi qu'au coût d'exploitation en cumulé sur 30 ans. Les coûts d'investissement intègre à la fois ceux portant sur la végétalisation des sites, la mise en place des dispositifs d'humidification et les revêtements adaptés offrant un faible albédo. Les coûts d'exploitation couvrent l'entretien de ces différents dispositifs, intégrant la main d'œuvre, les coûts de remplacement éventuels ainsi que les coûts de production d'eau potable. Ces différents indicateurs sont renseignés pour un **pas de temps annuel**.
- **Critère de confort** s'appuyant sur les valeurs d'UTCI³ et traduisant les situations de stress thermique. L'indicateur UTCI est calculé pour un cylindre correspondant à un corps humain, en un point du modèle. Cet indicateur prend en compte la température radiante, la température de l'air ambiant la vitesse de vent, l'humidité de l'air. La donnée quantitative de sortie est la température en °C. Cet indicateur a été calculé en plusieurs points remarquables pour chaque scénario **avec un pas de temps horaire, pour une journée chaude (de type caniculaire)**.
- **Critère carbone** s'appuyant sur les données de bilan carbone ou d'analyse de cycle de vie fournie par les collectivités ou les industriels.. Cet indicateur renseigne les kg

³ UTCI (*Universal Thermal Climate Index*) est une température d'air équivalente donnée en °C. Elle correspond à la température d'air qu'il faudrait avoir pour qu'un homme marchant dans des conditions climatiques "normales" (0,5 m/s de vent, 50% d'humidité, sans rayonnement direct), soit dans le même état de stress thermique que le point mesuré.

équivalent CO₂ émis par la mise en place et l'entretien des différentes solutions. Sont ainsi évaluées les émissions de CO₂ liées à la modification des revêtements des trottoirs, des toitures et des façades, la mise en place de système d'humidification, la mise en place et l'entretien des différents espaces végétalisés en pleine terre, en toiture et en façade, ainsi que les émissions liées à l'approvisionnement en eau potable pour les différentes solutions de rafraîchissement. Cet indicateur est calculé **sur une base de trente ans**.

- **Critère eau** s'appuyant sur les consommations totales générées par le dispositif (consommation du à l'entretien de la végétation et l'humidification des chaussées). Les besoins en arrosage ont été évalués sur une période d'un an en réalisant le bilan hydrique sur chacune des parcelles, en s'appuyant :
 - Sur les flux hydriques horaires fournis par Solene Microclimat pour une **journée type**, intégrant l'évaporation du sol, l'évapotranspiration de la végétation et prenant en compte les paramètres liés à l'environnement urbain (ombrage, courant de vent, température extérieure)
 - Sur un outil d'évaluation des besoins en irrigation journalier développé par Veolia, permettant l'évaluation des besoins en arrosage **sur la période estivale**, en se basant sur les résultats fournis par Solene-Microclimat (voir ci-dessus) et en intégrant les paramètres pédologiques et climatiques locaux (et se basant donc sur les pratiques de végétalisation du Grand Lyon et sur les bilans climatiques de l'année 2013).
 - Les besoins en eau pour l'humidification des chaussées s'appuient quant à eux sur l'évaluation de la quantité d'eau évaporée fournie par le modèle SOLENE sur une **journée type** (évaluée sur chaque maille du modèle et fonction de l'ombrage, du vent, de la température d'air, pour une journée chaude) et sur une base de 60 jours d'utilisation du dispositif en été.
 - **Le critère est donc évalué sur une période annuelle, à partir de simulations journalières.**
- **Critère énergétique** renseignant les consommations énergétiques nécessaires à la climatisation à l'intérieur des logements sur la période allant du 1^{er} mai au 30 septembre, afin de garantir le maintien de la température de confort. Dans le cadre de l'analyse multicritère, cet indicateur a été **calculé sur 30 ans**, permettant ainsi d'illustrer les consommations énergétiques cumulées liées aux besoins en climatisation en période estivale.
- **Critère biodiversité** s'appuyant sur le coefficient de biotope ordinaire. Celui-ci s'appuie sur les données surfaciques du quartier. En revanche, celui-ci représente un état, il est **invariable dans le temps**.

Pour chacun de ces critères, une série d'indicateurs a été définie afin de renseigner quantitativement les résultats. Ces indicateurs sont consolidés dans une base de données. Celle-ci est constituée de ratios s'appuyant sur les différents retours d'expériences de projets scientifiques mais également de l'expertise de Veolia dans le domaine de l'environnement et de l'aménagement. Cette base de données constitue un élément clé sur lequel s'appuie l'analyse multicritères des scénarios considérés sur chacun des quartiers.

Les différents indicateurs associés à chacun des critères sont renseignés dans le tableau ci-dessous :

Critères	Indicateurs	Unité
----------	-------------	-------

Economique: coût d'investissement	coût de plantation d'arbres	€/arbres
	coût d'implantation de surfaces enherbées	€/m ²
	coût d'implantation de toitures végétalisées	€/m ²
	coût d'implantation de façades végétalisées	€/m ²
	coût de mise en place de revêtements sur chaussée	€/m ²
	coût de mise en place de façades de bâtiments	€/m ²
Economique: coût d'exploitation	coût de mise en place de revêtements clairs en toitures	€/m ²
	coût d'entretien de façades végétalisées	€/m ² /an
	coût d'entretien d'arbres	€/arbre/an
	coût de production d'eau potable	cts €/m ³
	coût de main d'œuvre pour l'arrosage	€/m ² /an
Consommation en eau	coût d'entretien des toitures végétalisées	€/m ² /an
	consommation en eau	L/m ² de pelouse/j
	consommation en eau	L/m ² d'arbres/j
	consommation en eau	L/m ² de façades végétalisées/j
Confort	consommation en eau pour l'humidification	L/m ² de chaussée/j
	UTCI	°C (température équivalente)
Environnemental	CO2 généré par la production d'eau	kg CO ₂ produit/m ³ d'eau produit
	CO2 généré l'entretien des espaces verts (au sol)	kg CO ₂ eq/m ²
	CO2 généré par la peinture des toits et façades	kg CO ₂ eq/m ²
	CO2 généré par la peinture des sols	kg CO ₂ eq/m ²
	CO2 généré par la création des réseaux d'humidification	kg CO ₂ eq/ml
	CO2 généré par la production d'eau	kg CO ₂ eq/m ³
	CO2 généré la création et l'entretien des façades végétalisées	kg CO ₂ eq/m ²
	CO2 généré la création et l'entretien des toitures végétalisées	kg CO ₂ eq/m ²
Biodiversité	coefficient de biotope ordinaire pelouse	—
	coefficient de biotope ordinaire arbres	—
	coefficient de biotope ordinaire façades végétalisées	—
	coefficient de biotope ordinaire murs végétalisées	—

Tableau 26 : Ratios utilisés pour l'analyse multicritère

Déclinaison des critères sur les quartiers

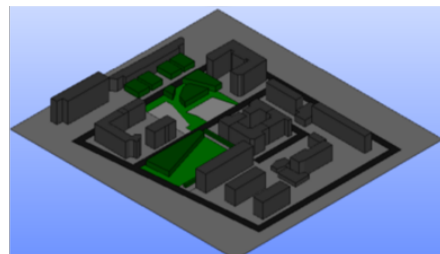
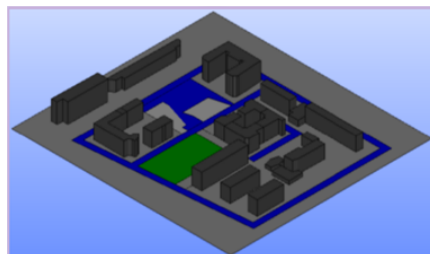
L'analyse comparative des différents scénarios sur les trois quartiers repose à la fois sur une étude à l'échelle de l'ensemble du quartier et une étude locale au niveau de zones ou de points spécifiques.

Echelle locale : points remarquables (UTCI) et consommation énergétique

Les points remarquables permettent d'illustrer les différentes possibilités de l'occupation de l'espace public par les usagers du quartier. Ainsi pour des points spécifiques, des valeurs permettant d'évaluer le confort thermique dans l'espace extérieur ont été calculées : la température radiante et l'UTCI.

Les figures ci-après permettent de localiser ces emplacements.

Place de Francfort



*Figure 108 : Localisation des points sur la place de Francfort.
Vue des scénarios eau et végétation.*

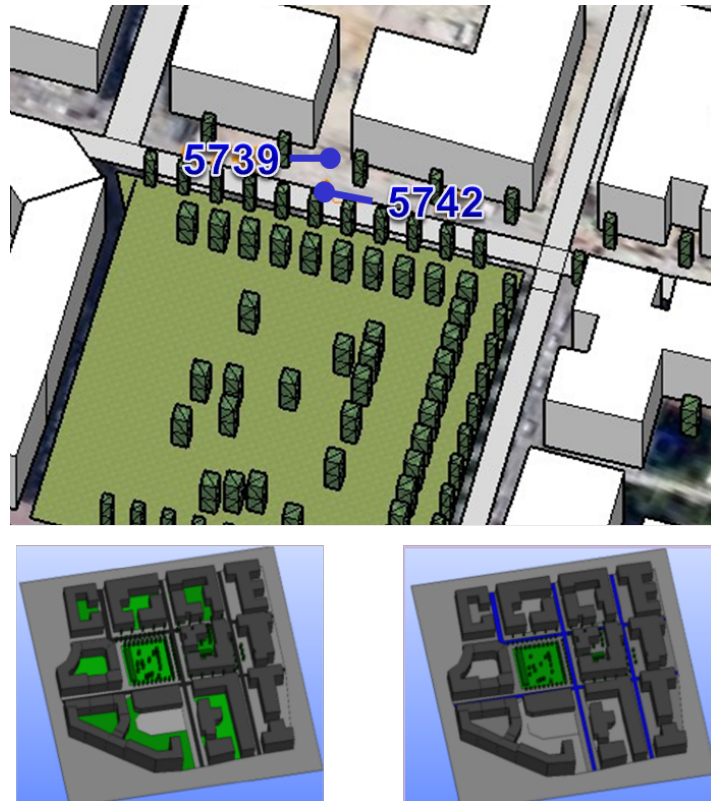
Point 113: ce point est localisé en contrebas, sur le lieu d'installation d'un futur abribus. Cet espace minéral dans le scénario de référence est végétalisé dans le cas des scénarios végétation et optimisé; et humidifié pour le scénario eau.

Point 401 : ce point est localisé sur un espace végétalisé dans le cas du scénario de végétation et du scénario optimisé, sur un espace humidifié pour le scénario « eau » et sur un espace minérale pour le scénario de référence.

Point 364: Ce point, voisin du point précédent, est également situé sur la place de Francfort mais sur une zone ni végétalisée, ni humidifiée dans tous les scénarios.

Ces trois points sont représentatifs des différentes zones occupées par les usagers lors de leur transit sur la place de Francfort.

Quartier de la Buire



*Figure 109 : Localisation des points sur le quartier de la Buire.
 Vue des scénarios végétation et eau.*

Point 5739 : ce point est situé en partie Nord du parc et ne bénéficie donc pas de l'ombrage des bâtiments en journée (exposé plein Sud). Il permet donc de quantifier le gain en confort des solutions de rafraîchissement pour des espaces très exposés à l'inconfort.

Point 5742 : ce point est situé juste en dessous du point précédent. Il permet de connaître la sensibilité des valeurs de confort calculées : en effet, nous pourrions observer les différences de valeur existantes entre deux points extrêmement proches.

Quartier des barres Moncey

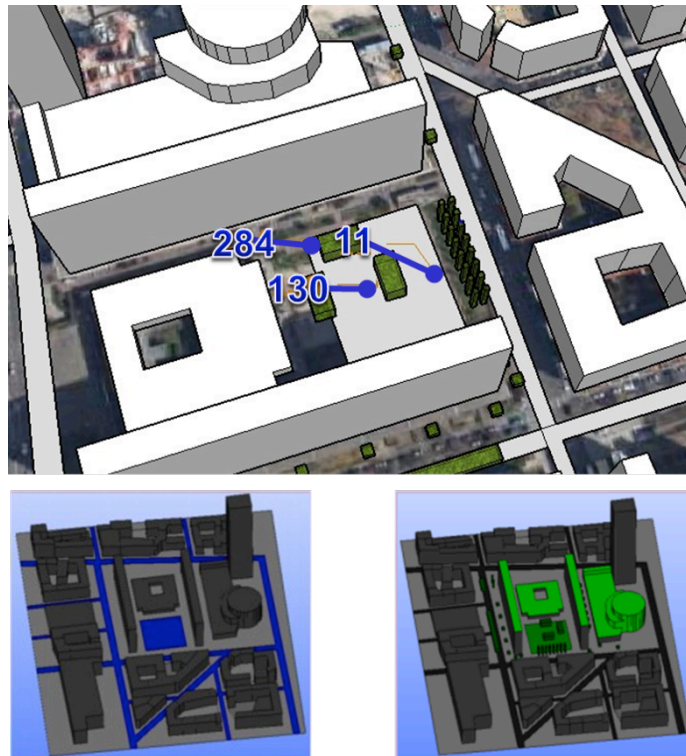


Figure 110 : Localisation des points sur le quartier des barres Moncey.

 Vue des scénarios eau et végétation.

Point 11 : ce point est localisé sur la place centrale entre les deux barres Moncey, place qui est totalement végétalisée dans le cas du scénario de végétation et du scénario optimisé, et humidifiée pour le scénario eau. Ce point est de plus localisé en contrebas de la lignée d'arbres bordant la place.

Point 130 : ce point est localisé en plein centre de la place centrale sur une zone enherbée et sous une haie d'arbuste (scénario végétation ou optimisé) ou sur un sol humidifié (scénario eau).

Point 284 : le point 284 est également localisé sur la zone enherbée. Cependant, celui-ci est à proximité immédiate du revêtement minérale de la voirie longeant la place.

Ces trois points permettent ainsi de représenter les différents cas de figure d'occupation de la place par les usagers du quartier des barres Moncey.

Echelle du quartier : critères étudiés

L'analyse multicritère a été établie pour chacun des scénarios sur les trois quartiers afin de rendre compte de l'impact des solutions de rafraîchissement proposées. L'analyse locale décrite précédemment est complétée par une analyse à l'échelle du quartier retranscrit ainsi les éléments suivants :

- L'évaluation en coût global
- La consommation en eau
- L'impact carbone
- La consommation énergétique
- Le coefficient de biotope ordinaire

Données d'entrée

L'analyse des scénarios à l'échelle de chacun des trois quartiers s'appuie sur les critères précédemment cités.

Pour chacun des quartiers est précisée la surface de chaque élément pris en compte dans l'analyse

	Quartier de la Buire					
	Unité	Référence	Eau	Végétal	Albédo	Optimisé
Surfaces de façades à albédo fort	m ²	92 174	92 174	92 174	106 540	106 540
Surface de façade à albédo moyen	m ²	14 366	14 366	14 366	-	-
Surface de façades à albédo faible	m ²	-	-	-	-	-
Surface de voirie à albédo moyen	m ²	-	-	-	6 250	-
Surface de voirie à albédo faible	m ²	6 250	-	6 250	-	-
Surface de toiture à albédo fort	m ²	-	-	-	19 525	19 525
Surfa de toiture à albédo moyen	m ²	19 525	19 525	19 525	15 050	15 050
Surface de toiture à albédo faible	m ²	15 050	15 050	15 050	-	-
Surface de trottoirs, places et cœur d'îlot à albédo moyen	m ²	-	-	-	75 580	59 948
Surface de trottoirs, places et cœur d'îlot à albédo faible	m ²	75 580	75 580	59 948	-	-
Surface d'arbres plantés (moyenne de 10m ² /arbre)	m ²	871	871	871	871	871
Surfaces gazon	m ²	3 900	3 900	19 532	3 900	19 532
Surface façades végétalisées	m ²	-	-	-	-	-
Surface toitures végétalisées	m ²	-	-	-	-	-
Surface de voirie et place humidifiée	m ²	-	6 250	-	-	6 250

Tableau 27: Données surfaciques du quartier de la Buire

Francfort						
	Unité	Référence	Eau	Végétal	Albédo	Opti
Surfaces de façades à albédo fort	m ²	31 207	31 207	31 207	48 323	48 323
Surface de façade à albédo moyen	m ²	17 116	17 116	17 116	16 660	16 660
Surface de façades à albédo faible	m ²	16 660	16 660	16 660	-	-
Surface de voirie à albédo moyen	m ²	-	-	-	17 504	-
Surface de voirie à albédo faible	m ²	17 504	2 968	17 504	-	-
Surface de toiture à albédo fort	m ²	3 487	3 487	3 487	7 850	7 850
Surfa de toiture à albédo moyen	m ²	4 363	4 363	4 363	9 008	9 008
Surface de toiture à albédo faible	m ²	9 008	9 008	9 008	-	-
Surface de trottoirs, places et cœur d'îlot à albédo moyen	m ²	-	-	-	92 782	88 910
Surface de trottoirs, places et cœur d'îlot à albédo faible	m ²	92 782	88 910	88 910	-	-
Surface d'arbres plantés (moyenne de 10m ² /arbre)	m ²	2 535	2 535	5 842	2 535	5 842
Surfaces gazon	m ²	5 855	5 855	9 727	5 855	9 727
Surface façades végétalisées	m ²	-	-	-	-	-
Surface toitures végétalisées	m ²	-	-	-	-	-
Surface de voirie et place humidifiée	m ²	-	18 408	-	-	17 504

Tableau 28: Données surfaciques quartier de la place de Francfort

Moncey						
	unité	Référence	Eau	Végétal	Albédo	Opti
Surfaces de façades à albédo fort	m ²	91 908	91 908	91 908	154 851	148 172
Surface de façade à albédo moyen	m ²	62 943	62 943	56 264	7 780	6 635
Surface de façades à albédo faible	m ²	7 780	7 780	6 635	-	-
Surface de voirie à albédo moyen	m ²	-	-	-	20 238	-
Surface de voirie à albédo faible	m ²	20 238	-	20 238	-	-
Surface de toiture à albédo fort	m ²	-	-	-	17 537	17 537
Surfa de toiture à albédo moyen	m ²	17 537	17 537	17 537	34 100	20 174
Surface de toiture à albédo faible	m ²	34 100	34 100	20 174	-	-
Surface de trottoirs, places et cœur d'îlot à albédo moyen	m ²	-	-	-	89 676	86 076
Surface de trottoirs, places et cœur d'îlot à albédo faible	m ²	89 676	86 076	86 076	-	-
Surface d'arbres plantés (moyenne de 10m ² /arbre)	m ²	-	-	1 328	-	1 328
Surfaces gazon	m ²	-	-	3 600	-	3 600
Surface façades végétalisées	m ²	-	-	7 824	-	7 824
Surface toitures végétalisées	m ²	-	-	13 926	-	13 926
Surface de voirie et place humidifiée	m ²	-	23 838	-	-	20 238

Tableau 29: Données surfaciques quartier des barres Moncey

Outils utilisés pour le calcul des critères

L'analyse à l'échelle globale s'appuie sur les critères définis précédemment et permet de comparer chacun d'entre eux en parallèle à l'échelle du quartier.

L'analyse de ces différents paramètres s'appuie à la fois sur l'outil de simulation Solène Microclimat, sur un outil de calcul besoins en irrigation ainsi que sur l'expertise de Veolia relative à la mise en place de solutions environnementales au service des collectivités. Les éléments ci-dessous permettent de venir préciser certaines informations sur le calcul de certains indicateurs considérés dans cette analyse globale.

Coût économique

Les couts économiques ont été établis à partir de plusieurs ratios, définis dans le Tableau 26 : Ratios utilisés pour l'analyse multicritère

Ces informations proviennent notamment :

- de données fournies par la direction de l'aménagement, de la direction de la voirie du Grand Lyon
- de retour d'expériences de 2EI Veolia ou d'entité du groupe Veolia
- d'informations fournies par des industriels

Afin de fournir une information comparable entre les différentes solutions et cohérente avec la durée de vie d'un aménagement, le coût est composé d'un coût d'investissement et d'un coût d'exploitation sur 30 ans : entretien et maintenance des ouvrages, coût de production d'eau potable, coût d'entretien des espaces.

Les ratios monétaires ont été considérés comme constants sur les 30 prochaines années.

Besoin en eau

Les besoins en eau fournis dans cette analyse globale ont été calculés en utilisant l'outil Solène Microclimat et l'outil de calcul des besoins en irrigation en série. Cette association permet d'intégrer un maximum de paramètres dans la chaîne de calcul, à savoir les informations d'ombrage et de courant de vent liés à l'environnement urbain et intégrés dans la modélisation de l'outil Solène et la réserve utile du sol prise en compte dans les calculs d'irrigation.

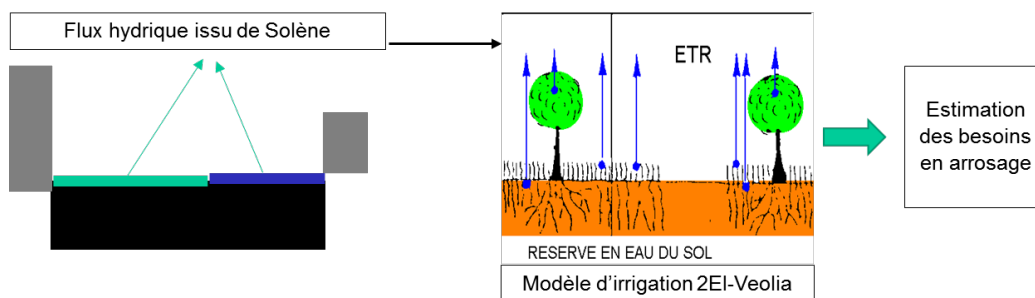


Figure 111 : Schéma de principe de l'utilisation en série de Solène Microclimat et du modèle d'irrigation 2EI-Veolia

Ainsi les flux hydriques calculés par l'outil Solène Microclimat représentent la valeur d'évapotranspiration moyenne à l'échelle de l'ensemble du quartier. Cette valeur est retranscrite à l'échelle du m² au regard de la végétation identifiée sur le quartier et constitue ensuite la donnée d'entrée d'évapotranspiration réelle intégrée dans l'outil de calcul des besoins en irrigation.

Cet outil s'appuie sur la formule de bilan hydrique suivante :

$$P_e + S = R + ETR + ET + (S+dS)$$

P : Précipitations Efficace

S : Stock en eau dans le sol lié à la période précédente

R : Ruissellement et lixiviation

ETR : Evapotranspiration réelle

ET : évaporation du sol

S+dS : Stock en eau dans le sol à la fin de la période

Coût carbone

Les coûts carbonés ont été établis à partir de plusieurs ratios, définis dans le Tableau 26 : Ratios utilisés pour l'analyse multicritère

Ces informations proviennent notamment :

- D'analyse de cycles de vie (ACV) fournis par des industriels français pour des opérations de constructions (notamment ravalement de façades et pose de linéaires de réseaux d'eau) et déposés dans la base officielle INIES

- De ratios de fonctionnement ou de production calculés à partir des bilans carbone d'entité comme « Eau du Grand Lyon » ou « Par cet jardins de Nantes »
- De publications scientifique, notamment (de Brajkovich, 2014).
- De données fournies directement par des industriels, notamment les toitures végétalisées « Urbanscape » de Knauf industries.

Le cout carbone des solutions de rafraîchissement a été établi sur une base d'une durée de vie de 30 ans, prenant en compte : la production des matériaux, la mise en place des solutions, leur, entretien et leur, fin de vie.

Coefficient de biotope ordinaire

Le coefficient de biotope ordinaire permet de renseigner sur la présence de surfaces propices à l'expression de la biodiversité à la fois floristiques et faunistiques, sur le quartier. Des coefficients sont ainsi affectés à chacune de ces surfaces dites éco-aménageables au regard de leurs potentialités :

Surfaces éco-aménageable	Coefficient Valeur écologique
Surfaces semi-perméables	0.3
Surfaces semi-ouvertes	0.5
Espaces verts sur dalle de rez-de-chaussée et garages souterrains	0.5
Espaces verts sur dalle avec épaisseur de terre > 80 cm	0.7
Espaces verts en pleine terre	1
Infiltration d'eau de pluie par m ² de surface de toit	0.2
Façades végétalisées	0.5
Toitures végétalisées	0.7

Tableau 30: Coefficients de Biotope utilisés Résultats de l'analyse comparative sur les trois quartiers

Analyse à l'échelle globale

Quartier de la Buire

Restitution des résultats

Critère	Unité	Scénario Référence	Scénario Végétation	Scénario Albédo	Scénario Eau	Scénario Optimisé
Coût total cumulé sur 30 ans	k€ HT	428	848	7 924	1 056	7 343
Consommation en eau annuelle	milliers de m ³ /an	10,6	29,2	7,3	12,8	31,2
Bilan carbone cumulé sur 30 ans	Teq CO ₂	111	433	4 061	414	4 161
Réduction de consommation d'énergie annuelle (par rapport au scénario de référence)	MWh	-	2 638	5 310	1 340	5 994
Coefficient Biotope ordinaire	-	780	3 906	780	780	3 906

Tableau 31: Résultats de l'analyse multicritère sur le quartier de la Buire

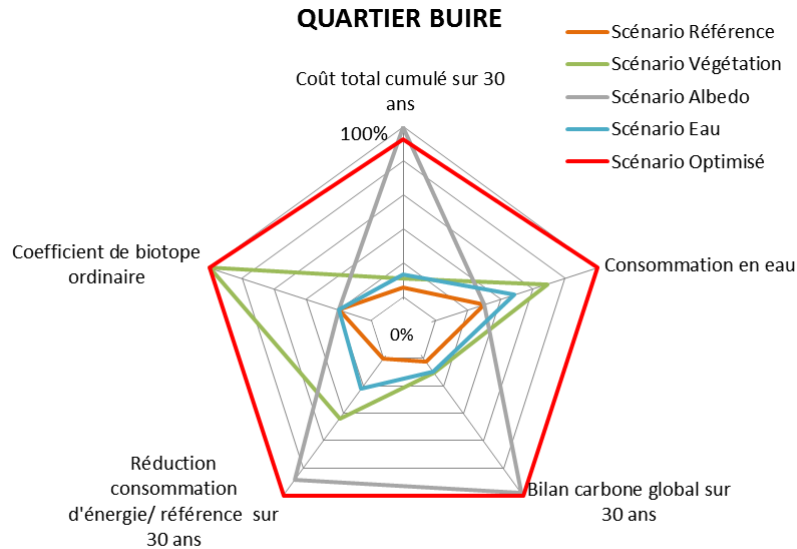


Figure 112 : Représentation synthétique de l'analyse multicritère sur le quartier de la Buire

NB : les indices 0 et 100% correspondent aux valeurs minimales et maximales des différents critères sur le quartier

Analyse des résultats

L'évaluation multicritères des différents scénarios sur le quartier de la Buire permet de distinguer chacune des solutions de rafraîchissement urbain proposées au regard de leurs impacts respectifs.

D'un point de vue économique, la **modification de l'albédo des façades et revêtements** apparaît comme la solution de rafraîchissement la moins avantageuse, avec un cout global pouvant représenter de 4 à 6 fois celui des autres solutions de rafraichissement.

Les émissions carbonées liées à la mise en place de cette solution de rafraîchissement sont également plus importantes que celles générées par les deux autres solutions de rafraichissement urbain.

A contrario, l'humidification des voiries et la végétalisation importante de la parcelle requièrent des volumes d'eau particulièrement importants de façon quotidienne, qui viennent s'ajouter aux besoins en eau accrus de la population en période caniculaire. Par ailleurs, ces deux solutions, du fait de leur implantation à l'échelle du quartier, ont moins de répercussions sur la consommation énergétique dans les bâtiments liés à l'utilisation de climatiseurs que la modification de l'albédo des façades et de la toiture qui a un effet positif immédiat sur l'isolation thermique du bâtiment par réflexion des rayons incidents.

Quartier de la place de Francfort

Restitution des résultats

Critère	Unité	Scénario Référence	Scénario Végétation	Scénario Albédo	Scénario Eau	Scénario Optimisé
Coût total cumulé sur 30 ans	k€ HT	872	1 908	10 909	2 725	11 063
Consommation en eau annuelle	milliers de m ³ /an	31,9	54,4	31,8	40,0	59,7

Bilan carbone cumulé sur 30 ans	Teq CO ₂	228	411	4 806	1 124	5 316
Réduction de consommation d'énergie annuelle (par rapport au scénario de référence)	MWh	<i>Non étudié sur ce quartier</i>				
Coefficient Biotope ordinaire	-	1 171	1 945	1 171	1 171	1 945

Tableau 32: Résultats de l'analyse multicritère sur le quartier de la place de Francfort

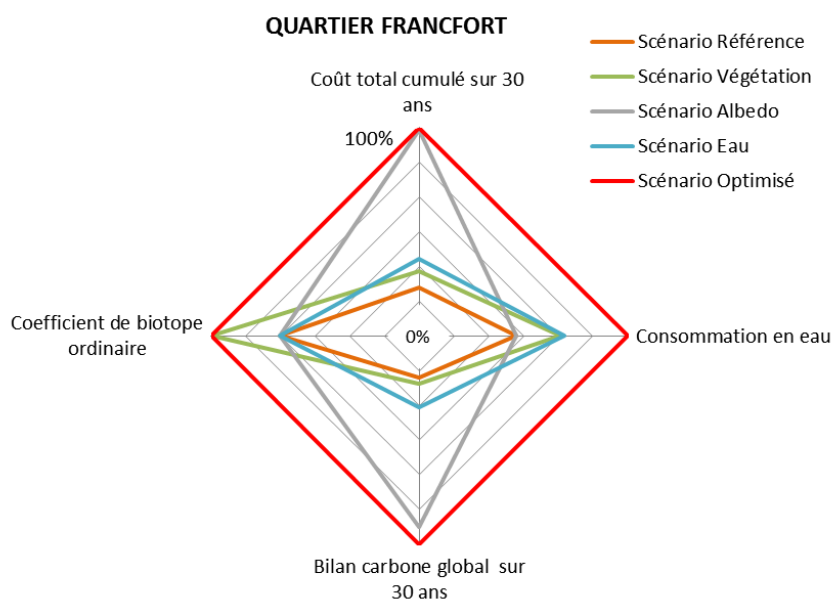


Figure 113 : Représentation synthétique de l'analyse multicritère sur le quartier de la place de Francfort

NB : les indices 0 et 100% correspondent aux valeurs minimales et maximales des différents critères sur le quartier

Analyse des résultats

L'évaluation multicritères des différents scénarios sur le quartier de la Buire permet de distinguer chacune des solutions de rafraîchissement urbain proposées au regard de leurs impacts respectifs.

D'un point de vue économique, la **modification de l'albédo des façades et revêtements** apparaît comme la solution de rafraîchissement la moins avantageuse économiquement, avec un coût global représentant presque 4 fois celui des autres solutions de rafraîchissement.

Les émissions carbonées liées à la mise en place de cette solution de rafraîchissement sont également de 4 à 40 fois plus importantes que celles générées par les deux autres solutions de rafraîchissement urbain.

A contrario, **l'humidification des voiries** apparaît comme la solution la plus consommatrice en eau sur ce quartier. Cela s'explique par la volonté d'arroser l'ensemble des voiries et l'ensemble de la place actuellement minérale. Comme sur le quartier de la Buire, ces volumes d'eau viennent s'ajouter aux besoins en eau accrus de la population en période caniculaire.

A noter que le quartier de la place de Francfort possède déjà dans le scénario de référence une forte surface végétalisée (Tableau 28), ce qui explique les besoins importants en eau du scénario de référence.

La solution de végétalisation ne se démarque pas des deux autres à l'échelle de ce quartier quel que soient les critères étudiés.

Quartier des Barres Moncey

Restitution des résultats

Critère	Unité	Scénario Référence	Scénario Végétation	Scénario Albédo	Scénario Eau	Scénario Optimisé
Coût total cumulé sur 30 ans	k€ HT	-	11 619	11 689	8 982	30 319
Consommation en eau annuelle	milliers de m3/an	-	35,6	-	9,2	39,0
Bilan carbone cumulé sur 30 ans	Teq CO ₂	-	1 635	7 593	1 157	9 812
Réduction de consommation d'énergie annuelle (par rapport au scénario de référence)	MWh	-	3 434	29 841	543	27 615
Coefficient Biotope ordinaire	-	-	1 894	-	-	1 894

Tableau 33 Résultats de l'analyse multicritère sur le quartier des barres Moncey

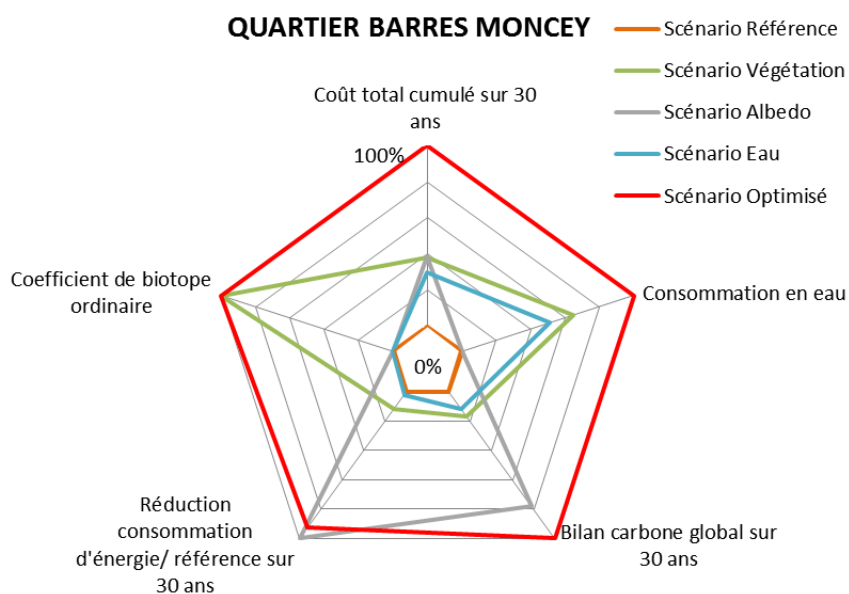


Figure 114 : Représentation synthétique de l'analyse multicritère sur le quartier de la place de Francfort - NB : les indices 0 et 100% correspondent aux valeurs minimales et maximales des différents critères sur le quartier

Analyse des résultats

L'évaluation multicritères des différents scénarios sur le quartier de la Buire permet de distinguer chacune des solutions de rafraîchissement urbain proposées au regard de leurs impacts respectifs.

D'un point de vue économique, la **végétalisation du site** apparaît comme la solution de rafraîchissement la moins avantageuse économiquement, avec un cout global pouvant

représenter de 2 à plus de 50 fois celui des autres solutions de rafraîchissement proposées. Ceci s'explique par le choix de végétaliser une importante superficie de toitures et de façades de bâtiment sur ce quartier. Ces pratiques de végétalisation, plus techniques que la végétalisation, en pleine terre offre des coûts de mise en œuvre élevés.

La **modification de l'albédo des façades** reste la solution pour laquelle les émissions carbonées sont les plus importantes.

A contrario, l'humidification des voiries et la végétalisation importante de la parcelle requièrent des volumes d'eau particulièrement important de façon quotidienne, qui viennent s'ajouter aux besoins en eau accrus de la population en période caniculaire. Par ailleurs, ces deux solutions, du fait de leur implantation à l'échelle du quartier, ont moins de répercussions sur la consommation énergétique dans les bâtiments liés à l'utilisation de climatiseurs que la modification de l'albédo des façades et de la toiture qui a un effet positif immédiat sur l'isolation thermique du bâtiment par réflexion des rayons incidents.

Analyse à l'échelle locale

Cette analyse vise à étudier le confort thermique dans les espaces extérieurs de chacun des quartiers sur les points d'intérêt précédemment précisés. Les simulations réalisées avec le modèle Solène Microclimat ont permis de calculer les valeurs d'UTCI pour chacun de ces points. L'UTCI (Universal Thermal Climate Index) compile les différentes données climatiques pour fournir une indication sur le confort thermique : une température ressentie équivalente (voir chapitre 10.1).

Afin de rendre cette donnée compréhensible par tous, il a été convenu d'utiliser l'échelle de confort thermique ci-dessous permettant de faire correspondre les résultats d'UTCI aux données de stress thermique obtenu sur le profil journalier à la suite de la période de modélisation considérée dans le cadre de cette étude.

UTCI (°C) range	Stress Category
above +46	extreme heat stress
+38 to +46	very strong heat stress
+32 to +38	strong heat stress
+26 to +32	moderate heat stress
+9 to +26	no thermal stress
+9 to 0	slight cold stress
0 to -13	moderate cold stress
-13 to -27	strong cold stress
-27 to -40	very strong cold stress
below -40	extreme cold stress

Figure 115 : Echelle de classement de l'UTCI en termes de stress thermique

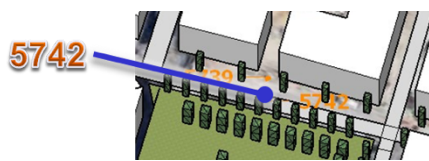
En utilisant cette grille de correspondance, il est ainsi possible de renseigner, en pourcentage, pour chacun des points et pour l'ensemble des scénarios les périodes de la journée soumises aux différentes catégories de stress thermique.

Par ailleurs, les simulations effectuées avec le logiciel EnviBatE permettent de préciser les besoins énergétiques en climatisation en fonction du bâtiment dans le quartier et en fonction de l'étage considéré.

Quartier de la Buire

Les premiers résultats présentés retranscrivent les informations relatives au confort thermique au niveau de deux localités de l'espace extérieur dans le quartier.

Localité 5742 :



	Sc. VEGETATION	Sc. ALBEDO	Sc. EAU	Sc. OPTIMISE
Heures gagnées Stress Fort → Stress Modéré	1	1	1	1
Heures gagnées Stress Modéré → Sans Stress	-3	0	0	-2
Gain moyen de confort (UTCI) entre 9 et 16h (°C)	0,57	-0,20	-0,54	1,02

Tableau 34 : Gain d'UTCI, point 5742

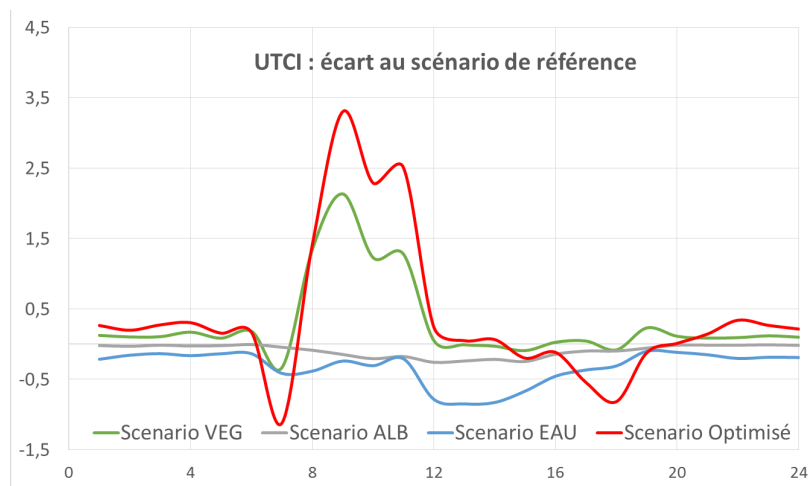
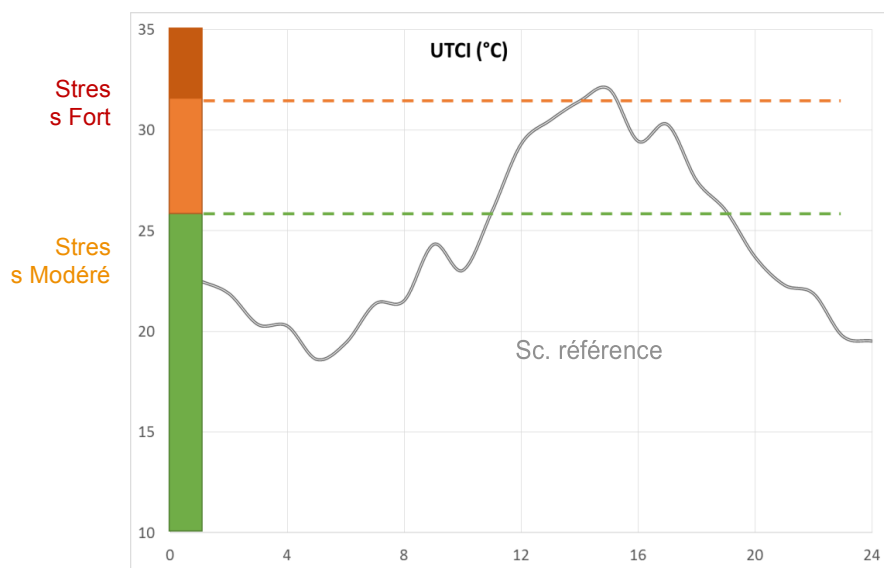


Figure 116 : UTCI au Point 5742 : scénario de référence et différence avec les différents scénarios (REF-Scénario)

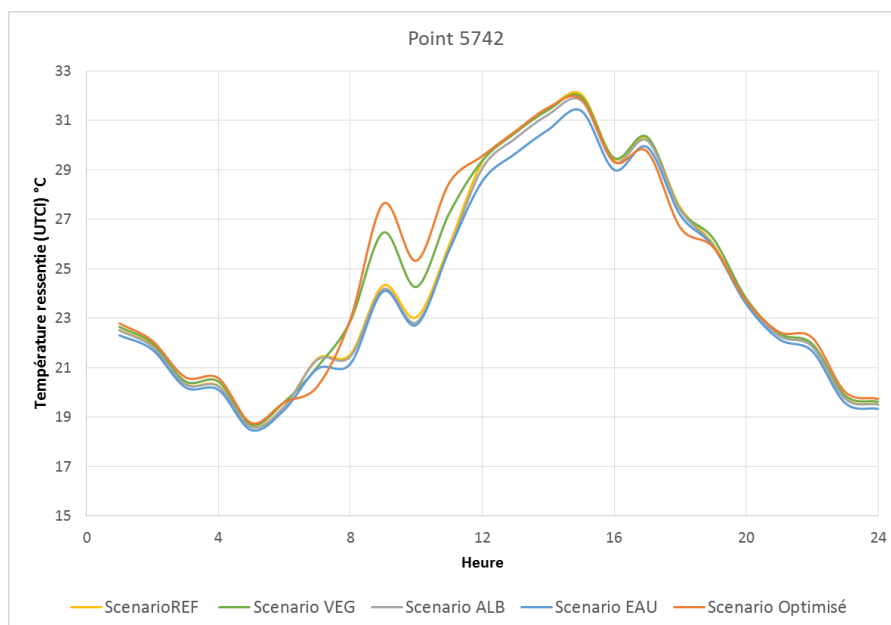


Figure 117 : Valeurs d'UTCI, point 5742 : ensemble des courbes

Localité 5739 :



	Sc. VEGETATION	Sc. ALBEDO	Sc. EAU	Sc. OPTIMISE
Heures gagnées Stress Fort → Stress Modéré	0	0	0	0
Heures gagnées Stress Modéré → Sans Stress	0	0	0	0
Gain moyen de confort (UTCI) entre 9 et 16h (°C)	-0,40	0,21	-0,04	-0,23

Tableau 35 : Gain d'UTCI, point 5739

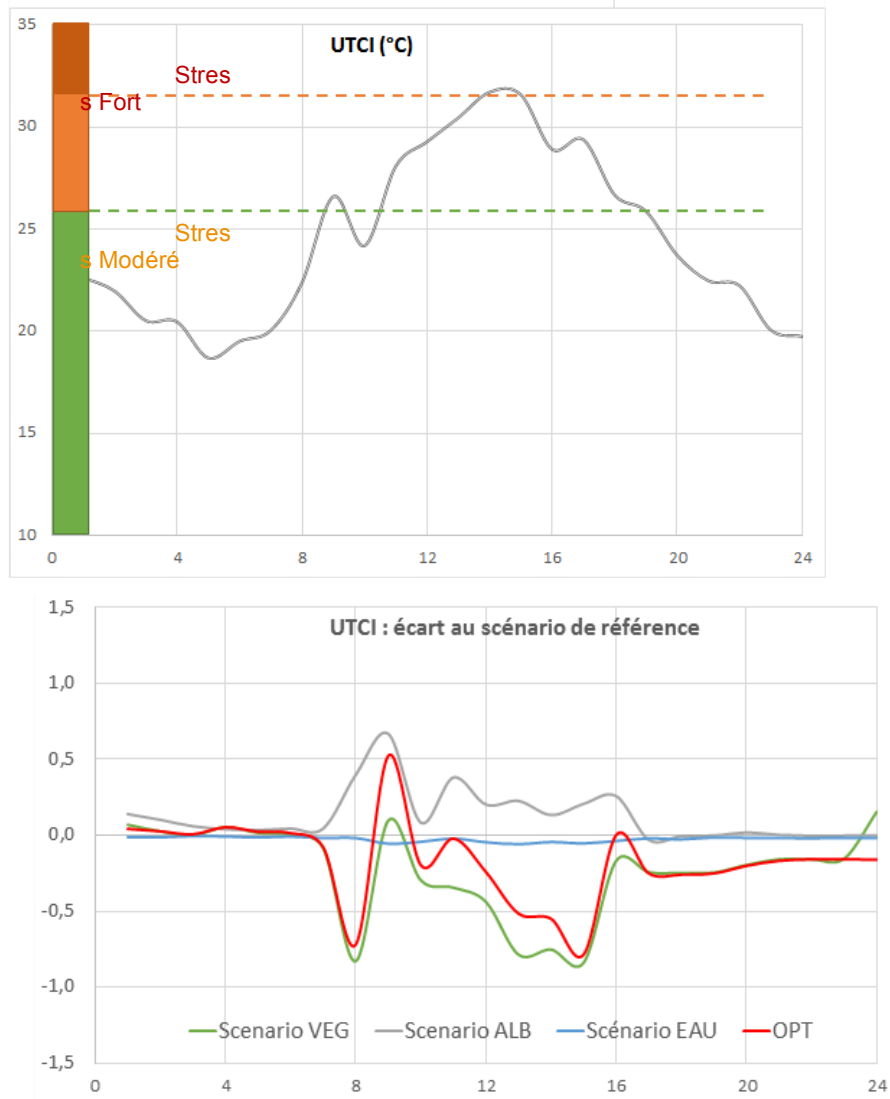


Figure 118 : UTCI au Point 5739 : scénario de référence et différence avec les différents scénarios (REF-Scénario)

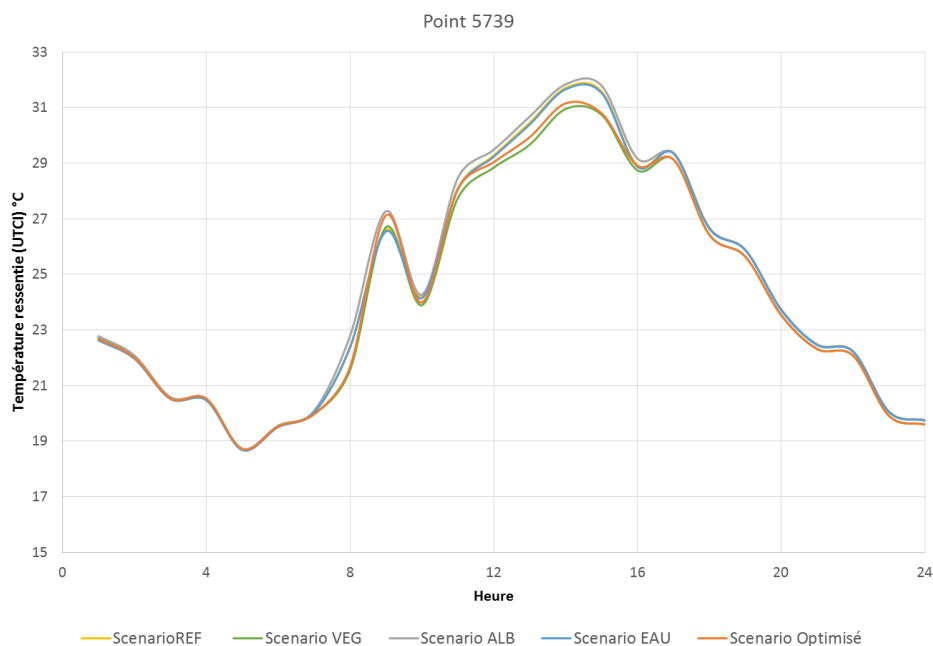


Figure 119 : Valeurs d'UTCI, point 5739 : ensemble des courbes

Ces résultats permettent de montrer que les différentes solutions de rafraîchissement impactent effectivement la température et la notion de confort thermique. En fonction de la localité dans le quartier et sur le trottoir, la végétation peut participer à une baisse de confort (point 5742) ou à une augmentation de celui-ci (point 5742). Cet effet très localisé peut notamment s'expliquer par une baisse de circulation du vent sur le quartier, dû à des arbres plus massifs dans le cas des scénarios végétations et optimisés.

La modification de l'albédo des revêtements peut avoir un effet négatif sur le confort à proximité immédiate des parois (point 5739), à cause d'une plus grande réflexion solaire des parois, ou un effet quasi nul si l'on s'éloigne de celles-ci (point 5742).

A contrario, l'humidification des chaussées diminue le stress thermique ressenti sur une journée caniculaire pour ces deux points, avec un effet plus important pour le point 5742, situé plus près de la chaussée.

L'humidification de la chaussée est la solution qui, quelle que soit la localité au sein du quartier, permet d'améliorer le confort thermique.

Quartier de la Buire

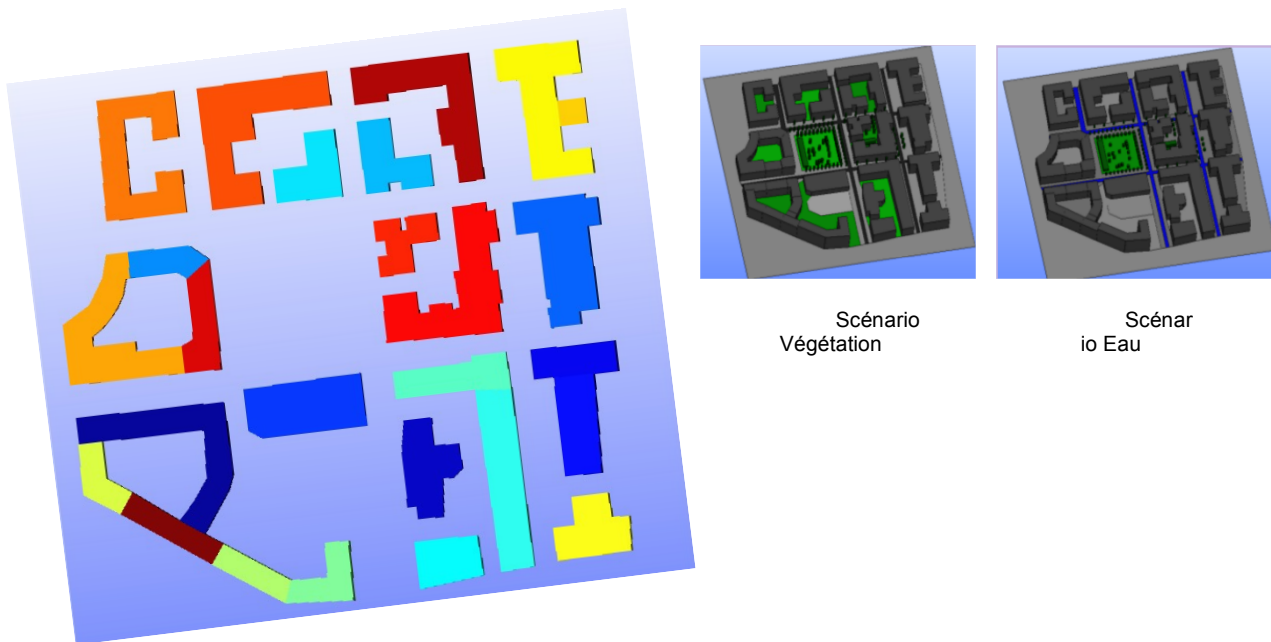


Figure 120 : Localisation des bâtiments – Quartier de la Buire

L'analyse locale s'accompagne des résultats de la simulation fournie par le logiciel EnviBatE permettant de renseigner les variations de consommation énergétique en climatisation pour chaque bâtiment.

Indice du Bâtiment	Nombre d'étages du bâtiment	Consommation estivale du scénario de référence (M Wh)	Gain d'énergie sur le bâtiment par scénario (en % par rapport au scénario de référence)			
			scénario Albédo	scénario Végétation	scénario Eau	scénario Optimisé
0	7	1 083	1,78%	0,71%	0,44%	1,57%
1	5	241	1,92%	0,53%	0,33%	1,71%
2	9	296	1,04%	0,25%	0,22%	1,11%
3	9	459	1,23%	0,16%	0,16%	28%
4	4	281	2,40%	0,93%	0,50%	2,85%
5	10	1 083	0,96%	0,49%	0,39%	1,10%
6	7	174	1,80%	0,99%	0,31%	1,56%
7	7	317	1,43%	1,46%	0,53%	2,33%
8	7	293	1,28%	1,29%	0,24%	1,92%
9	8	289	1,96%	0,57%	0,53%	1,95%
10	7	557	2,34%	0,70%	0,40%	1,96%
11	7	306	1,53%	0,32%	0,01%	1,82%
12	12	440	0,75%	0,15%	-0,04%	0,61%
13	12	296	0,65%	0,08%	-0,10%	0,52%

14	10	270	1,52%	0,58%	0,38%	1,25%
15	9	422	1,17%	0,26%	0,27%	1,20%
16	7	809	1,54%	0,59%	0,59%	1,54%
17	7	76	1,72%	0,50%	0,49%	1,72%
18	7	817	1,56%	0,64%	0,62%	1,63%
19	7	965	1,58%	0,64%	0,48%	1,45%
20	7	007	1,28%	0,73%	0,35%	1,35%
21	7	249	1,45%	3,62%	0,60%	4,39%
22	7	887	1,32%	1,65%	0,50%	2,54%
23	8	334	1,24%	1,33%	0,20%	1,73%
24	7	918	1,30%	0,54%	0,39%	1,46%
25	10	321	1,34%	0,17%	0,15%	1,32%
		Somme	Moyenne :			
		13 188	1,39%	0,70%	0,32%	1,58%

Tableau 36 : Consommation énergétique et gain des scénarios- Bâtiments du quartier de la Buire

- Les trois solutions de rafraîchissement étudiées participent à une réduction de la consommation énergétique au sein des bâtiments.
- La végétation a moins d'effet sur la réduction de consommation énergétique liée à la climatisation sur l'ensemble des bâtiments du quartier que la modification de l'albédo des revêtements. Ceci s'explique par le fait que le scénario de végétation de la Buire se traduit uniquement par l'augmentation de la végétation dans les espaces en pleine terre sans aucun ajout de nouvelle végétalisation au niveau des bâtiments.
- La réduction de la consommation énergétique est variable en fonction des bâtiments, dépendant tant de l'emplacement, de l'orientation et de l'environnement immédiat, notamment lié à l'ombrage apporté par des bâtiments voisins. La végétation a un impact positif prononcé sur les bâtiments 21 et 22, davantage que la solution albédo. Cela est lié à la proximité immédiate de ces bâtiments avec le square centrale entièrement végétalisé. La modification d'albédo sur les bâtiments 4 et 10 entraîne une plus importante réduction de la consommation énergétique. Cela s'explique par une forte exposition solaire (peu de masque et/ou une grande surface exposée) et malgré une faible consommation dans l'absolu, le gain est fort avec une augmentation de l'albédo sur ces surfaces très exposées.

La simulation a également permis d'évaluer la variation de consommation énergétique par étage de bâtiment (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Indice d'étage	Nombre d'étages sur le quartier	Gain d'énergie par étage des scénarios (en % par rapport au scénario de référence)			
		scénario Albédo	scénario Végétation	scénario Eau	scénario Optimisé
1	26	3,84%	2,24%	1,40%	4,07%
2	26	1,32%	0,87%	0,25%	1,67%
3	26	0,91%	0,76%	0,16%	1,31%

4	26	0,80%	0,60%	0,13%	1,13%
5	25	0,76%	0,41%	0,13%	0,92%
6	24	0,74%	0,27%	0,15%	0,78%
7	24	1,67%	0,28%	0,21%	1,68%
8	10	0,76%	0,13%	0,09%	0,75%
9	8	1,20%	0,12%	0,09%	1,19%
10	5	1,54%	0,20%	0,16%	1,53%
11	2	-0,23%	0,03%	-0,02%	-0,24%
12	2	1,87%	0,04%	-0,01%	1,87%

Tableau 37 : Consommation énergétique et gain des scénarios- Par étage des bâtiments de la Buire

- C'est au niveau du premier étage que les solutions de végétation sur le quartier de la Buire participent à une plus importante réduction des besoins en climatisation. Cela s'explique par la végétalisation importante en pied de bâtiment. En revanche, cette solution de rafraîchissement n'a que très peu d'impact positif sur les étages supérieurs. Ceci s'explique par l'absence de végétation sur les façades et sur les toits dans le cadre de la simulation réalisée.
- De même c'est uniquement au niveau du premier étage que les solutions d'humidification ont un impact positif sur la consommation électrique, mais celui-ci est plus faible que pour la végétalisation
- Le changement d'albédo des revêtements de chaussées a davantage d'effet positif sur la réduction des besoins en climatisation pour les premiers étages des bâtiments. De même, la modification de l'albédo de la toiture permet une réduction des besoins en énergie au niveau du dernier étage.

La solution de rafraîchissement par modification d'albédo a davantage d'effet sur la réduction des besoins énergétiques en climatisation sur le quartier de la Buire.

Quartier de la place de Francfort

Les premiers résultats présentés retranscrivent les informations relatives au confort thermique au niveau de trois localités de l'espace extérieur dans le quartier.



	Sc. VEGETATION	Sc. ALBEDO	Sc. EAU	Sc. OPTIMISE
Heures gagnées Stress Fort → Stress Modéré	0	0	0	0
Heures gagnées Stress Modéré → Sans Stress	2	0	1	2
Gain moyen de confort (UTCI) entre 9 et 16h (°C)	-1,56	0,16	-0,88	-1,63

Tableau 38 : Gain d'UTCI, point 113

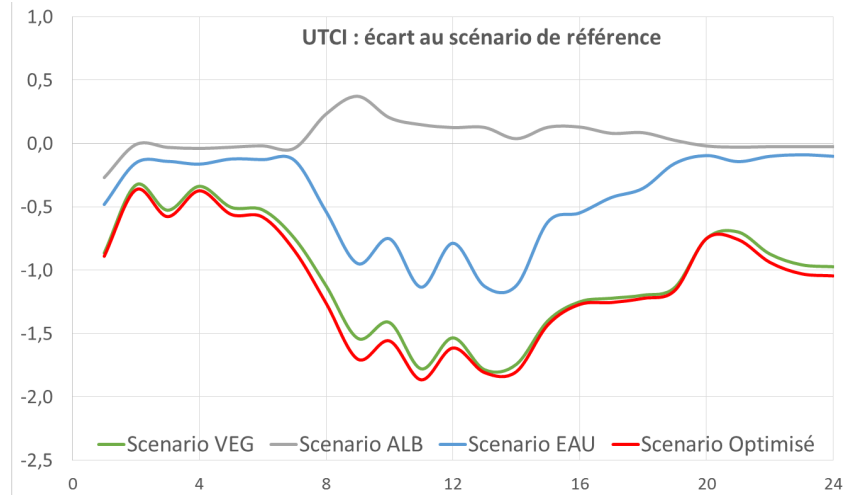
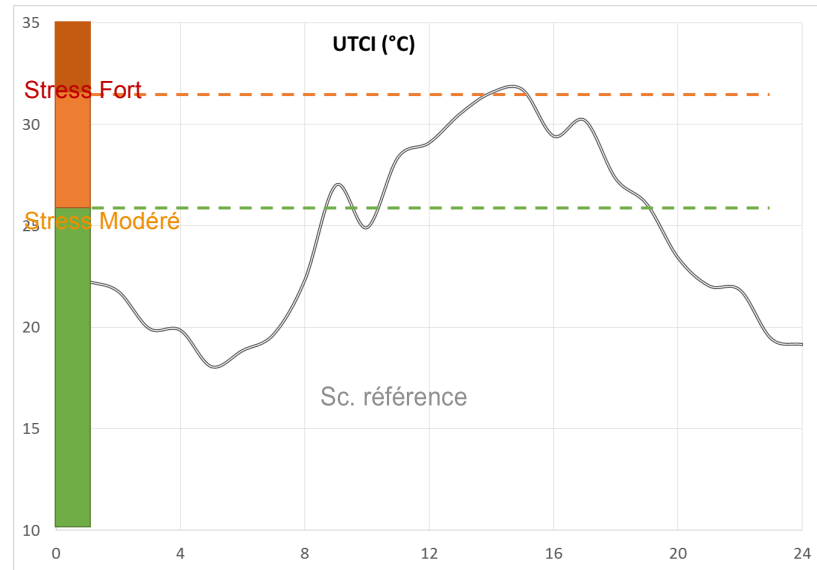


Figure 121 : UTCI au Point 113 : scénario de référence et différence avec les différents scénarios (REF-Scénario)

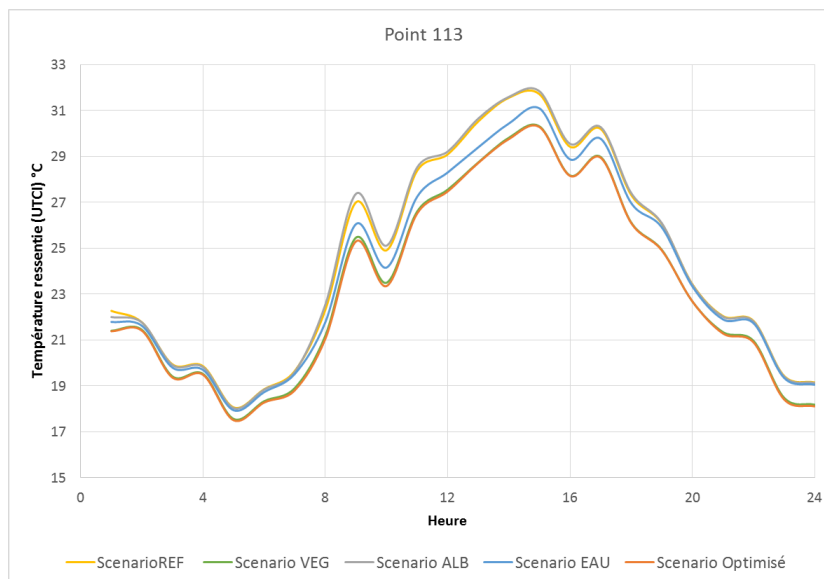
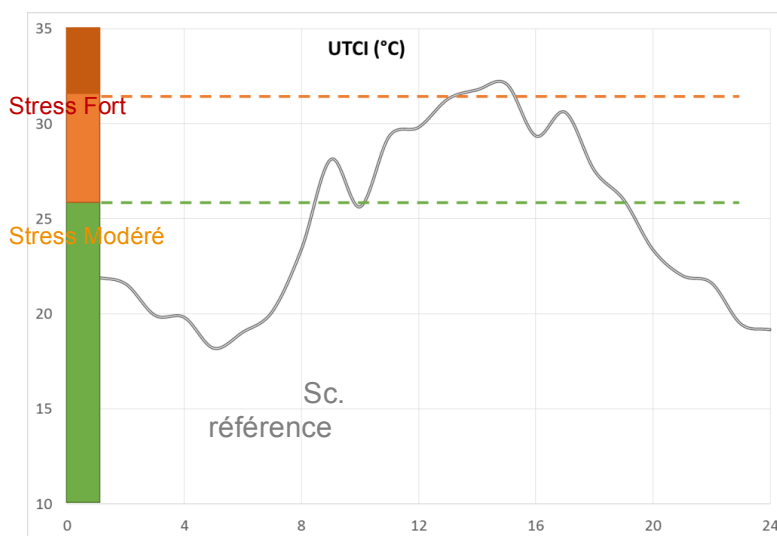


Figure 122 : Valeurs d'UTCI, point 113 : ensemble des courbes



	Sc. VEGETATION	Sc. ALBEDO	Sc. EAU	Sc. OPTIMISE
Heures gagnées Stress Fort → Stress Modéré	0	0	1	1
Heures gagnées Stress Modéré → Sans Stress	0	0	0	0
Gain moyen de confort (UTCI) entre 9 et 16h (°C)	-0,26	-0,01	-0,27	-0,66

Tableau 39 : Gain d'UTCI, point 364



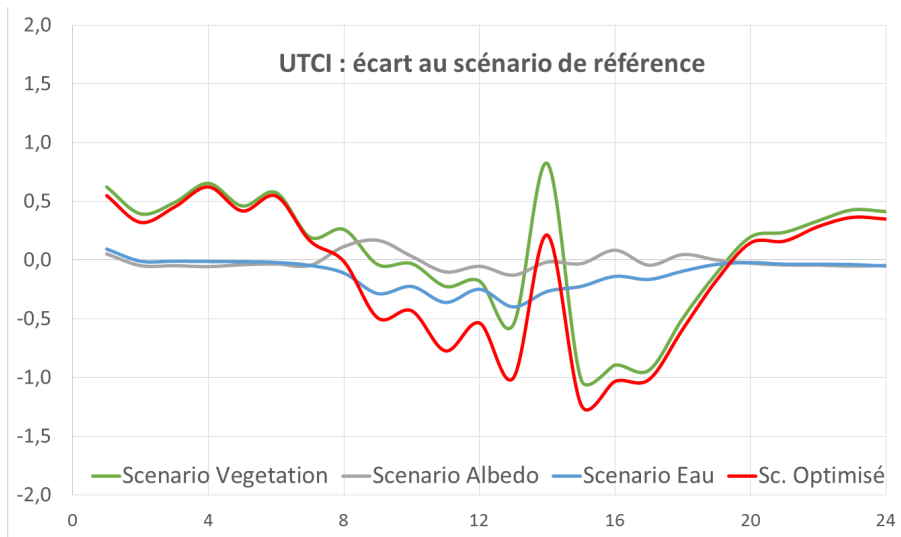


Figure 123 : UTCl au Point 364 : scénario de référence et différence avec les différents scénarios (REF-Scénario)

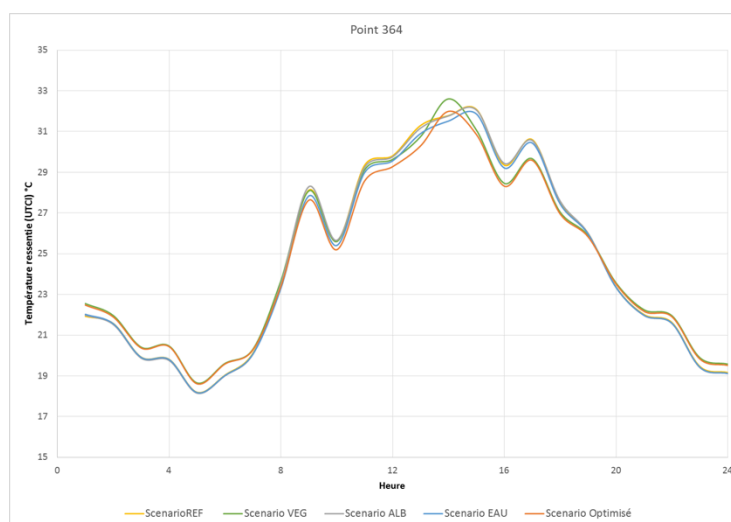


Figure 124 : Valeurs d'UTCl, point 364 : ensemble des courbes



	Sc. VEGETATION	Sc. ALBEDO	Sc. EAU	Sc. OPTIMISE
Heures gagnées Stress Fort → Stress Modéré	2	1	2	2
Heures gagnées Stress Modéré → Sans Stress	0	0	0	0
Gain moyen de confort (UTCl) entre 9 et 16h (°C)	-1,96	-0,04	-1,35	-2,05

Tableau 40 : Gain d'UTCl, point 401

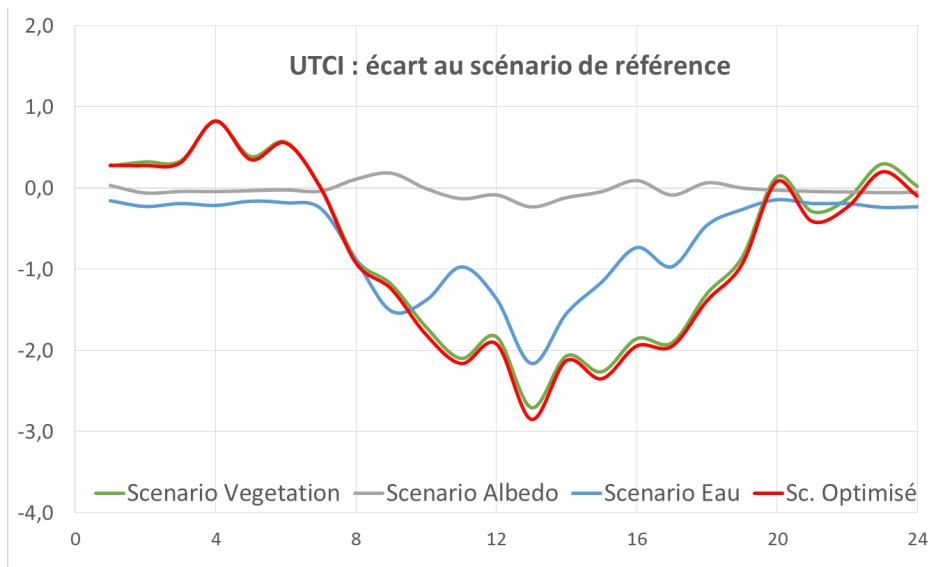
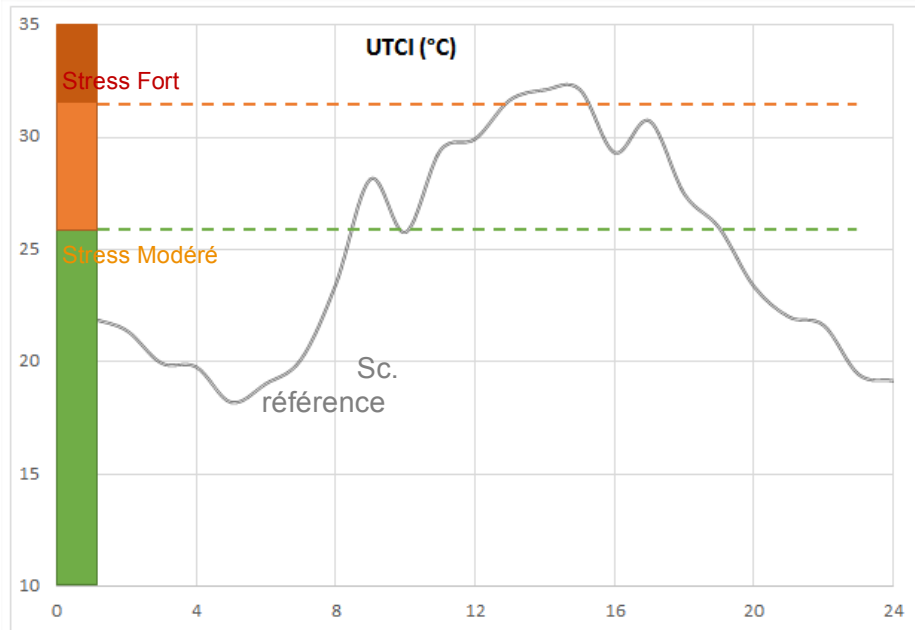


Figure 125 : UTCI au Point 401 : scénario de référence et différence avec les différents scénarios (REF-Scénario)

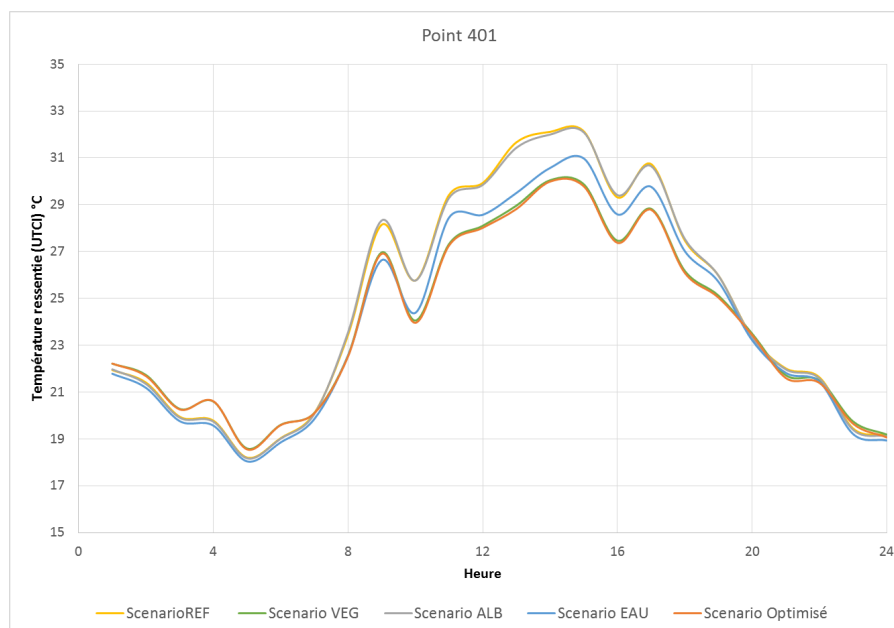


Figure 126 : Valeurs d'UTCI, point 401, ensemble des courbes

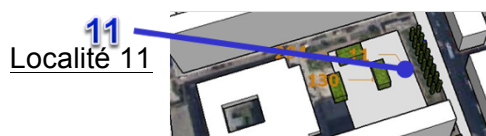
Quelle que soit la localité au sein du quartier, les solutions de végétalisation et d'humidification de la chaussée participent à réduire le nombre d'heures de stress thermique sur la journée et permettent une réduction de l'UTCI moyen sur la période de la journée s'étalant entre 9 et 16h.

On observe encore une fois que la végétation peut ponctuellement avoir un effet négatif sur le confort, à cause des effets de réduction de circulation d'air notamment.

En revanche, le changement d'albédo des façades et toitures a un effet assez neutre (voire légèrement négatif) sur le confort thermique sur la période de la journée considérée.

Quartier des barres Moncey

Les premiers résultats présentés retranscrivent les informations relatives au confort thermique au niveau de trois localités de l'espace extérieur dans le quartier.



	Sc. VEGETATION	Sc. ALBEDO	Sc. EAU	Sc. OPTIMISE
Heures gagnées Stress Fort → Stress Modéré	1	0	1	1
Heures gagnées Stress Modéré → Sans Stress	4	1	1	4
Gain moyen de confort (UTCI) entre 9 et 16h (°C)	-2,52	-0,09	-1,37	-2,72

Tableau 41 : Gain d'UTCI, point 11

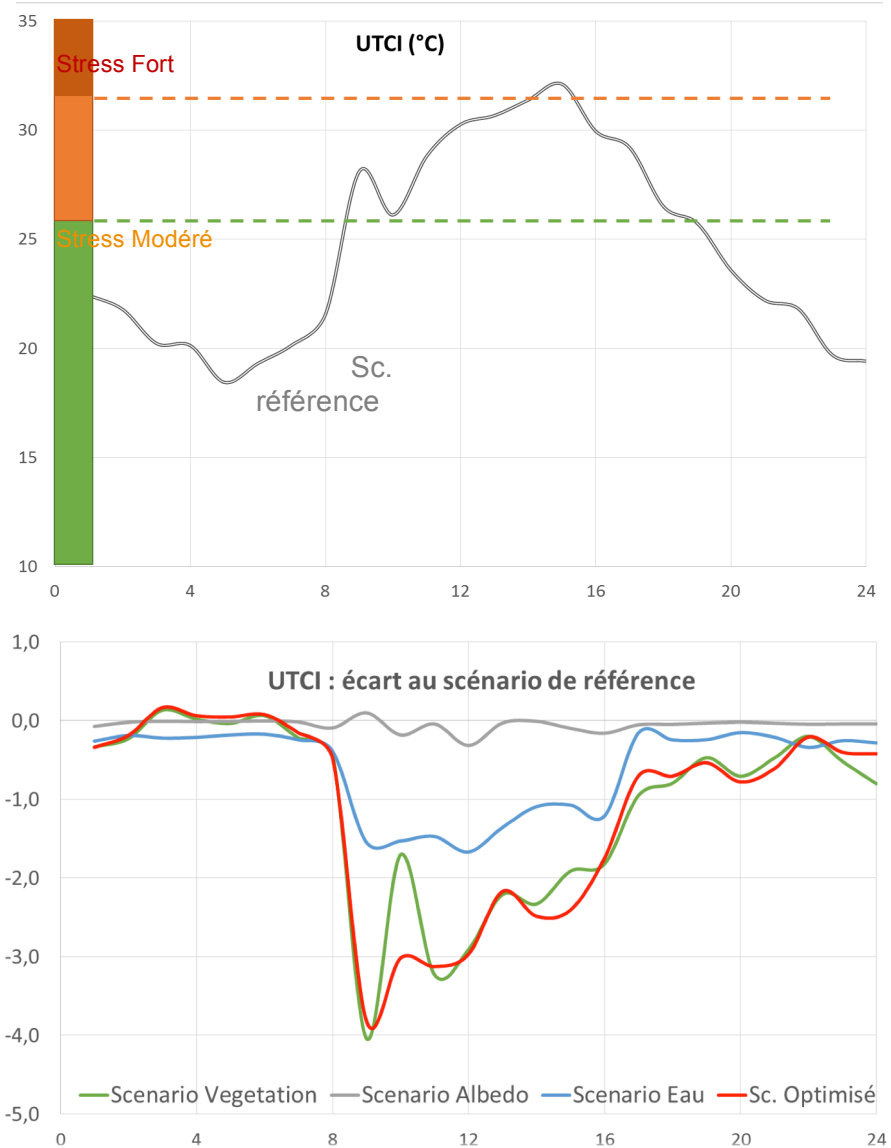


Figure 127 : UTCI au Point 11 - scénario de référence et différence avec les différents scénarios (REF-Scénario)

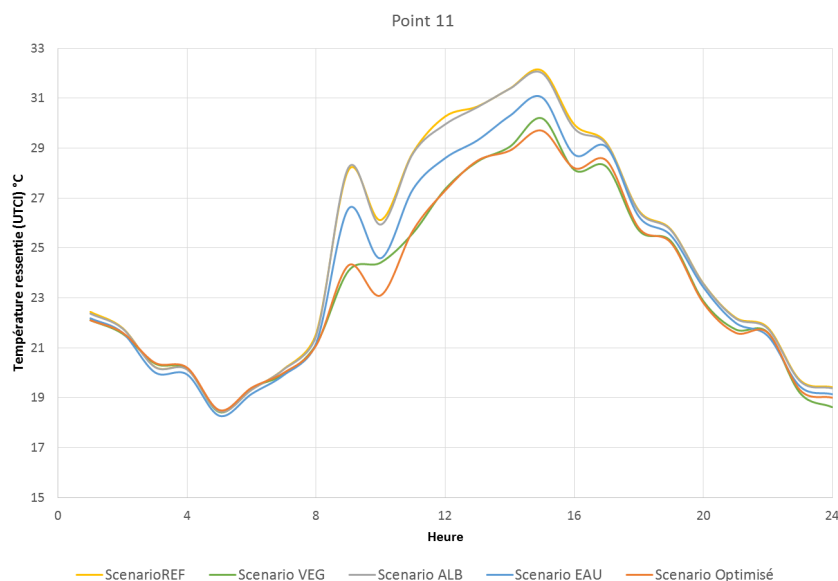
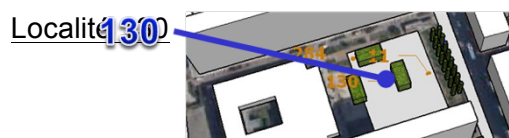


Figure 128 : Valeurs d'UTCI, point 11, ensemble des courbes

A cet emplacement, la végétalisation apporte davantage d'amélioration du confort thermique en réduisant de plus de 2 degrés la température moyenne sur la période journalière et en réduisant fortement le nombre d'heures soumises à du stress thermique fort et modéré. Cela s'explique par l'apport à la fois de l'abaissement de la température de surface par la couverture enherbée et l'abaissement de la température de l'air favorisé par la présence d'arbres, offrant une biomasse importante au niveau de cette zone.

L'humidification de la chaussée, du fait du point qui se trouve sur la zone humidifiée a également un impact sur l'amélioration du confort thermique pour une journée caniculaire (environ la moitié du gain de la végétalisation).

Le changement d'albédo est neutre en termes de confort thermique.



	Sc. VEGETATION	Sc. ALBEDO	Sc. EAU	Sc. OPTIMISE
Heures gagnées Stress Fort → Stress Modéré	1	1	1	1
Heures gagnées Stress Modéré → Sans Stress	1	0	0	0
Gain moyen de confort (UTCI) entre 9 et 16h (°C)	-1,59	0,11	-0,98	-1,70

Tableau 42 : Gain d'UTCI, point 130

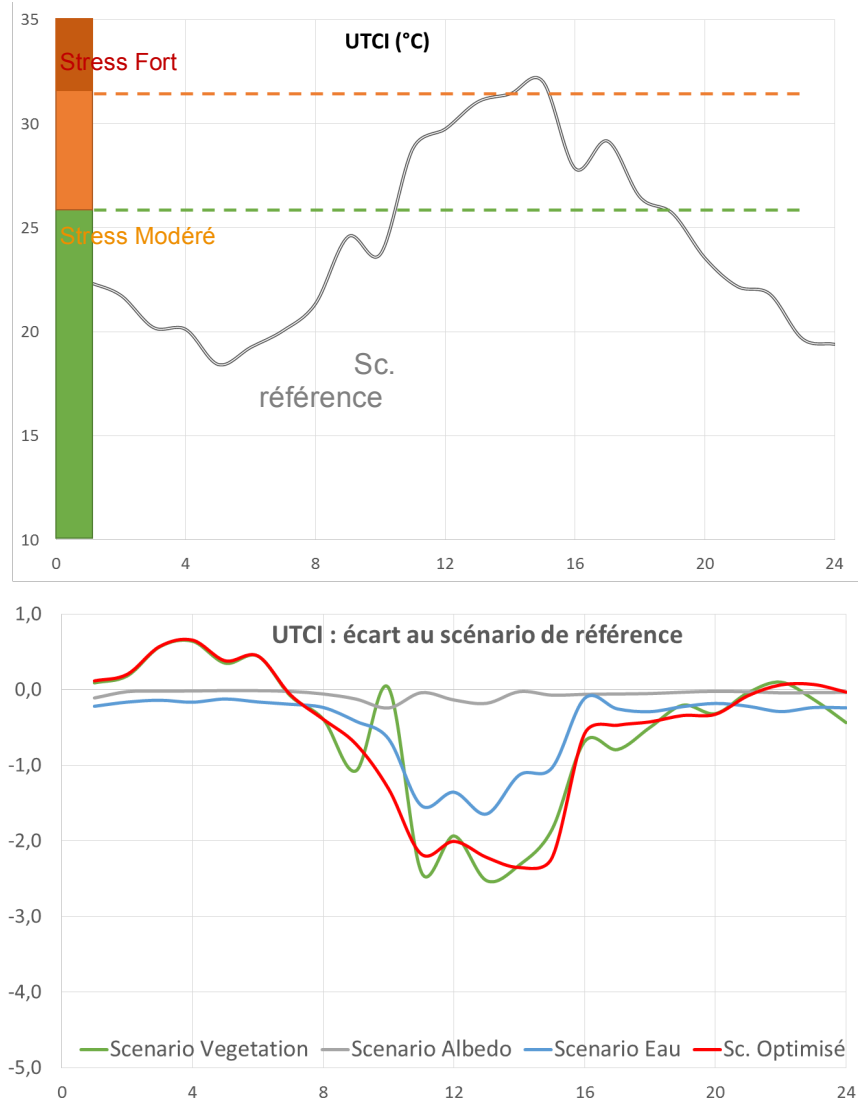


Figure 129 : UTCI au Point 130, scénario de référence et différence avec les différents scénarios (REF-Scénario)

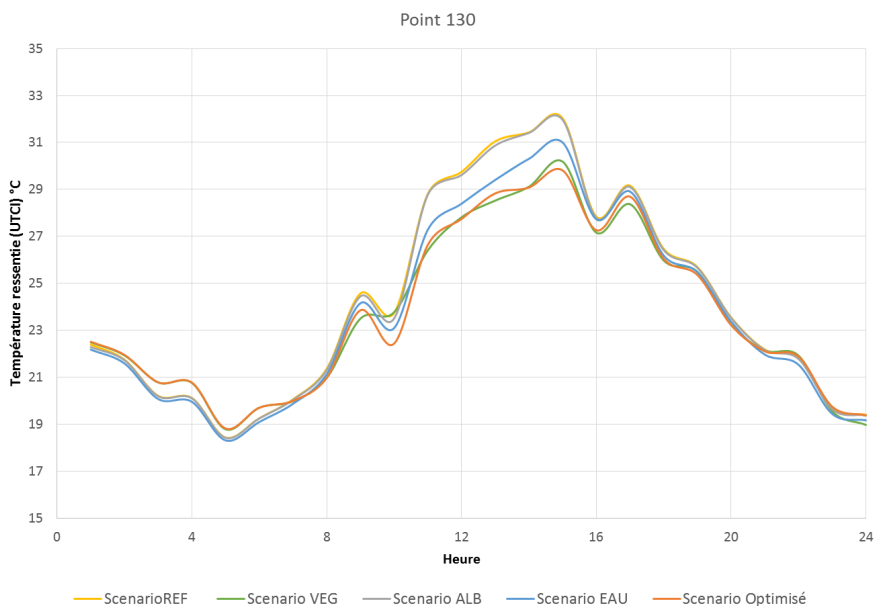


Figure 130 : Valeurs d'UTCI, point 130, ensemble des courbes

Au niveau du point 130, la végétalisation a également un effet intéressant sur le confort thermique en abaissant l'UTCI moyen entre 9h et 16h d'1.5 °C

Là encore, l'humidification de la voirie a un effet moindre mais tout de même positif sur le confort en ce point.

Localité 284



	Sc. VEGETATION	Sc. ALBEDO	Sc. EAU	Sc. OPTIMISE
Heures gagnées Stress Fort → Stress Modéré	1	0	1	1
Heures gagnées Stress Modéré → Sans Stress	0	0	0	0
Gain moyen de confort (UTCI) entre 9 et 16h (°C)	-0,90	-0,02	-0,56	-1,17

Tableau 43 : Gain d'UTCI, point 284

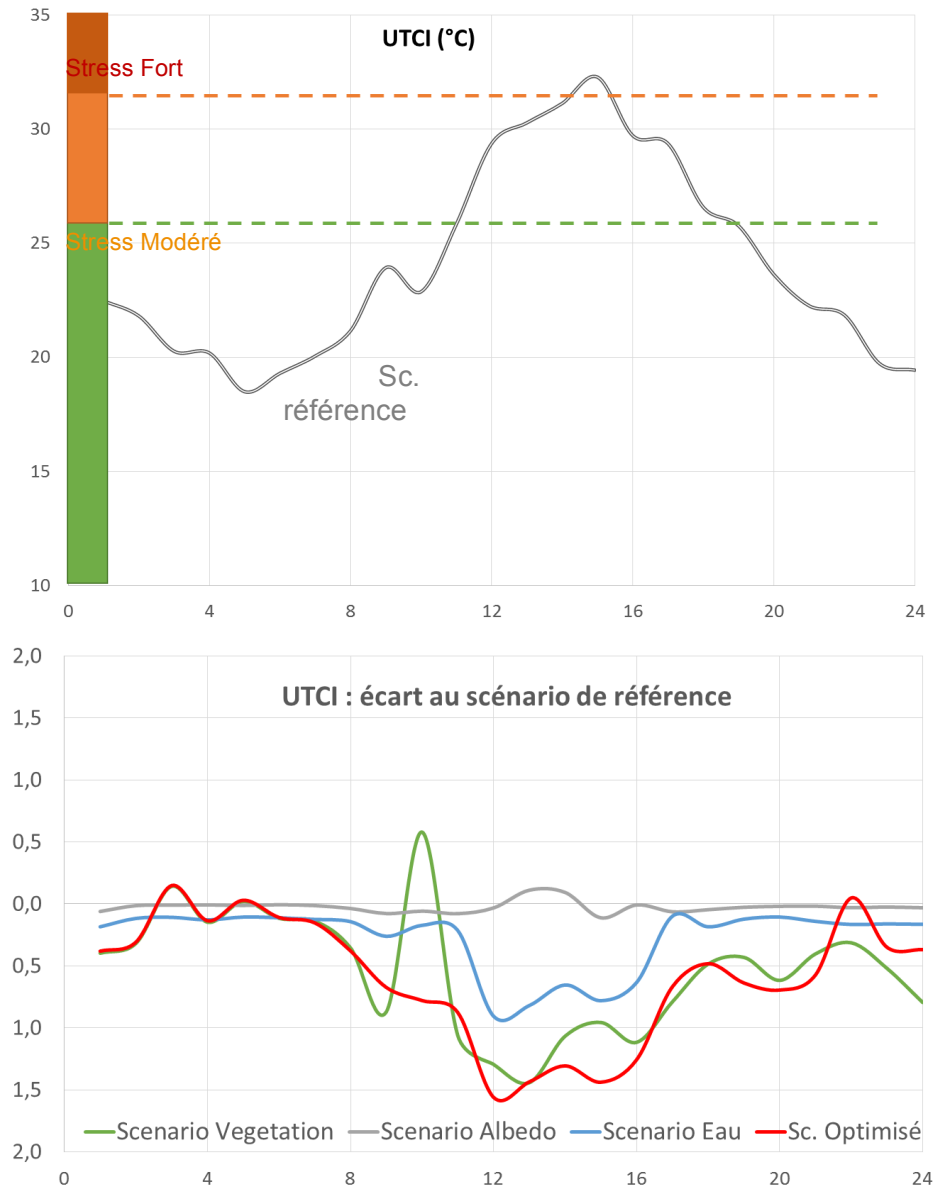


Figure 131 : UTCI au Point 284, scénario de référence et différence avec les différents scénarios (REF-Scénario)

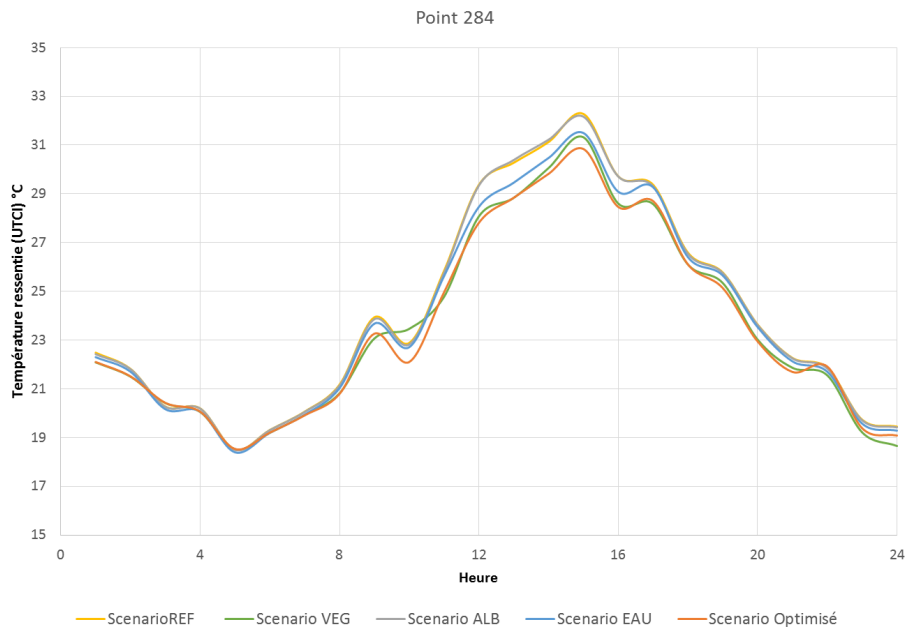


Figure 132 : Valeurs d'UTCI, point 284, ensemble des courbes

Pour les 3 points étudiés, la solution de végétalisation est la plus efficace et permet d'améliorer de façon significative le confort thermique sur la place centrale du quartier. Une végétalisation avec différentes strates, à la fois herbacée et arbustive, permet d'augmenter les bienfaits sur le confort extérieur.

En cas d'impossibilité de végétalisation, l'humidification du sol permet un gain moindre mais significatif de confort.

L'analyse locale s'accompagne des résultats de la simulation fournie par le logiciel EnviBatE permettant de renseigner les consommations énergétiques au niveau des différents bâtiments du quartier et de chaque étage.

Quartier des barres Moncey

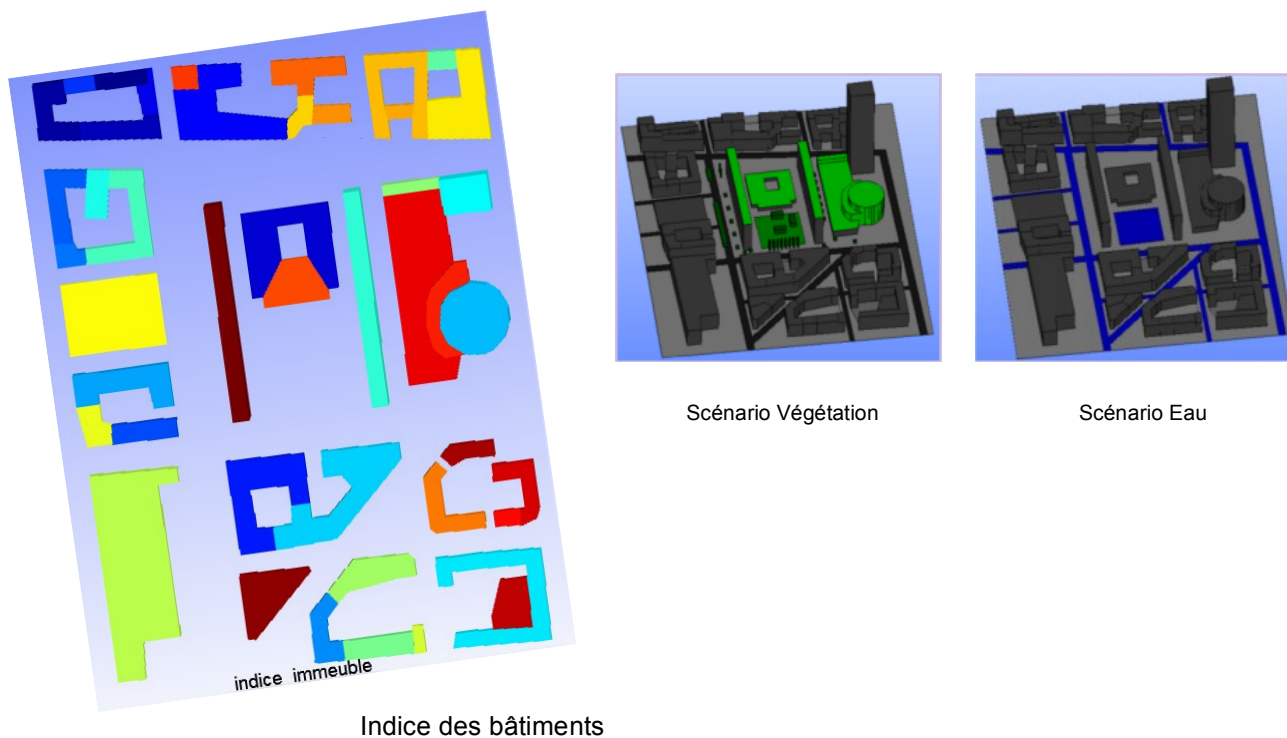


Figure 133 : Résultats d'EnviBatE utilisés

La simulation réalisée sur le quartier permet, de façon similaire à celle réalisée sur le quartier de la Buire, d'affirmer que le besoin en climatisation dépend de l'emplacement des bâtiments.

Les bâtiments 0, 3, 4, 21, 25, 27 et 35 semblent particulièrement profiter du changement d'albédo des façades et des toits, permettant ainsi de réduire considérablement les besoins énergétiques en climatisation.

La végétalisation du site impactent positivement essentiellement les bâtiments 3 et 35 pour lesquelles la toiture est végétalisée.

De façon générale, la modification de l'albédo apparaît être une solution plus intéressante pour réduire les besoins énergétiques en climatisation dans les bâtiments.

Indice Bâtiment	du	Nombre d'étages bâtiment	du	Consommation estivale scénario de référence (M Wh)	Gain d'énergie sur le bâtiment par scénario (en % par rapport au scénario de référence)			
					scénario Albédo	scénario Végétation	scénario Eau	scénario Optimisé
0		4		30	11,18%	0,30%	0,33%	11,51%
1		10		310	3,82%	0,17%	0,07%	3,90%
2		8		157	7,29%	0,32%	0,34%	7,68%
3		2		150	17,75%	6,12%	0,43%	10,58%
4		1		4	37,29%	0,55%	1,29%	38,44%
5		7		576	8,48%	0,30%	0,24%	8,70%
6		7		644	8,81%	0,22%	0,12%	8,96%
7		4		23	8,57%	0,08%	0,14%	8,72%
8		8		244	5,30%	0,34%	0,20%	5,68%
9		8		203	7,15%	0,15%	0,11%	7,28%
10		8		69	1,20%	0,37%	0,10%	1,33%
11		7		180	8,77%	0,15%	0,12%	8,87%
12		8		391	4,38%	0,42%	0,11%	4,60%
13		12		969	4,18%	0,77%	0,04%	1,17%
14		7		760	8,92%	0,44%	0,17%	9,10%
15		8		1 522	4,96%	0,11%	0,07%	5,01%
16		18		719	1,45%	0,46%	0,02%	1,67%
17		6		84	9,11%	0,14%	0,20%	9,37%
18		17		1 763	3,45%	1,10%	0,05%	3,06%
19		8		588	4,75%	0,34%	0,06%	4,95%
20		7		51	5,07%	0,19%	0,04%	5,07%
21		7		147	13,15%	0,16%	0,08%	13,20%
22		6		69	4,03%	2,18%	0,11%	2,06%
23		6		187	10,11%	0,17%	0,20%	10,29%
24		9		2 086	4,90%	0,11%	0,14%	5,06%

25	6	31	17,22%	0,18%	0,19%	17,36%
26	8	94	5,55%	0,16%	0,15%	5,77%
27	2	155	19,85%	1,78%	0,80%	21,85%
28	8	476	8,06%	0,11%	0,04%	8,08%
29	7	125	4,39%	0,54%	0,08%	4,45%
30	6	477	8,66%	0,11%	0,07%	8,67%
31	6	26	8,45%	0,17%	0,13%	8,49%
32	5	74	6,56%	0,32%	0,20%	6,72%
33	7	354	2,49%	0,13%	0,10%	2,57%
34	6	140	6,30%	0,11%	0,10%	6,35%
35	2	51	17,24%	6,90%	0,72%	10,73%
36	5	37	9,31%	0,20%	0,17%	9,46%
37	8	454	4,18%	1,32%	0,05%	1,71%
38	7	62	2,10%	0,10%	0,19%	2,28%
39	4	651	9,94%	3,02%	0,11%	6,24%
40	10	412	1,40%	0,18%	0,07%	1,50%
41	6	158	5,75%	0,08%	0,06%	5,79%
42	7	116	2,14%	0,37%	0,12%	2,37%
43	6	175	10,94%	0,16%	0,39%	11,31%
44	17	1 764	3,55%	1,29%	0,06%	3,24%
		Somme	Moyenne :			
		17 760	1,39%	0,70%	0,32%	1,58%

Tableau 44 : Consommation énergétique et gain des scénarios- Bâtiments du quartier Moncey

Si l'on considère une analyse plus fine, il est possible d'illustrer des actions différentes des solutions de rafraîchissement en fonction des étages des différents bâtiments.

Gain d'énergie par étage des scénarios (en % par rapport au scénario de référence)					
Indice d'étage	Nombre d'étages sur le quartier	scénario Albédo	scénario Végétation	scénario Eau	scénario Optimisé
1	45	5,63%	0,55%	0,32%	5,99%

2	44	4,05%	0,73%	0,20%	3,69%
3	41	1,99%	0,25%	0,12%	2,06%
4	41	3,66%	0,46%	0,10%	3,38%
5	38	3,91%	0,26%	0,08%	3,88%
6	36	10,78%	0,45%	0,08%	10,50%
7	27	12,33%	0,35%	0,07%	12,28%
8	17	16,12%	0,70%	0,06%	15,41%
9	7	5,29%	0,29%	0,02%	5,15%
10	6	6,35%	0,32%	0,02%	6,12%
11	4	2,46%	0,66%	0,01%	1,63%
12	4	7,44%	2,75%	0,01%	3,80%
13	3	1,59%	0,45%	0,00%	1,90%
14	3	1,61%	0,47%	0,00%	1,89%
15	3	1,84%	0,57%	0,00%	1,98%
16	3	3,35%	1,16%	0,00%	2,57%
17	3	14,66%	5,74%	0,00%	7,04%
18	1	1,60%	0,19%	0,00%	1,84%

Tableau 45 : Consommation énergétique et gain des scénarios- Par étage des bâtiments du quartier Moncey

Les conclusions sont similaires à celles issues de l'étude à l'échelle des bâtiments dans leur intégralité, à savoir que **la modification d'albédo des façades et des toits est une solution de rafraîchissement plus efficace que la végétalisation pour réduire les besoins en climatisation dans les logements sur le quartier des barres Moncey.**

Par ailleurs, des différences d'efficacité s'observent également en fonction de l'étage dans le bâtiment. Ainsi, nous pouvons constater que les effets positifs se font davantage ressentir sur les derniers étages, localisés directement sous la toiture.

3.11. Bilan méthodologique

Quelques points doivent être notés quant aux difficultés méthodologiques rencontrées:

- La modélisation du dispositif d'humidification a été fortement améliorée et donne des résultats satisfaisant sur la campagne ROSURE, nous n'avons cependant pas pu refaire les simulations sur la rue de la Buire pour vérifier, avec des données d'entrées semblables à celle de l'expérimental, que les températures calculées en surface et à -1cm étaient cohérentes avec les mesures. validation expérimentale soit possible, notamment avec un nœud sous la surface de la chaussée. Ces comparaisons seront réalisées pour la valorisation du modèle par la soumission d'un article à une revue scientifique.
- Malgré les avancées scientifiques dans La modélisation de la végétation urbaine à l'échelle de la ville, les simulations avec ARPS-VUC n'a n'ont pas donné les résultats pu être mise en œuvre sur la ville de Lyon dans le temps du projet. de sorte Ainsi, les simulations à petite échelle (SOLENE-microclimat et EnviBatE), pour être conduites dans les temps, ont été dû être réalisées sur la base de données ne prenant pas en compte l'effet de l'insertion urbaine des quartiers environnants comme cela était prévu. Les comparaisons se faisant en relatif, cela joue peu sur les résultats mais est cependant un point d'insatisfaction du point de vue méthodologique.
- Le choix des cas de référence n'a pas été si simple que prévu. En effet, dans l'équipe projet, nous n'entendons pas tous de la même manière cette notion de référence. Pour les chercheurs la référence est le cas qui permettra de mesurer l'impact du dispositif. Pour les opérationnels, la référence devrait être le cas actuel. En soit, cela ne devrait pas poser de problème, sauf pour la végétation, car le cas actuel comprend déjà du végétal. En prenant le cas actuel comme référence, nous calculerons donc, dans la différence entre le cas végétalisé et la référence l'effet de l'ajout de végétation et comme nous savons que les effets ne sont pas cumulatifs, nous auront des difficultés, dans ce cas, à avoir une évaluation « absolue » de l'impact du dispositif. Cependant, prendre sur ce quartier, un cas de référence sans végétal était peu réaliste et ne nous permettait pas d'avoir une simulation de l'existant alors que nous avons des mesures. Cela eut été dommage.
- La validation en terme de faisabilité des scénarios est complexe et longue du fait qu'elle implique les opérationnels de la ville de Lyon qui sont dans d'autres approches et dynamiques.
- Les évaluations en cout global et cycle de vie introduisent un nombre important d'hypothèses, qui dans des cas d' « exercice », comme ceux traités peuvent être très discutables et l'ont été lors du séminaire de restitution du projet. Dans la dynamique d'un projet réel, les scénarios, comme les hypothèses faites pour les évaluer auraient fait l'objet de négociations et compromis entre les différentes parties prenantes : Maitrise d'ouvrage, Maitrise d'œuvre et Assistance à Maitrise d'Ouvrage.

4. Valorisation

4.1. Séminaire de présentation des résultats

Les résultats du projet ont été présentés lors d'une journée organisée par les partenaires dans les locaux de Communauté urbaine de Lyon, le 23 mars 2016 <http://seminaireeva.sciencesconf.org>. 46 personnes se sont inscrites à ce séminaire, que l'on peut répartir en en une moitié de chercheurs et assimilés et une moitié d'opérationnels :

- bureaux d'étude (Burgeap, éléments-ingénierie, TRIBU, étamine)
- urbanistes (SPLA Lyon Confluence, Agence d'urbanisme de Lyon)
- chargés de mission du Grand Lyon.

Le programme était le suivant :

Mot d'accueil par Bruno Charles Vice-Président de la Métropole de Lyon en charge du développement durable et de l'agriculture

10:15 - 10:45 Présentation des enjeux de la recherche - *Marjorie MUSY et Philippe MAILLARD*

10:45 - 11:30 Présentation du pilote d'humidification et du modèle développé dans SOLENE - microclimat - *Jean-Baptiste BAILLY et Marie-Hélène AZAM*

11:30 - 12:15 Choix des sites et mise en place des scénarios - *Benjamin MORILLE et Marjorie MUSY*

12:15 - 13:45 Déjeuner

13:45 - 15:45 Résultats – *Stéphanie Zaba, Benjamin MORILLE et Adrien GROS*

15:45 - 16:15 Conclusion et réponses aux questions

Les présentations ont été ponctuées de nombreuses questions de la part des participants, ce qui a rendu le séminaire très interactif et dynamique. Ceci a permis d'enregistrer un grand nombre de retours sur les méthodes et résultats qui permettront une amélioration de leur communication.

4.2. Autres diffusions

Les premiers résultats des travaux ont été présentés à la conférence ICUC2015 :

- Gros, A., Bozonnet, E., Inard, C., Musy, M., & Calmet, I. (2015). Assessment of urban cooling strategies impact using a coupled model for urban microclimate and building energy simulation. Présenté à 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9), Toulouse (France).
- Tavares R., I. Calmet, S. Dupont (2015). Modelling the impact of green infrastructures on local microclimate within an idealized homogeneous urban canopy, 9th International Conference on Urban Climate/12th Symposium on the Urban Environment, 20-24 July 2015, Toulouse (France), 6 p.

Une présentation du projet a également été faite dans le cadre du meeting à Stockholm de la Task 51 de l'IEA auquel Marjorie Musy participait.

Enfin, un article a été soumis à SBE2016, conférence qui aura lieu en octobre.

La valorisation des résultats, sur une période de 3 ans est souvent difficile, aussi, elle continuera et les résultats devront faire l'objet de publications dans des revues internationales.

Le CEREMA, lors du séminaire de présentation des résultats a également proposé ses services pour une valorisation des résultats sous forme de guide. Cependant, compte tenu des nombreuses questions et remarques faites, il semble qu'un travail important soit à réaliser pour présenter ces résultats afin qu'ils ne soient pas utilisés sans précaution par les acteurs de l'urbanisme à l'heure actuelle très en demande de connaissances sur les questions d'adaptation climatique.

5. Conclusion / Perspective

Le travail mené nous a permis de mettre en évidence que les solutions eau et végétal permettent en général d'améliorer les conditions de confort extérieur en été. Les arbres sont les solutions les plus performantes mais peuvent aussi amener, dans certaines conditions, des situations d'inconfort du fait de la réduction de la vitesse du vent localement. Aussi, dans chaque projet, l'implantation et la densité végétale devront être regardée de près de manière de manière à profiter de l'ombrage sans créer de blocage non voulu du vent. Du point de vue des besoins énergétiques des bâtiments, les revêtements à fort albédo sont les plus performants. Dans les évaluations de coût et bilans carbonés, ils apparaissaient coûteux, mais dans le cas de bâtiments nécessitant un ravalement, le surcout est beaucoup plus faible.

Les résultats fournis sont des résultats bruts de simulation et des analyses très liées au contexte de l'étude. Il reste donc un travail important de formalisation de connaissances plus générales et de préconisations utilisables par des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre. Par ailleurs, la modélisation de la végétation est encore très grossière par manque de données précises sur les caractéristiques physiologiques de la végétation urbaine. Il semble donc nécessaire de conduire des recherches de manière à ce que ces données soient disponibles et utilisables dans des études comme la présente.

6. Références

Ali-Toudert, F., 2005. Dependence of outdoor thermal comfort on street design (PhD thesis). Meteorologischen Instituten - Universität Freiburg, Freiburg.

Asaeda, T., Ca, V.T., 1993. The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment: a numerical model. *Bound.-Layer Meteorol.* 65, 159–179.

ASHRAE, 1993. *Handbook of Fundamentals*.

Athamena, K., 2012. Modélisation et simulation des microclimats urbains : Étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers. (Ph. D. Thesis). Ecole Centrale de Nantes, Nantes.

Bertolo, L., Bourges, B., 1992. Données climatiques utilisées dans les programmes de simulation | Techniques de l'ingénieur. Tech. Ing.

Booth, T.M., 2012. Validation of a data assimilation technique for an urban wind model. The University of Utah.

Bouyer, J., 2009. Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments (Thèse de doctorat). Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.

Bouyer, J., Inard, C., Musy, M., 2011. Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energy Build.* 43, 1549–1559.

Bowker, G.E., 2004. A comparison of airflow patterns from the QUIC model and an atmospheric wind tunnel for a two-dimensional building array and a multi-city block region near the World Trade Center site. 13th Conference Appl. Air Pollut. Meteorology Air Waste Manag. Assoc.

Bozonnet, E., Belarbi, R., Allard, F., 2005. Modelling solar effects on the heat and mass transfer in a street canyon, a simplified approach. *Sol. Energy* 79, 10–24. doi:10.1016/j.solener.2004.10.007

Cengel, Y.A., Özişik, M.N., 1984. Solar radiation absorption in solar ponds. *Sol. Energy* 33, 581–591. doi:10.1016/0038-092X(84)90014-8

Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C.S.B., Grossman-Clarke, S., Loridan, T., Manning, K.W., Martilli, A., Miao, S., Sailor, D.J., Salamanca, F.P., Taha, H., Tewari, M., Wang, X., Wyszogrodzki, A.A., Zhang, C., 2011. The integrated WRF/urban modelling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *Int. J. Climatol.* 31, 273–288.

Cristofari, C., Poggi, P., Notton, G., Muselli, M., 2006. Thermal modeling of a photovoltaic module, in: *Modeling, Simulation, and Optimization*. Presented at the 6th IASTED International Conference, Gaborone Botswana, pp. 273–278.

de Brajkovich, M.S.L., 2014. Comparative life cycle assessment for green walls systems. Presented at the International Green Wall Conference, The Green Wall Centre, Staffordshire University, Stoke on Trent (UK).

Defraeye, T., Blocken, B., Carmeliet, J., 2011. An adjusted temperature wall function for turbulent forced convective heat transfer for bluff bodies in the atmospheric boundary layer. *Build. Environ.* 46, 2130–2141. doi:10.1016/j.buildenv.2011.04.013

de la Flor, F.S., Domínguez, S.A., 2004. Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on

- the performance of surrounding buildings. *Energy Build.* 36, 403–413. doi:10.1016/j.enbuild.2004.01.050
- Depecker, P., Menezo, C., Virgone, J., Lepers, S., 2001. Design of buildings shape and energetic consumption. *Build. Environ.* 36, 627–635. doi:10.1016/S0360-1323(00)00044-5
- Doya, M., Bozonnet, E., Allard, F., 2012. Experimental measurement of cool facades performance in a dense urban environment. *Energy Build.* 55, 42–50. doi:10.1016/j.enbuild.2011.11.001
- Dupont, S., Brunet, Y., 2008. Influence of foliar density profile on canopy flow: A large-eddy simulation study. *Agric. For. Meteorology* 148, 976–990.
- Dupont, S., Otte, T.L., Ching, J.K.S., 2004. Simulation of meteorological fields within and above urban and rural canopies with a mesoscale model. *Bound.-Layer Meteorol.* 113, 111–158.
- Gros, A., 2013. *Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier*. La Rochelle.
- Guyot, G.©., 1999. *Climatologie de l'environnement : Cours et exercices corrigés*, 2nd ed. Dunod.
- Hendel, M., Colombert, M., Diab, Y., Royon, L., 2014. Improving a pavement-watering method on the basis of pavement surface temperature measurements. *Urban Clim.* 10, Part 1, 189 – 200. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2014.11.002
- Hendel, M., Royon, L., 2015. The effect of pavement-watering on subsurface pavement temperatures. *Urban Clim.* 14, Part 4, 650 – 654. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2015.10.006
- Hénon, A., Mestayer, P.G., Groleau, D., Voogt, J., 2011. High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in Marseille city center during the UBL-ESCOMPTE campaign. *Build. Environ.* 46, 1747–1764.
- Hénon, A., Mestayer, P., Lagouarde, J.-P., Voogt, J., 2012a. An urban neighborhood temperature and energy study from the CAPITOUL experiment with the SOLENE model - Part 1: analysis of flux contributions. *Theor Appl Clim.* 110, 177–196. doi:DOI 10.1007/s00704-012-0615-0
- Hénon, A., Mestayer, P., Lagouarde, J.-P., Voogt, J., 2012b. An urban neighborhood temperature and energy study from the CAPITOUL experiment with the SOLENE model - Part 2: influence of building surface heterogeneities. *Theor Appl Clim.* 110, 197–208. doi:DOI 10.1007/s00704-012-0616-z
- Herb, W.R., Janke, B., Mohseni, O., Stefan, H.G., 2008. Ground surface temperature simulation for different land covers. *J. Hydrol.* 356, 327 – 343. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.04.020
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, n.d. . Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.), Geneva, Switzerland.
- Jayamaha, S.E.G., Wijesundera, N.E., Chou, S.K., 1996. Measurement of the heat transfer coefficient for walls. *Build. Environ.* 31, 399–407. doi:10.1016/0360-1323(96)00014-5
- Jentsch, M.F., James, P.A., Bourikas, L., Bahaj, A.S., 2013. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. *Renew. Energy* 55, 514–524.
- Jurges, W., 1924. *Der Wärmeübergang an einer ebenen Wand*. *Gesundheits-Ingenieur* 19.
- Kaplan, H., Dinar, N., 1996. A lagrangian dispersion model for calculating concentration distribution within a built-up domain. *Atmos. Environ.* 30, 4197–4207. doi:10.1016/1352-2310(96)00144-6
- Kastner-Klein, P., Norman, O.K., Clark, J.V., 2004. Modeling of flow and dispersion characteristics in typical urban building configurations with the fast-response model QUIC. 13th Conference Appl. Air Pollut. Meteorology Air Waste Manag. Assoc.
- Kjelgren, R., Montague, T., 1998. Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. *Atmos. Environ.* 32, 35–41.
- Lemonsu, A., Masson, V., 2002. Simulation of a summer urban breeze over Paris. *Bound.-Layer Meteorol.* 104, 463–490.

Leroyer, S., Calmet, I., Mestayer, P.G., 2010. Urban boundary layer simulations of sea-breeze over Marseille during the ESCOMPTE experiment. *Int. J. Environ. Pollut.* 40, 109–122.

Leuzinger, S., Vogt, R., Körner, C., 2010. Tree surface temperature in an urban environment. *Agric. For. Meteorol.* 150, 56–62.

MacAdams, W.H., 1954. *Heat transmission*. McGraw-Hill, New-York.

Maché, M., 2012. Représentation multi-échelle des transferts entre couche de canopée urbaine et atmosphère à l'échelle de la ville (Thèse de Doctorat). Ecole Centrale de Nantes, Nantes.

Malys, L., 2012. Évaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments (Ph. D. Thesis). Ecole Centrale de Nantes, Nantes, France.

Malys, L., Musy, M., Inard, C., 2012. Microclimate and buildings energy consumption: sensitivity analysis of coupling methods, in: 8th International Conference on Urban Climate and 10th Symposium on the Urban Environment.

Martilli, A., Clappier, A., Rotach, M.W., 2002. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. *Bound.-Layer Meteorol.* 104, 261–304.

Mestayer, P.G., Chancibault, K., Lebouc, L., Letellier, L., Mosini, M.-L., Rodriguez, F., Rouaud, J.-M., Bagga, I., Calmet, I., Fontanilles, G., Gaudin, D., Lee, J.H., Piquet, T., Rosant, J.-M., Sabre, M., Tétard, Y., Brut, A., Selves, J.-L., Solignac, P.-A., Dayau, S., Irvine, M., Lagouarde, J.-P., Kassouk, Z., Launeau, P., Connan, O., Defenouillière, P., Goriaux, M., Hébert, D., Letellier, B., Maro, D., Najjar, G., Nerry, F., Quentin, C., Biron, R., Cohard, J.-M., Galvez, J., Klein, P., 2011. FluxSAP 2010 experimental campaign over an heterogeneous urban zone, Part 1: heat and vapour flux assessment. Presented at the 14th Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Kos, Greece.

Miguet, F., Groleau, D., 2007. Urban bioclimatic indicators for urban planners with the software tool SOLENE, in: SB07 Sustainable Construction, Materials and Practices. Presented at the SB07 Sustainable Construction, materials and practices : challenges of the industry for the new millenium, IOS PRESS, Lisbonne, pp. 348–355.

Miguet, F., Groleau, D., 2002. A daylight simulation tool for urban and architectural spaces : Application to transmitted direct and diffuse light through glazing. *Build. Environ.* 37, 833–843. doi:10.1016/S0360-1323(02)00049-5

Morille, B., 2012. Élaboration d'un modèle du climat distribué à l'échelle de l'abri et de la plante en cultures ornementales sous serres : analyse des transferts de masse et de chaleur, bilans énergétiques (Thèse de doctorat). Agrocampus Ouest, Angers.

Musy, A., Higy, C., 2004. *Hydrologie: Tome 1, Une science de la nature*. PPUR presses polytechniques.

Musy, M., Calmet, I., Bozonnet, E., Rodriguez, F., 2012. Modélisation des interactions ville-climat-énergie. *Références* 16–33.

Nelson, M.A., Williams, M.D., Zajic, D., Brown, M.J., Pardyjak, E.R., 2009. Evaluation of an urban vegetative canopy scheme and impact on plume dispersion. Los Alamos National Laboratory (LANL).

Oke, T.R., 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy Build.* 11, 103–113.

Palyvos, J.A., 2008. A survey of wind convection coefficient correlations for building envelope energy systems' modeling. *Appl. Therm. Eng.* 28, 801–808. doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.12.005

Pardyjak, E.R., Brown, M., 2003. QUIC-URB v. 1.1: Theory and User's Guide. LA-UR-07-3181.

Robitu, M., 2005a. 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.

Robitu, M., 2005b. Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs (Ph. D. Thesis). Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes.

Robitu, M., Musy, M., Inard, C., Groleau, D., 2006a. Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Sol. Energy* 80, 435–447.

Robitu, M., Musy, M., Inard, C., Groleau, D., 2006b. Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Sol. Energy* 80, 435–447. doi:10.1016/j.solener.2005.06.015

Rockle, R., 1990. Bestimmung der Stömungsverhältnisse im Bereich komplexer Bebauungsstrukturen. der Technischen Hochschule Darmstadt, Germany.

Rousseau, S., 1978. Simulation numérique du comportement thermique des locaux d'habitation. Evaluation de l'influence de la radiation solaire, des conditions climatiques et des paramètres caractéristiques du bâtiment. INSA de Lyon.

Sherman, C.A., 1978. Mass-consistent model for wind fields over complex terrain. *J Appl Meteorol* United States 17.

Spitz, C., Mora, L., Wurtz, E., Jay, A., 2012. Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house. *Cool Roofs Cool Pavements Cool Cities Cool World* 55, 459–470. doi:10.1016/j.enbuild.2012.08.013

Taine, J., Petit, J.-P., 1998. Transferts thermiques : Mécanique des fluides anisothermes, Sciences sup. Dunod.

Tewari, M., Kusaka, H., Chen, F., Coirier, W.J., Kim, S., Wyszogrodzki, A.A., Warner, T.T., 2010. Impact of coupling a microscale computational fluid dynamics model with a mesoscale model on urban scale contaminant transport and dispersion. *Atmospheric Res.* 96, 656–664.

Vilella Escuté, C., 2004. Bilan Thermo-Radiatifs associés à une surface revêtue avec des épisodes d'arrosage-séchage (Thèse de master). Ecole Centrale de Nantes, Nantes.

Vinet, J., 2000. Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs (Ph. D. Thesis). Université de Nantes Ecole Polytechnique de l'Univeristé de Nantes, Nantes, France.

Xue, M., Droegemeier, K.K., Wong, V., 2001. The Advanced Regional Prediction System (ARPS) – A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I: Model dynamics and verification. *Meteorol. Atmospheric Phys.* 75, 161–193. doi:10.1007/s007030070003

Xue, M., Droegemeier, K.K., Wong, V., Shapiro, A., Brewster, K., Carr, F., Weber, D., Liu, Y., Wang, D., 2000. The Advanced Regional Prediction System (ARPS) – A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part II: Model physics and applications. *Meteorol. Atmospheric Phys.* 76, 143–165. doi:10.1007/s007030170027

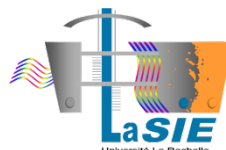
Yamagata, H., Nasu, M., Yoshizawa, M., Miyamoto, A., Minamiyama, M., 2008. Heat island mitigation using water retentive pavement sprinkled with reclaimed wastewater. *Water Sci. Technol. J. Int. Assoc. Water Pollut. Res.* 57, 763–771. doi:10.2166/wst.2008.187

7. Annexe : documents du séminaire du 23/03/2016

7.1. Présentation des enjeux de la recherche - Marjorie MUSY et Philippe MAILLARD

Séminaire EVA

Le 23/03/2016





Programme

Mot d'accueil par Bruno Charles Vice-Président de la Métropole de Lyon en charge du développement durable et de l'agriculture

10:15 - 10:45 Présentation des enjeux de la recherche - *Marjorie MUSY et Philippe MAILLARD*

10:45 - 11:30 Présentation du pilote d'humidification et du modèle développé dans SOLENE - microclimat - *Jean-Baptiste BAILLY et Marie-Hélène AZAM*

11:30 - 12:15 Choix des sites et mise en place des scénarios - *Benjamin MORILLE et Marjorie MUSY*

12:15 - 13:45 Déjeuner

13:45 - 15:45 Résultats – *Stéphanie Zaba, Benjamin MORILLE et Adrien GROS*

15:45 - 16:15 Conclusion et réponses aux questions

Séminaire EVA

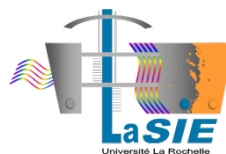
Le 23/03/2016



IRSTV FR CNRS 2488
Institut de Recherche
en Sciences et Techniques de la Ville



ZEI **VEOLIA**



AAU crenau
ambiances
architectures
urbanités

LHEEA





Mot d'accueil par **Bruno Charles** Vice-Président de la Métropole de Lyon en charge du développement durable et de l'agriculture

Séminaire EVA à Lyon le 23/03/2016





Projet **EVA** (*Eau, Végétation, Albédo*)

Evaluation quantitative de l'impact sur le microclimat, les consommations énergétiques des bâtiments et le confort intérieur et extérieur de trois principes de rafraîchissement urbain. Application au quartier de la Part-Dieu à Lyon

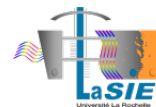
Enjeux et présentation

Marjorie MUSY et Philippe MAILLARD

Séminaire EVA à Lyon le 23/03/2016



ZEI  VEOLIA



AAU crenau
ambiances
architectures
urbanités



LHEEA



IRSTV

LHEEA

Isabelle Calmet,
Anne Bernabé



Christian Inard,
Emmanuel Bozonnet,
Adrien Gros

AAU crenau
ambiances
architectures
urbanités



Marjorie Musy,
Benjamin Morille,
Marie Hélène Azam,
Ilyès Smadi

VEOLIA



Philippe Maillard,
Camille Grandet,
Jean-Baptiste Bailly,
Stéphanie Zaba

VERI (VEolia
Environnement Recherche
et Innovation

Gwenaëlle Becker,
Fabienne David,
David Mouquet,
Luc Mosqueron





15 partenaires fédérés pour développer des recherches interdisciplinaires sur les sciences et techniques de la ville



Connaissance, modélisation et observation de la ville

Séminaire EVA à Lyon le 23/03/2016



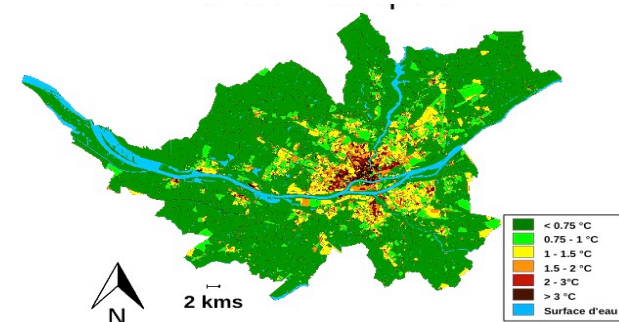
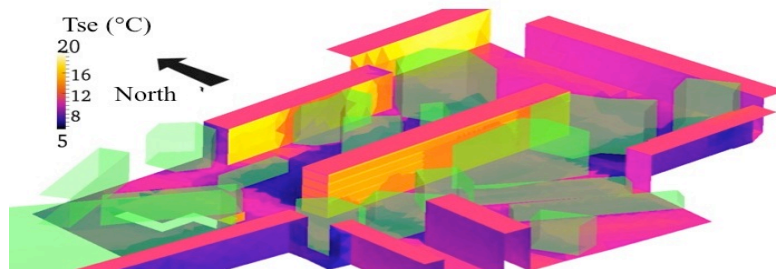
Des connaissances et outils académiques



Mesures des flux et températures en ville (ONEVU, campagnes FLUXSAP sur Nantes)

Des modèles climatiques et énergétiques à différentes échelles

Un modèle d'ICU



Pôle Conseil

**Définition et mise en œuvre
stratégies durables
de projets urbains et de territoires**

Villes, Aménageur public/privé,
Architecte, urbaniste, paysagiste, BE
Business Units de Veolia

Pôle Innovation

**Conception et expérimentation
de solutions innovantes (smart city et
innovation sociale)**

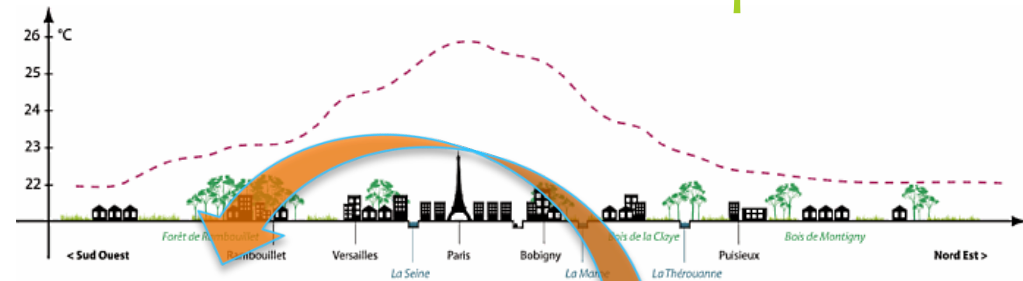
Villes, aménageurs, bailleurs sociaux
Acteurs de l'innovation
Business Units de Veolia

Contexte :

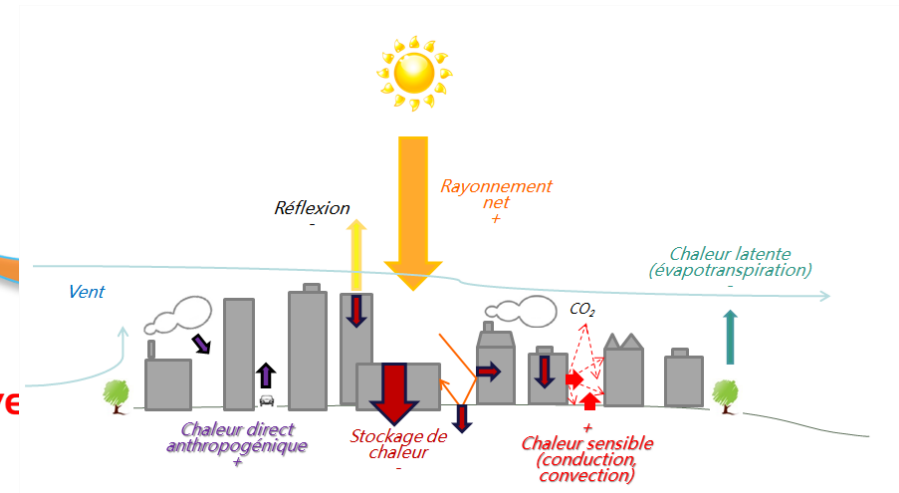
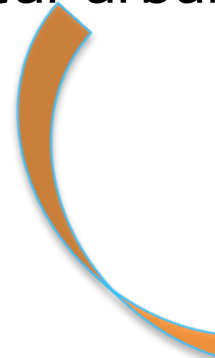
Réchauffement climatique

Densification des centres urbains

Solutions
d'atténuation
et d'adaptation ?



Ilot de chaleur urbain



Impacts :



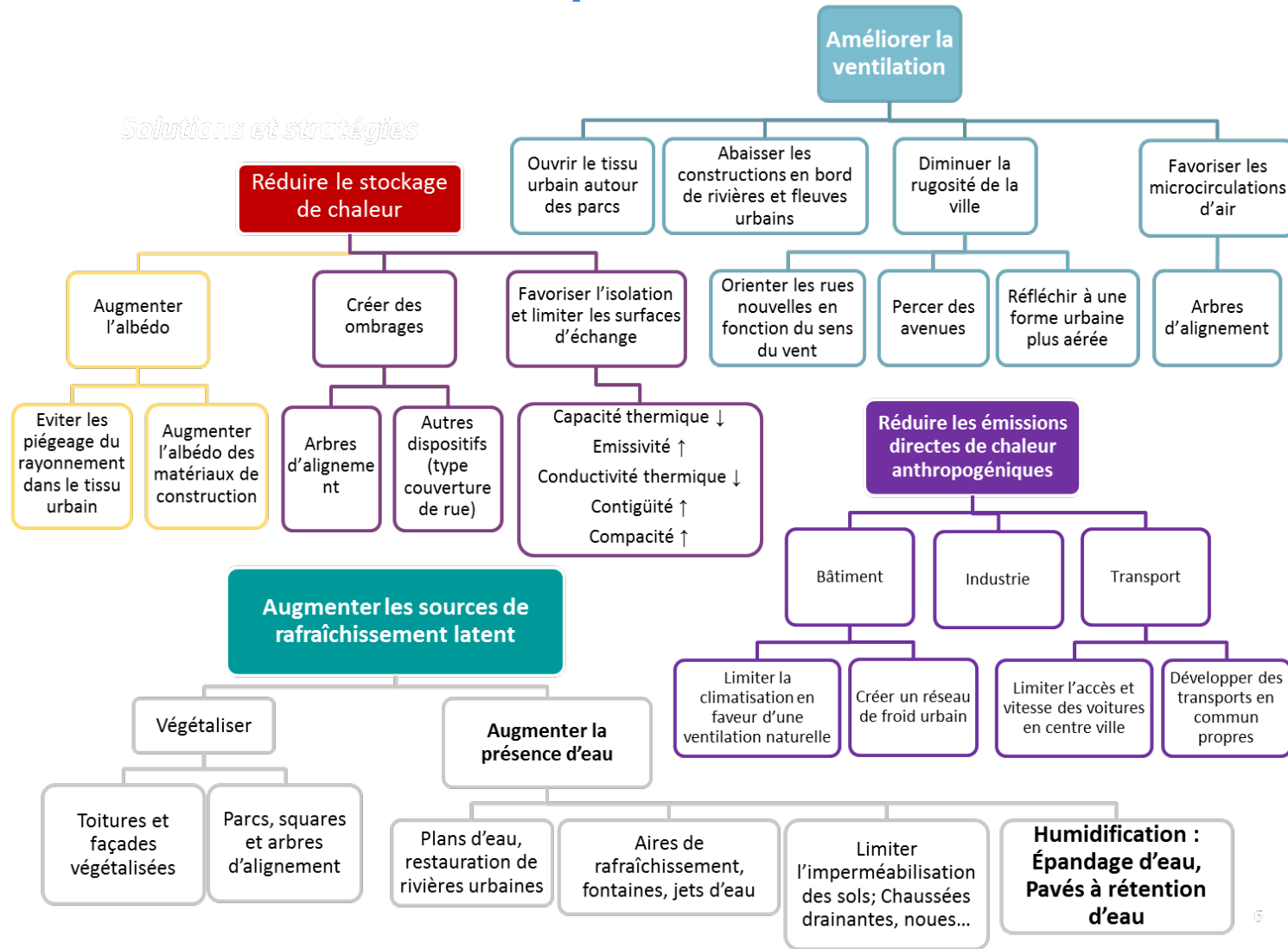
- **Impacts sanitaires** (hausse mortalité due à la chaleur, concentration de la pollution)
- **Impacts écologiques et économiques** (consommation climatisation et eau)

Phénomène **de plus en plus fréquent** à cause du changement climatique (multiplication des vagues de chaleur)

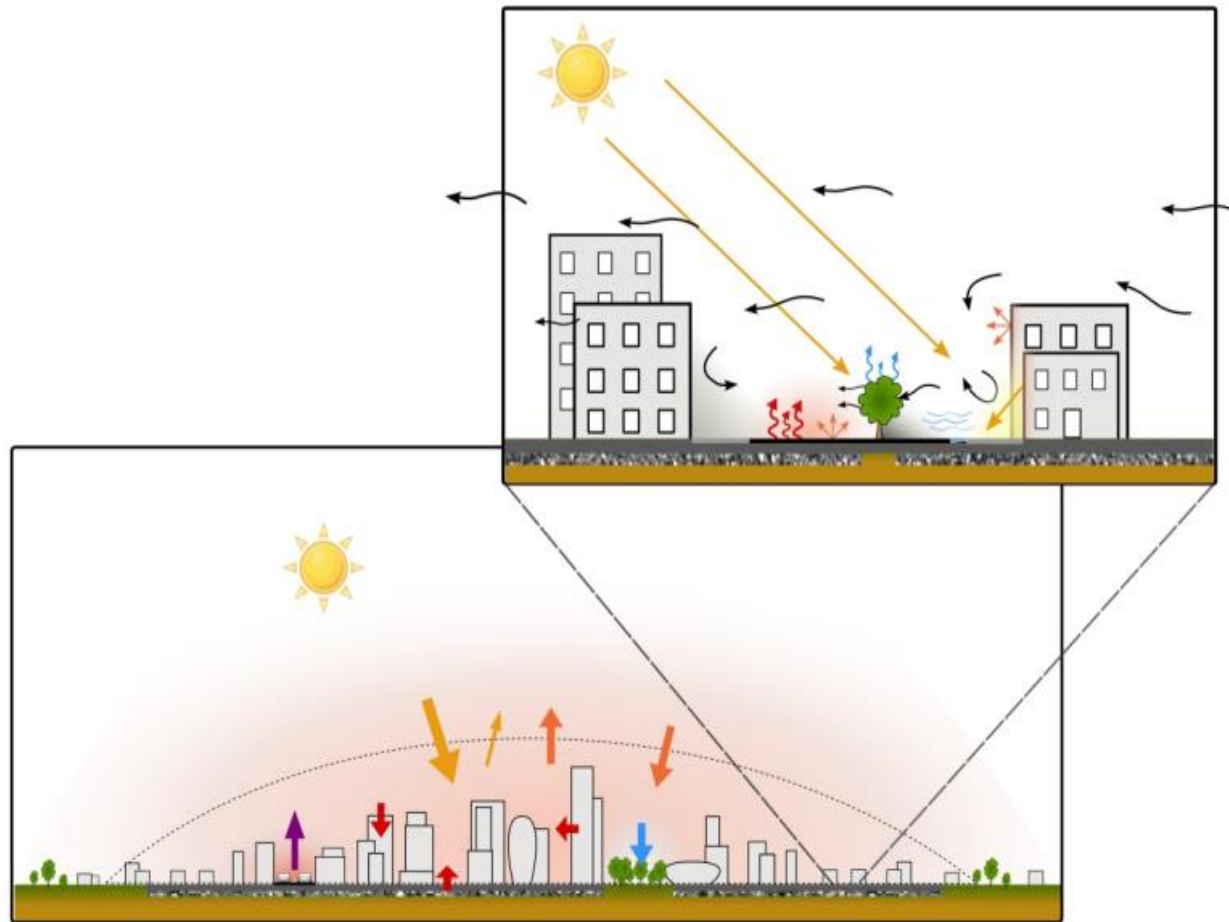
Les solutions :

- Réduire les flux solaires absorbés pendant la journée (réflexion, ombrage)
- Favoriser la restitution de la chaleur par
 - Evaporation (eau, végétation)
 - Convection (vent)
 - Rayonnement infra rouge (échange avec le ciel)
- Réduire les charges anthropiques

De nombreuses solutions potentielles...



...à mettre en œuvre à l'échelle de la ville et du quartier



Les questions que se posent les collectivités et aménageurs

Comment évaluer le risque ICU ?

Comment l'intégrer dans la conception urbaine ?

Quelles solutions mettre en œuvre ?

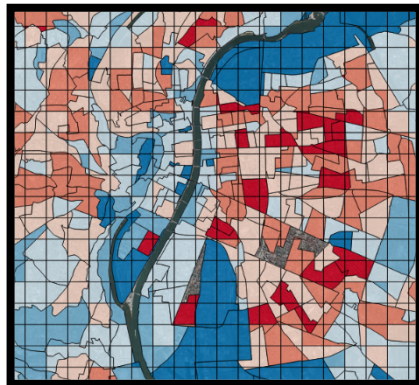
Comment comparer ces solutions ?

Sur la base de quels critères ?

Services atténuation du changement climatique en ville

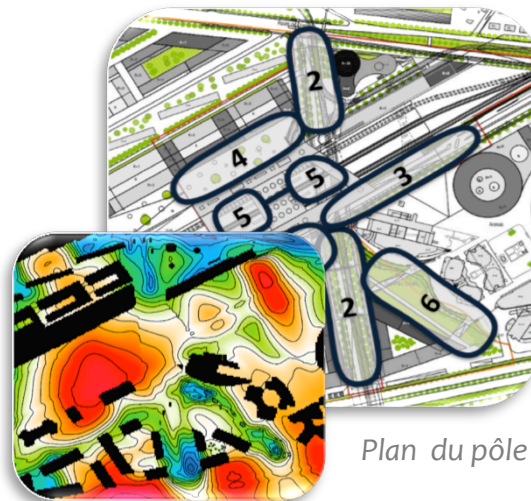
Aide à la décision échelle ville

- ✓ Diagnostic vulnérabilité
- ✓ Monitoring



Aide à la décision échelle quartier / conception bioclimatique

- ✓ Projets neufs
- ✓ rénovation

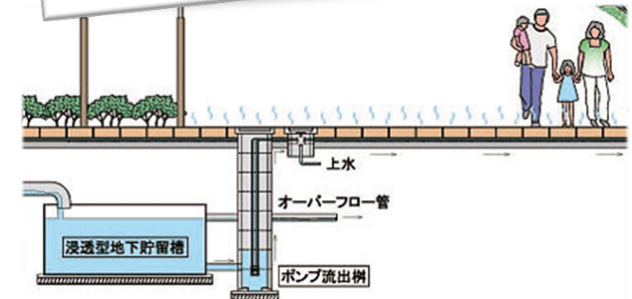


Plan du pôle

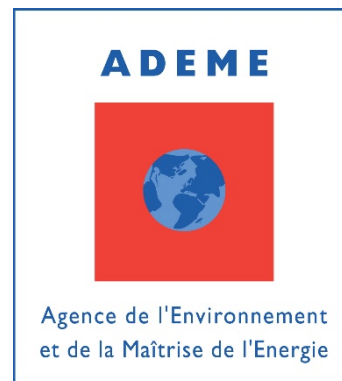
Carte de confort

Dispositifs de Rafraîchissement urbains innovants

- ✓ Valorisation des eaux non potables



Financement ADEME



EVA : Eau Végétation Albedo

Les solutions étudiées :

3 solutions étudiées dans EVA

- L'humidification de chaussées
- La végétalisation
- Les matériaux à fort albédo



Les méthodes :

Expérimentation : pour l'humidification, à l'échelle de la rue

Simulation

ARPS-canopée

Solene-microclimat

EnviBatE

micro-climat

confort

énergie

Grand quartier

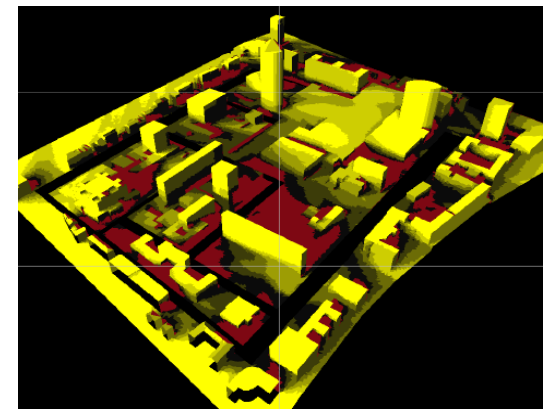
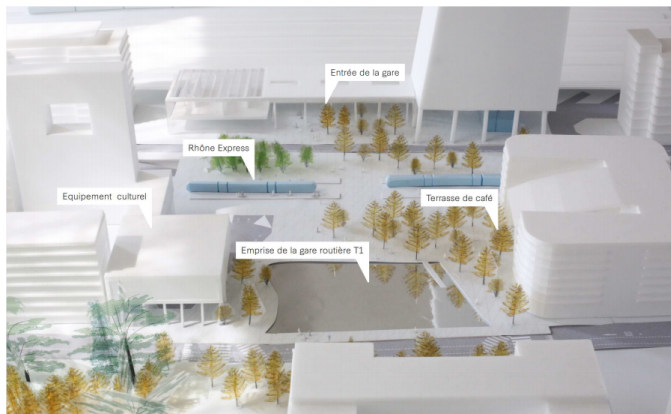
Fragment urbain, quartier

Quartier

Les sites étudiés :

Lyon Part-Dieu

- densité
- enjeux climatiques
- enjeux énergétiques
- engagement de la collectivité locale



Structure du projet :

Volet 1

Représentation de l'humidification dans les modèles à partir des mesures réalisées par Veolia à Lyon ainsi que sur les mesures faites dans le cadre du projet ROSURE réalisé par l'IRSTV à Nantes (IFSTTAR/LHEEA).

RESULTATS : Un modèle de surface humidifiée intégré dans les simulations

Volet 2

Documentation du site pour les 3 modèles : morphologie, MOS, caractéristiques du bâti. Description des matériaux de surface, des bâtiments et de la végétation.

RESULTATS : Des maquettes documentées (sous SOLENE) du quartier étudié, et des quartiers environnants (dans un environnement SIG).

Volet 3

A partir du quartier existant (cas référence) et des évolutions connues, mise en place de scénarios de déploiement des dispositifs :

- 3 scénarios mono-dispositifs extrêmes (couverture maximale par le dispositif) -> mise en évidence des meilleures conditions de performance des dispositifs ;
- Un scénario d'optimisation avec plusieurs dispositifs dans lequel les avantages de chaque type de dispositif sont exploités
- 3 scénarios soustractifs à partir du scénario optimisé -> compréhension de la composition des effets

Les cas de référence et scénario optimisé sont croisés avec un scénario climatiques (A2) = un total de 10 cas par site

Volet 4

Deux étapes de **simulation**

- simulation de l'état existant
- simulation des scénarios

RESULTATS : Analyse des résultats des simulations en termes d'impact sur les consommations énergétiques des bâtiments, de confort thermique à l'intérieur et à l'extérieur

Volet 5

Synthèse des simulations : **comparatif multi-critères**

RESULTATS : Comparaison des scénarios selon 6 critères

- ✓ réduction de l'ICU / amélioration du confort thermique
- ✓ réduction de la consommation de climatisation
- ✓ coût global
- ✓ consommation d'eau
- ✓ bilan carbone
- ✓ coefficient de biotope

7.2. Présentation du pilote d'humidification et du modèle développé dans SOLENE - microclimat - Jean-Baptiste BAILLY et Marie-Hélène AZAM



Pilote d'essai d'une solution d'humidification de chaussée

Séminaire EVA à Lyon le 23/03/2016



Rafrachissement par l'eau

Usages traditionnels, expérimentaux ou récréatifs de rafraichissement



Mission Uchimizu Headquarters©



Yamagata et al. 2008



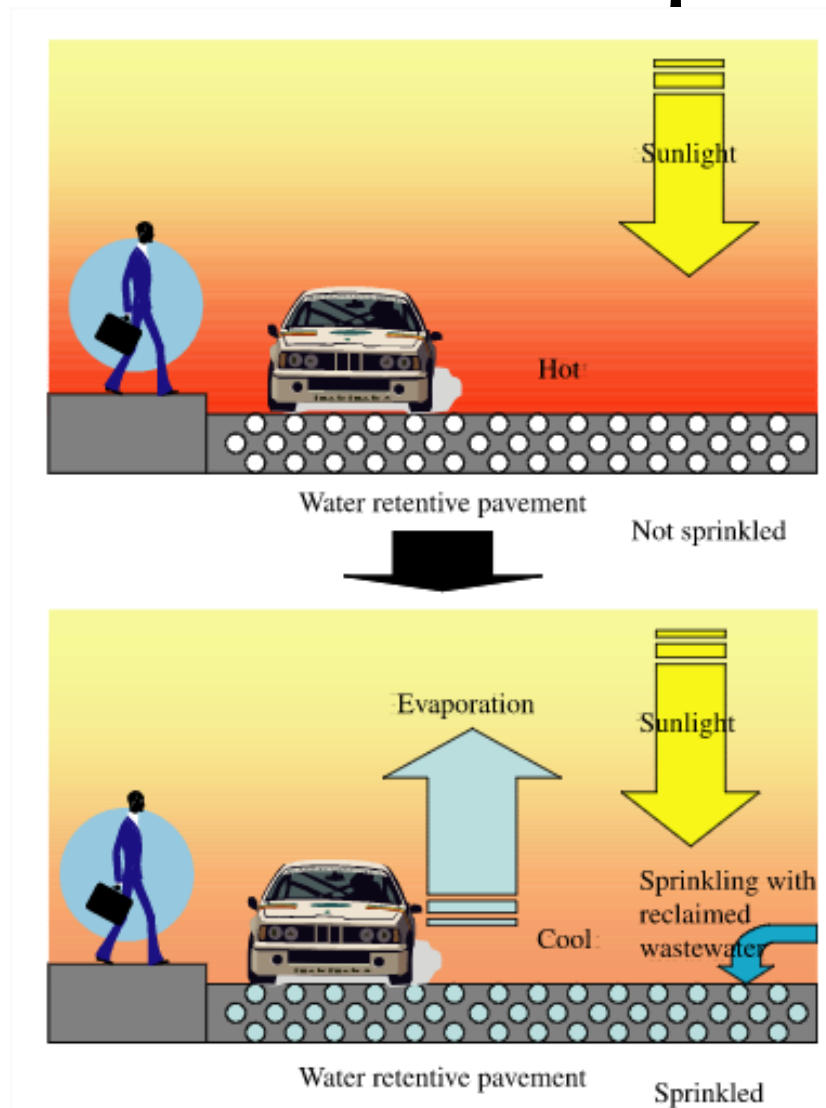
Rotterdam City©

Opportunités d'usages alternatifs pour les eaux:

- d'exhaures
- de pluie
- grises traitées localement

Procédé simulé dans des projets de recherches à grande échelle
(EPICEA sur Paris)

Rafrachissement par l'eau



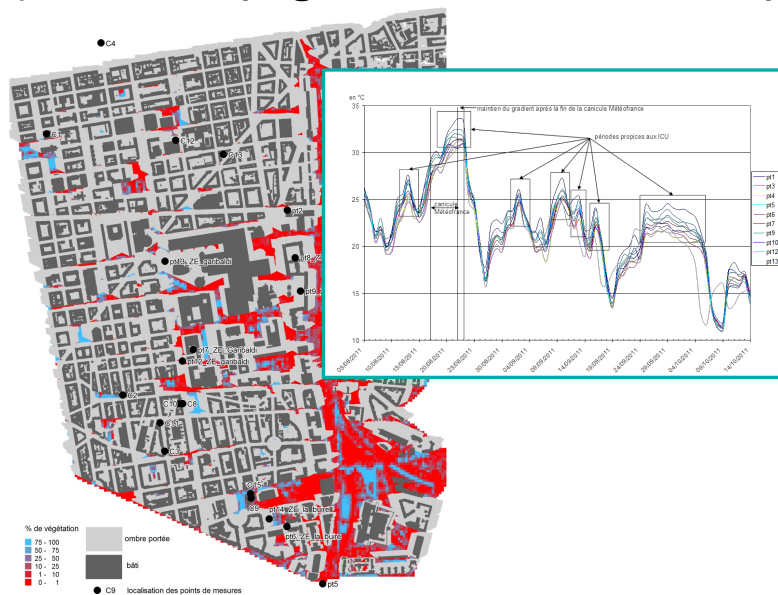
Yamagata et al. 2008

Mise en place d'un pilote

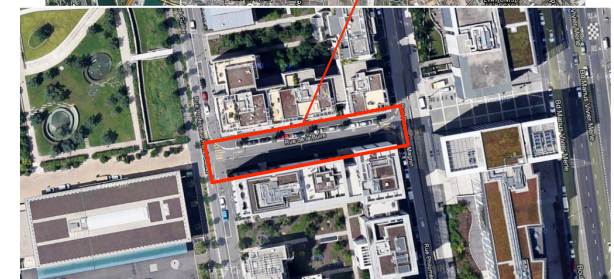
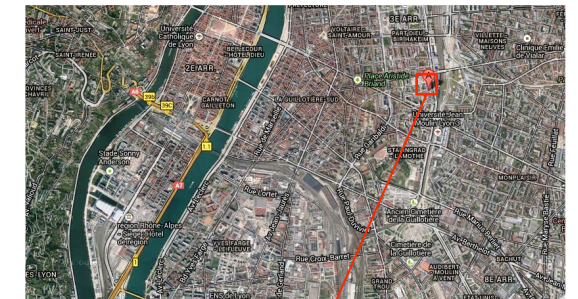
Enjeux du pilote :

- **Tester** un système d'humidification de chaussées en conditions réelles (sur 3 années de 2012 à 2014)
- **Évaluer** l'impact de la solution suivant les conditions d'arrosage
- **Recueillir** des données expérimentales pour la modélisation

Choix du site : 2011 : cartographie des ICU sur le Grand Lyon et campagne de mesures de température

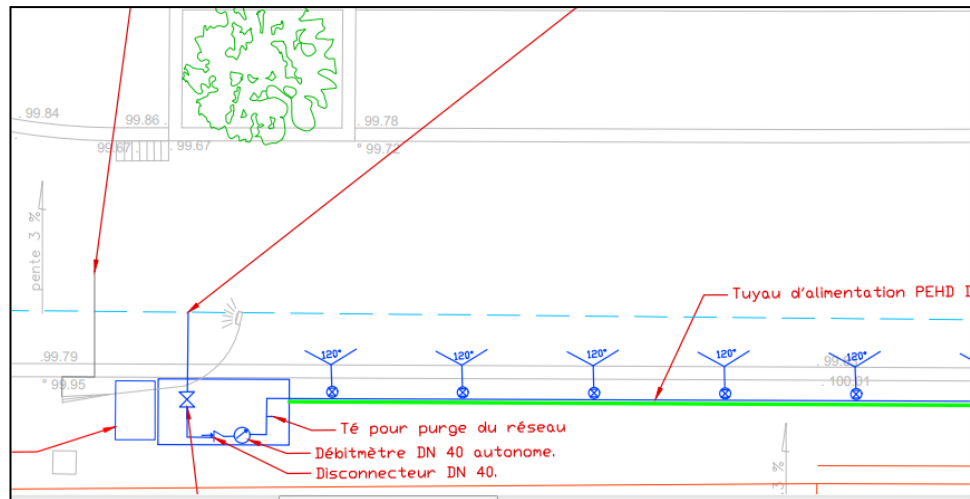


→ Quartier de la ZAC de la Buire

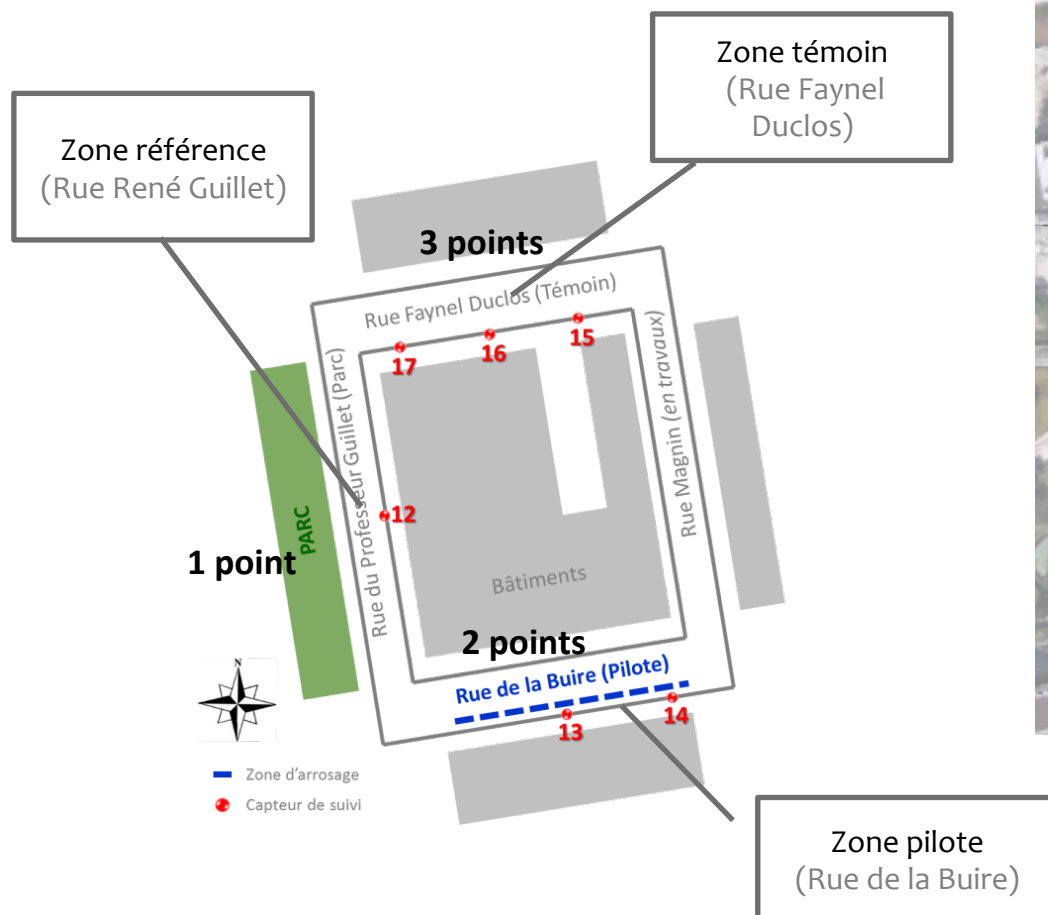


Systeme d'humidification

- **Buses** d'aspersion tous les 2m dans les trottoirs (angle 120°)
- **Connexion au reseau** d'eau potable pour la campagne d'essais
- **Instrumentation:** vanne et debitmètre
- Test d'une durée standard pour humidification de chaussée : 2min



Capteurs et mesure du confort

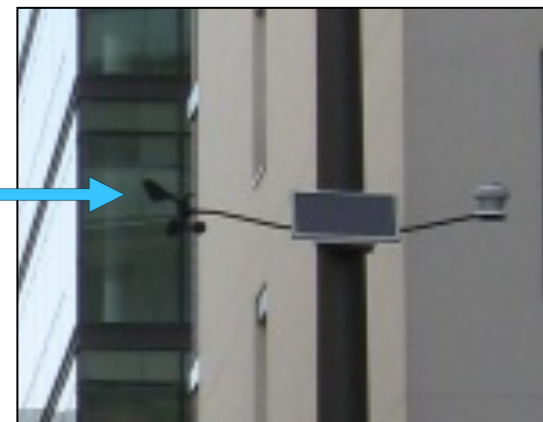


Capteurs et mesure du confort

Instrumentation:

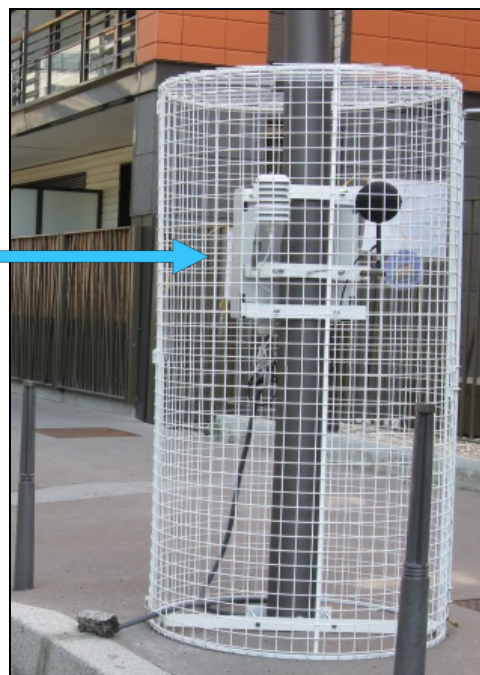
Paramètres mesurés à 4 m du sol :

Température de l'air/hygrométrie
Direction et vitesse du vent
Ensoleillement



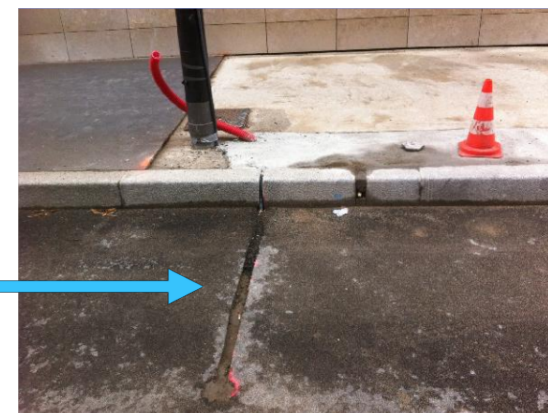
Paramètres mesurés à 1,5 m du sol :

Température d'air / Hygrométrie
Température de globe noir



Paramètres mesurés dans le sol :

Température du sol (sonde PT100 à ≈ 1 cm
sous la surface



Programme d'essai 2012

Conditions d'essais:

- 13 août → 12 septembre 2012 (alerte canicule du 17 au 22 août)

- Plusieurs programmes d'arrosage faisant varier

- la fréquence



- la période de la journée



6h – 14h



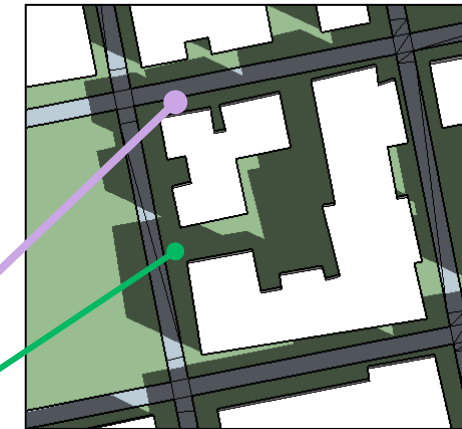
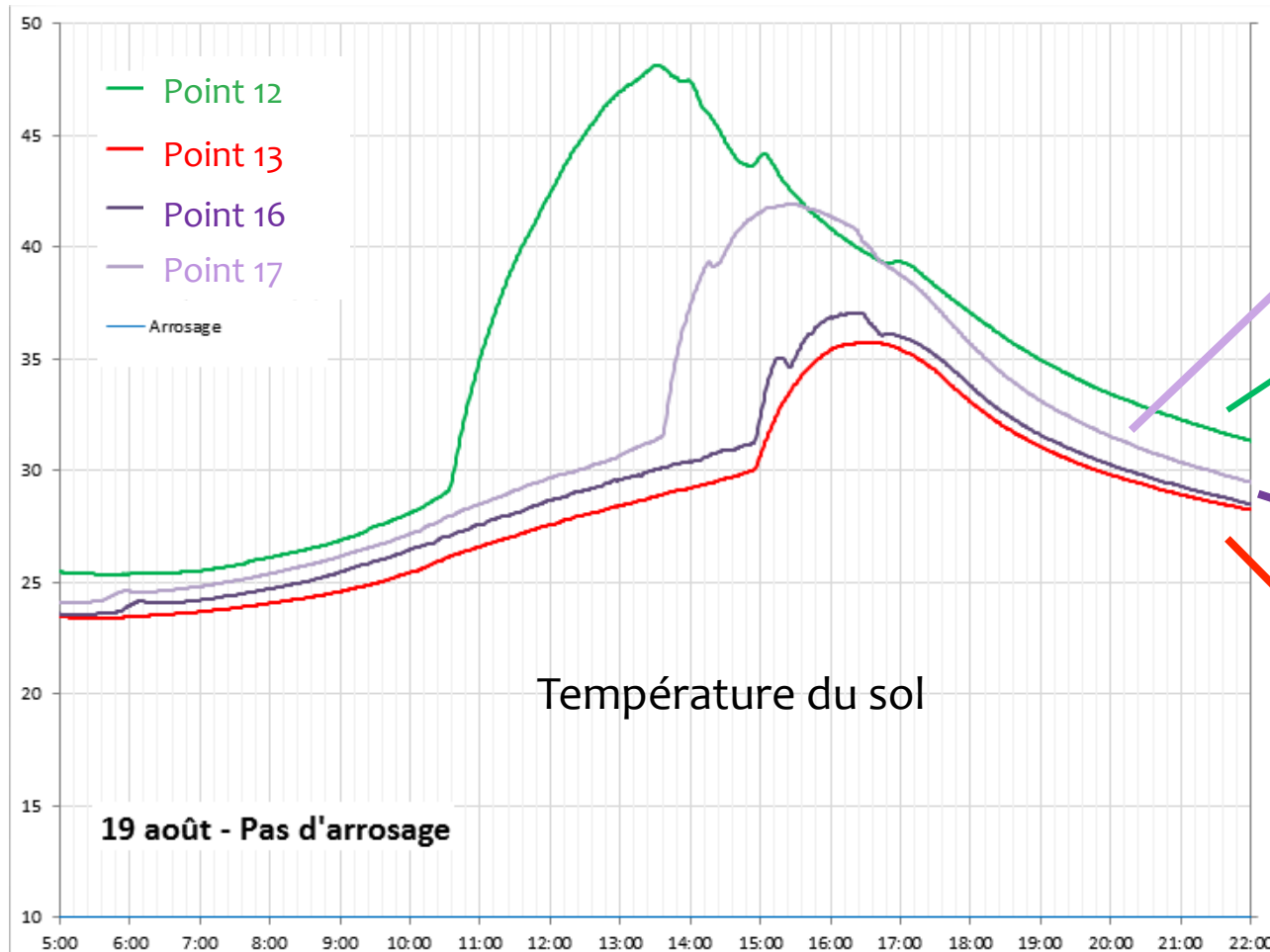
14h – 18h

- Ouverture manuelle de la vanne
- Mesure de paramètres physiques & du confort (**WBGT**)

Objectifs:

- Comparer les valeurs obtenues aux différents points de mesures
- Evaluer l'impact de la solution de rafraîchissement : T° et confort

Essais & Résultats 2012

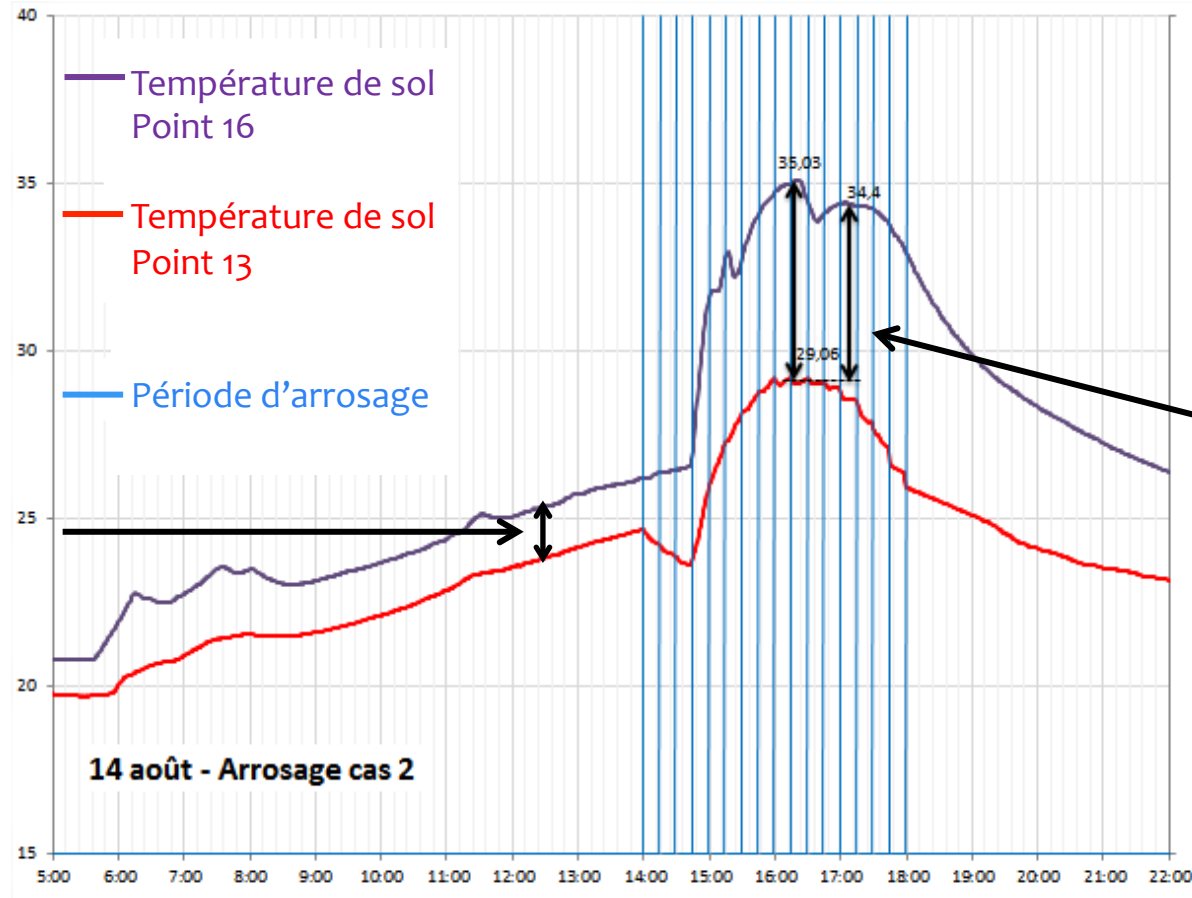
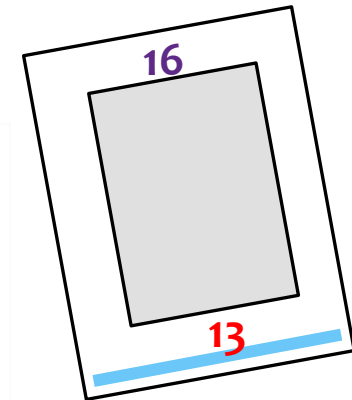


Ombrage à 10h



Ombrage à 16h

Essais & Résultats 2012

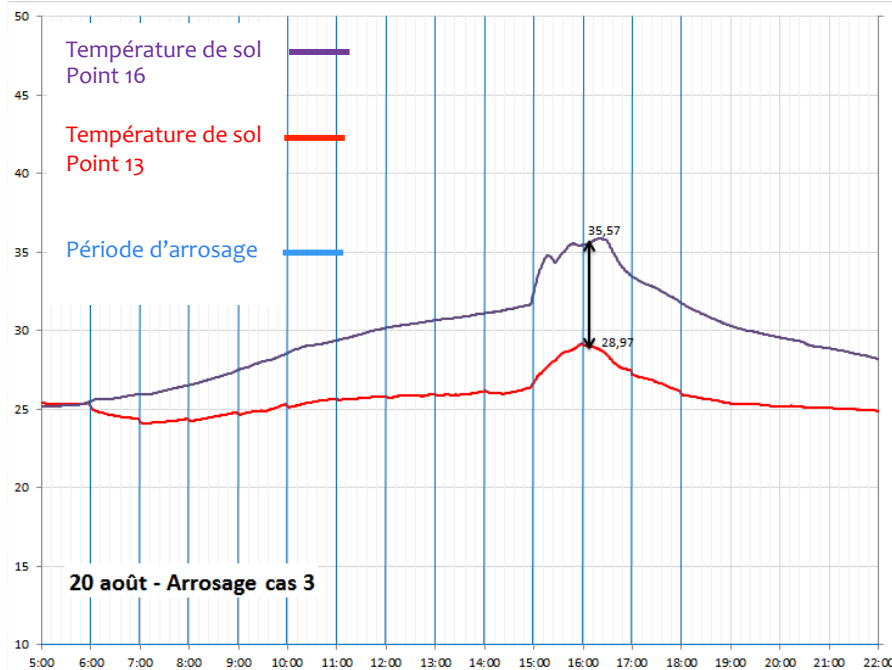


Ecart structurel
entre les 2 rues
($\approx 1,5^\circ\text{C}$)

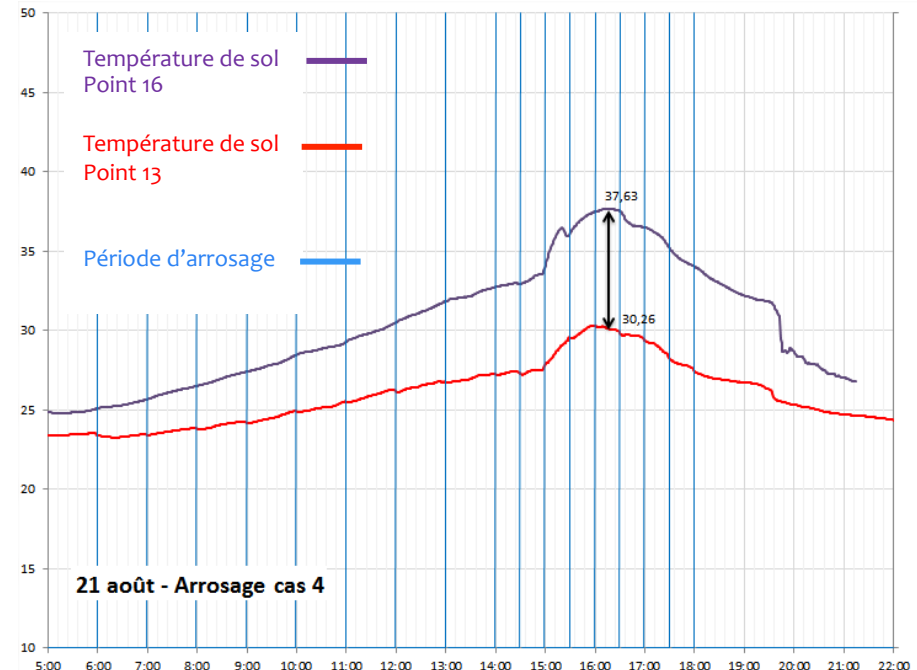
Ecart absolu
 $\approx 6^\circ\text{C}$

Arrosage : 14h - 18h
Fréquence : 15 min

Essais & Résultats 2012



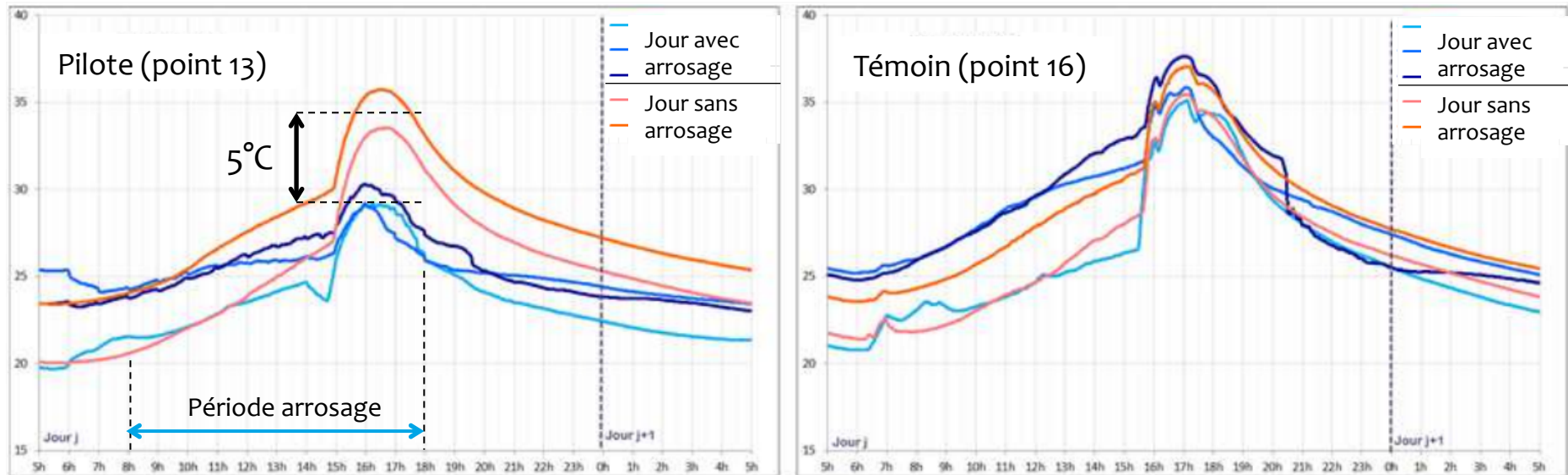
Arrosage : 6h - 18h
Fréquence : 60 min



Arrosage : 6h - 14h – Freq. 60min
Arrosage : 14h - 18h – Freq. 30min

En tenant compte d'un écart structurel entre les 2 rues
→ Ecart moyen d'environ 5°C

Essais & Résultats 2012



Superposition de différents jours avec humidification (bleu) et sans humidification (rouge)

- On retrouve cet écart d'environ 5°C
- Maintien de l'écart en période nocturne

Essais & Résultats 2012

Evaluer le confort : Indice WBGT

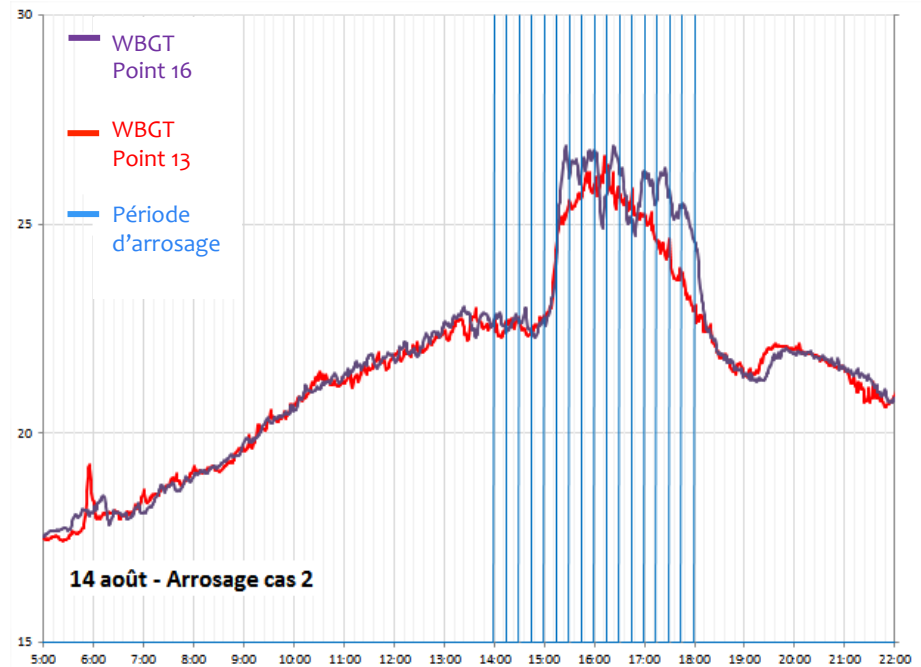
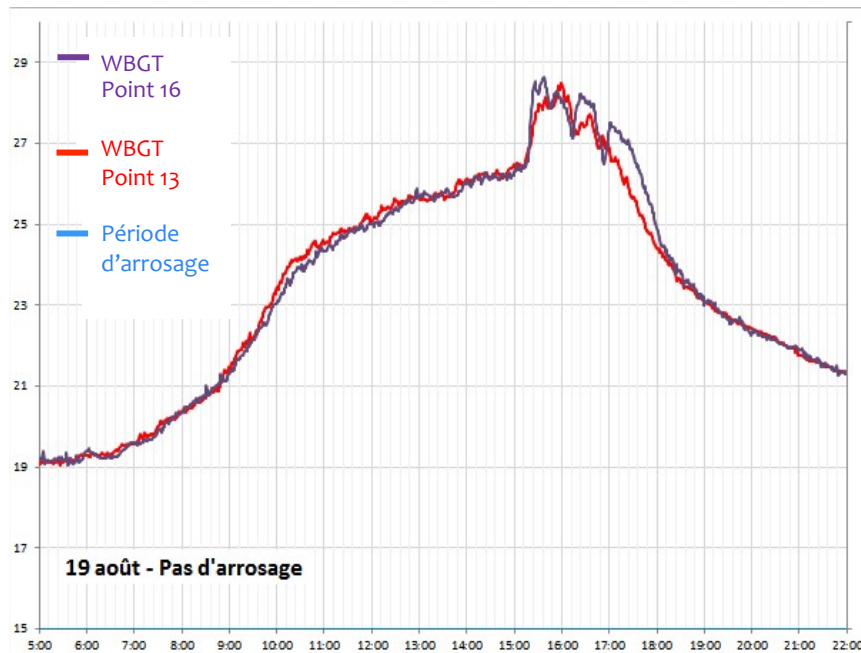
= wet bulb globe temperature

= Température au thermomètre-globe mouillé

= $f(\text{humidité, rayonnement, } T^{\circ}\text{air})$

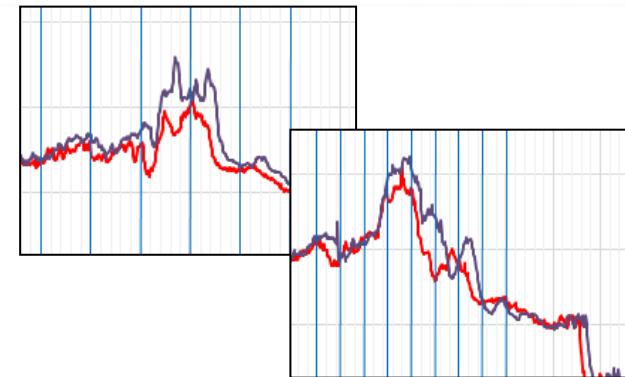
WBGT	FLAG COLOR	LEVEL OF RISK	COMMENTS
<18°C (<65°F)	Green	Low	Risk low but still exists on the basis of risk factors.
18-23°C (65-73°F)	Yellow	Moderate	Risk level increases as event progresses through the day.
23-28°C (73-82°F)	Red	High	Everyone should be aware of injury potential; individuals at risk should not compete.
>28°C (82°F)	Black	Extreme or Hazardous	Consider rescheduling or delaying the event until safer conditions prevail; if the event must take place, be on high alert.

Essais & Résultats 2012

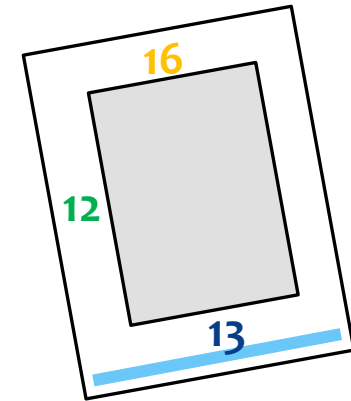
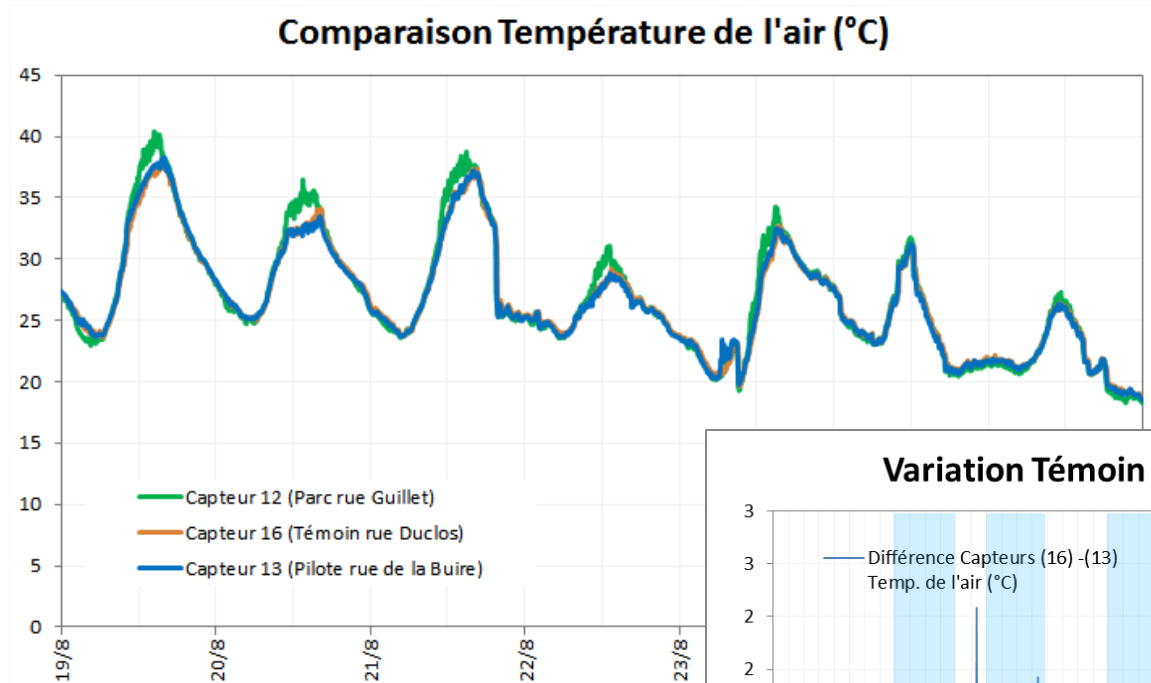


Interprétation complexe :

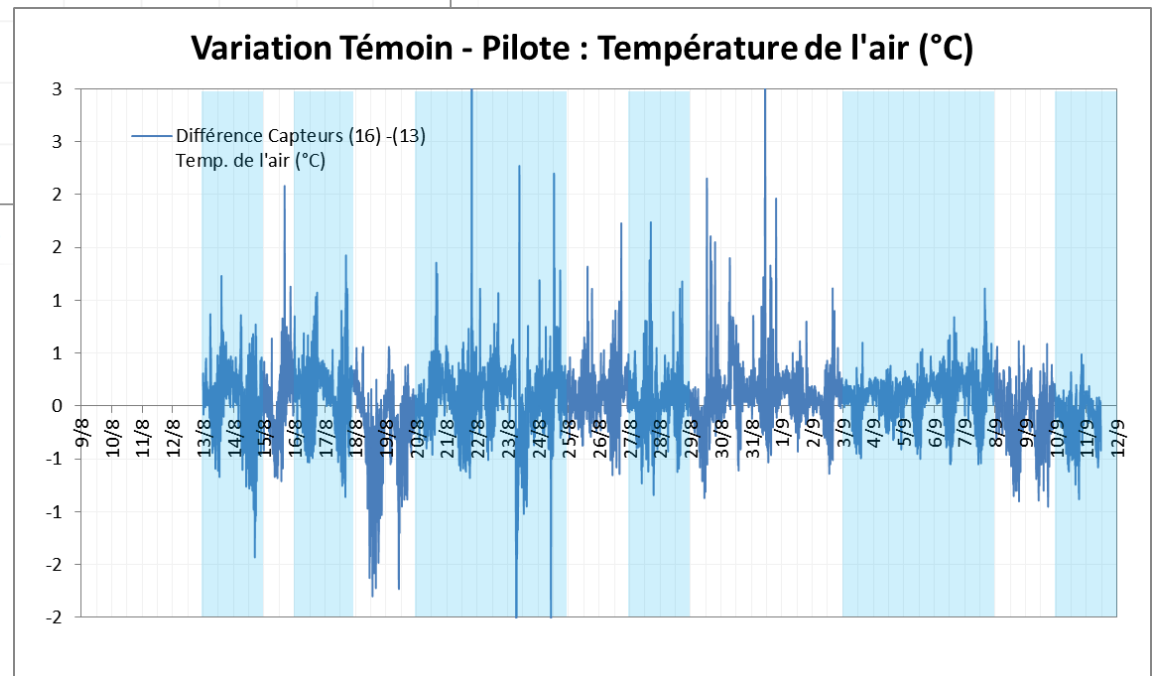
- Amélioration faible autour de $0,4^{\circ}\text{C}$
- Corrélation entre fort WBGT et forte température de chaussée



Essais & Résultats 2012



→ Pas différence claire entre rue témoin et rue pilote



Essais & Résultats 2012

Accompagnement :

- Avant l'opération : présentation du projet
- Pendant l'opération : accompagnement des habitants



*Bar à eau animé par Veolia Eau
+ Direction de l'Eau du Grand Lyon*

Enquête sociologique d'un cabinet extérieur sur la réaction du public :

- Intérêt pour l'expérimentation et le confort
- Questionnement sur le coût
- Problématique de la consommation d'eau
- Perception très variable du rafraichissement
- Problématique de la mesure de l'efficacité des solutions (arbres vs eau ?)

Programme d'essai 2013

Conditions d'essais:

- **Automatisme d'humidification (SOFREL)**
- Seulement 2 points (13 et 16)
- Essais effectués 15 août → 08 septembre 2013

- Programmes d'arrosage:

Selon un seuil de T°

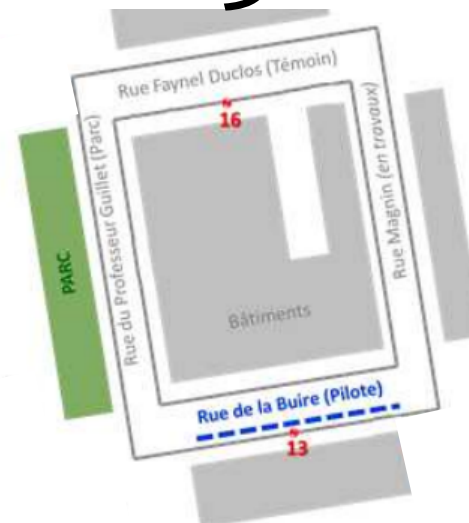


si température de
chaussée > 30°C



si WBGT
nocturne > 20°C

fréquence : 5, 15, 30 min



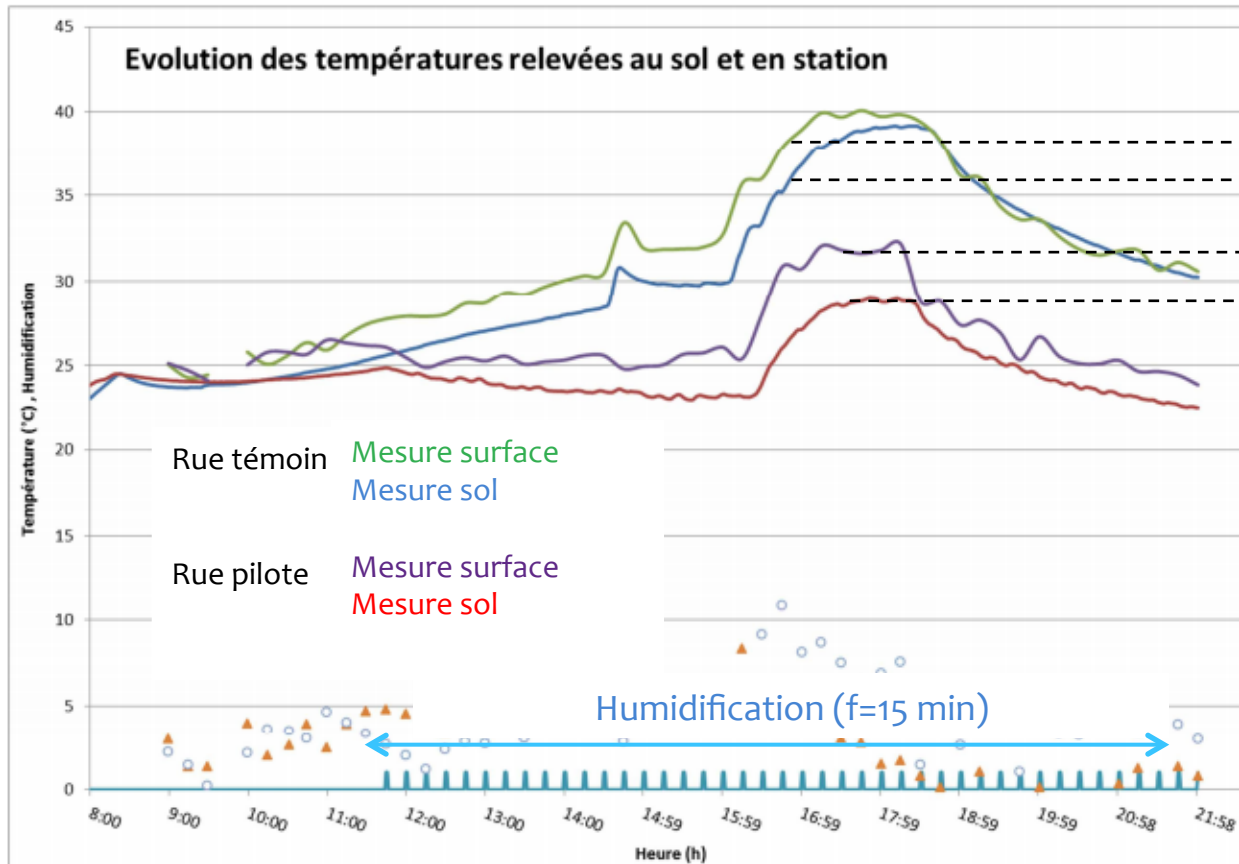
Objectifs:

affiner les connaissances sur l'impact de
l'humidification de jour et de nuit.

(dynamique et écarts de température)

Essais & Résultats 2013

Relation entre: la température de surface (thermocouple)
et
la température mesurée à 1 cm sous la surface



39°C $\Delta \approx 2^\circ\text{C}$ Rue témoin
37°C
32°C $\Delta \approx 4^\circ\text{C}$ Rue pilote
28°C

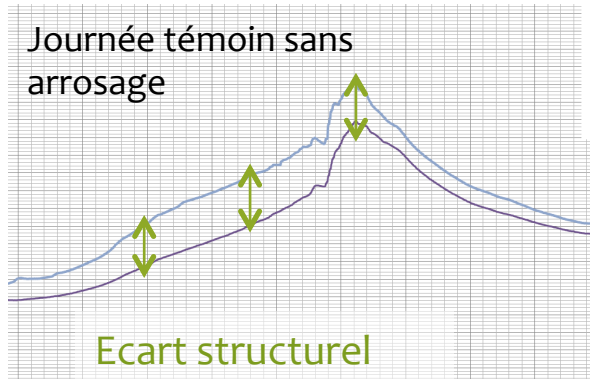
Ecart entre température de surface et sol en journée

Faible écart hors de l'exposition solaire

Ecart plus grand sur la zone humidifiée

Essais & Résultats 2013

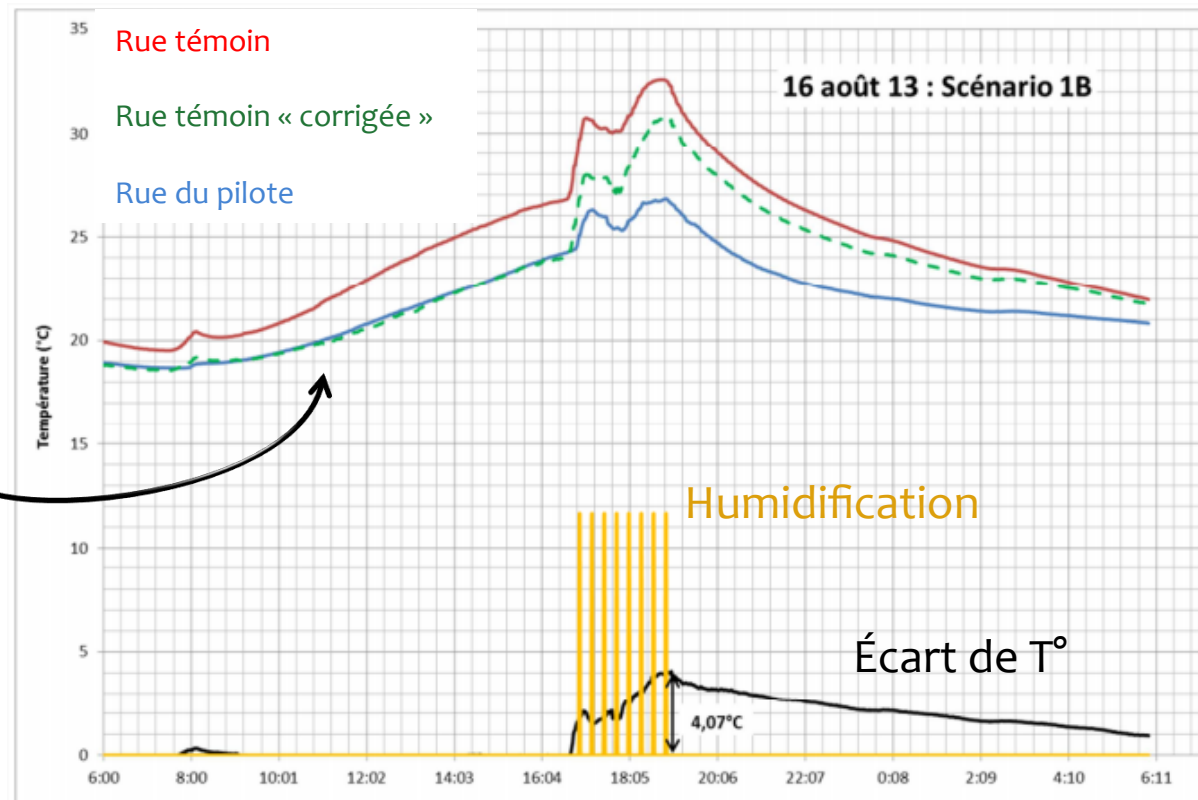
→ Définition d'un écart structurel entre les 2 rues avec journée standard sans arrosage:



→ Utilisation des journées ayant des conditions météorologiques proches (=ayant le même profil matinal)

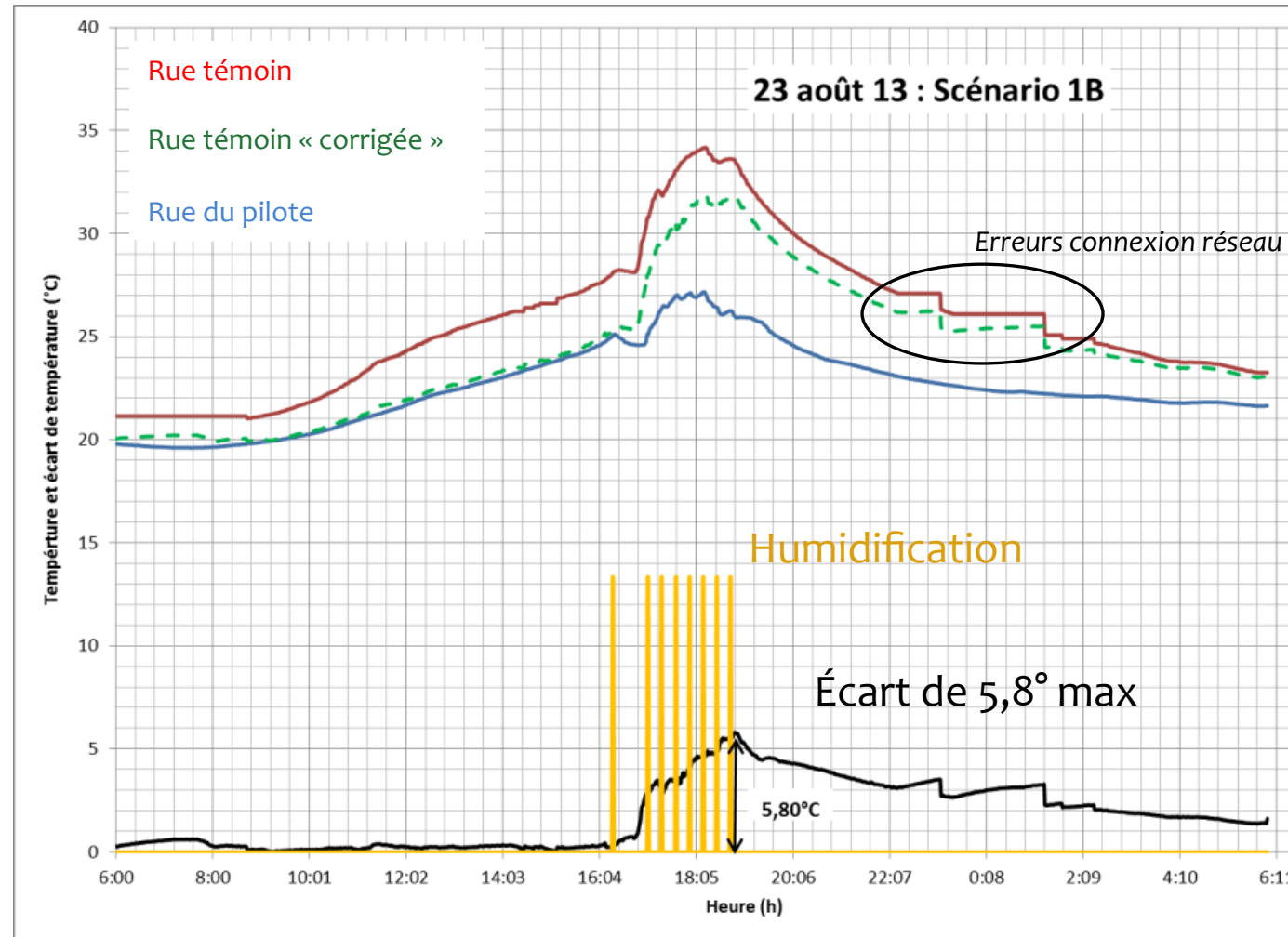
→ Calcul d'une courbe « rue témoin corrigée »

→ Écart :
Avec/ sans arrosage de la rue du pilote



Essais & Résultats 2013

Ecart le 23 août

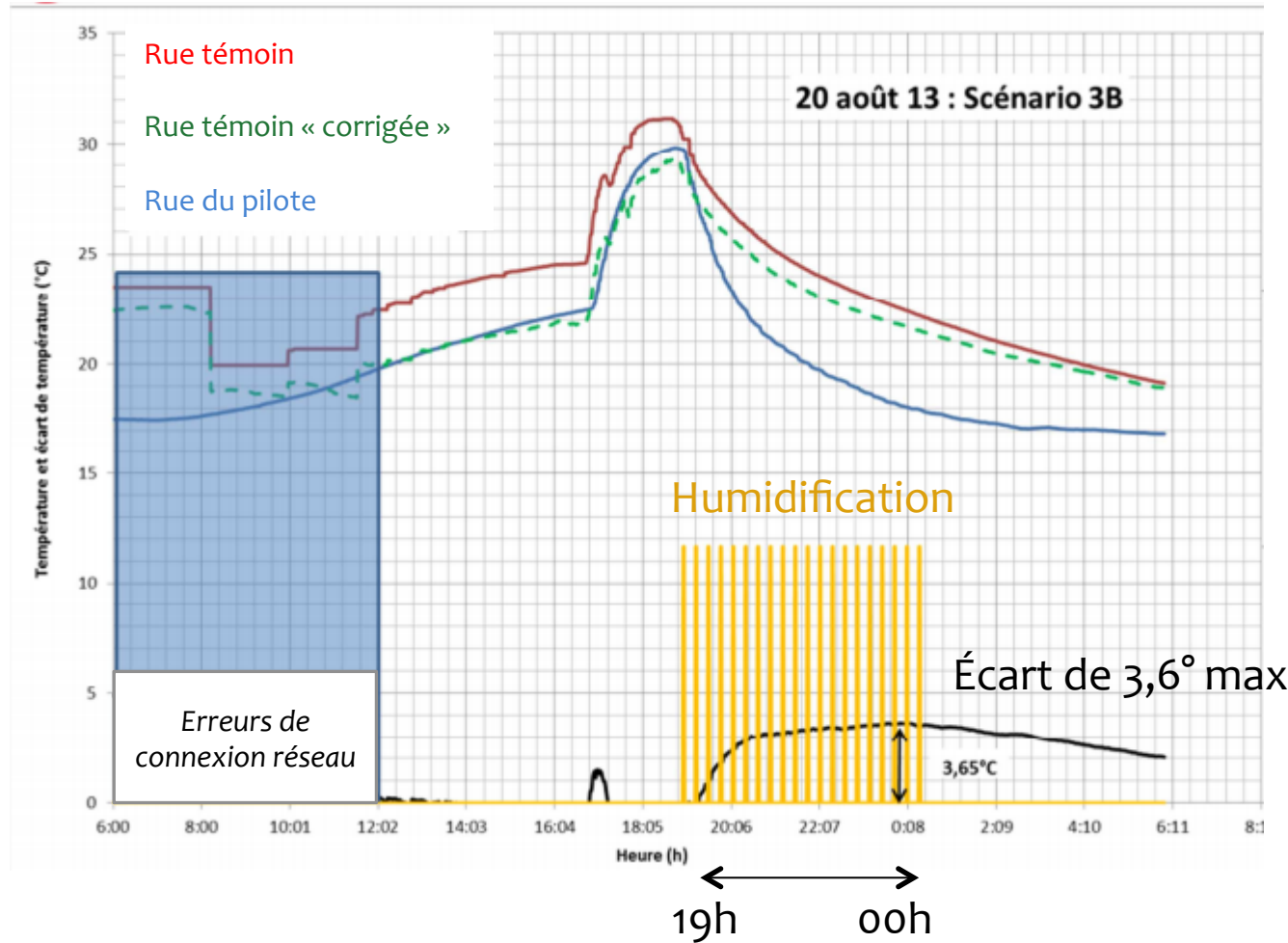


→ Gain important en T°

→ Basse de l'écart en T° la nuit

Essais & Résultats 2013

Ecart de température de chaussée en soirée:

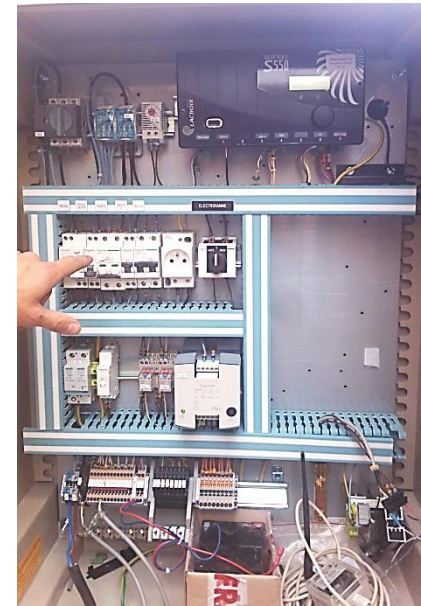


→ Maintien de l'écart en T° la nuit

Programme d'essai 2014

Conditions d'essais:

- Commande automatisée de l'humidification
- **Pertes des sondes de T° sol**
 - Mise en place d'un pyranomètre (mesure IR)
+ mesures manuelles à la caméra IR
- Essais : 15 août → 08 septembre 2013



Boitier de commande

Objectifs: tester la mesure par pyromètre IR
 observer T° surface caméra IR
 vérifier dispersion de l'eau

Essais & Résultats 2014

Installation d'un pyromètre

Test d'une mesure à distance en alternative à une sonde dans la chaussée.

Test de validité des mesures par rapport :

- Pyromètre portable
- Thermocouple

Périodes sèches :

écart de $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ (niveau de précision de l'appareil)

Périodes humidifiées:

Ecart très important sur les valeurs: effet de **réflectivité du soleil sur l'eau au sol.**

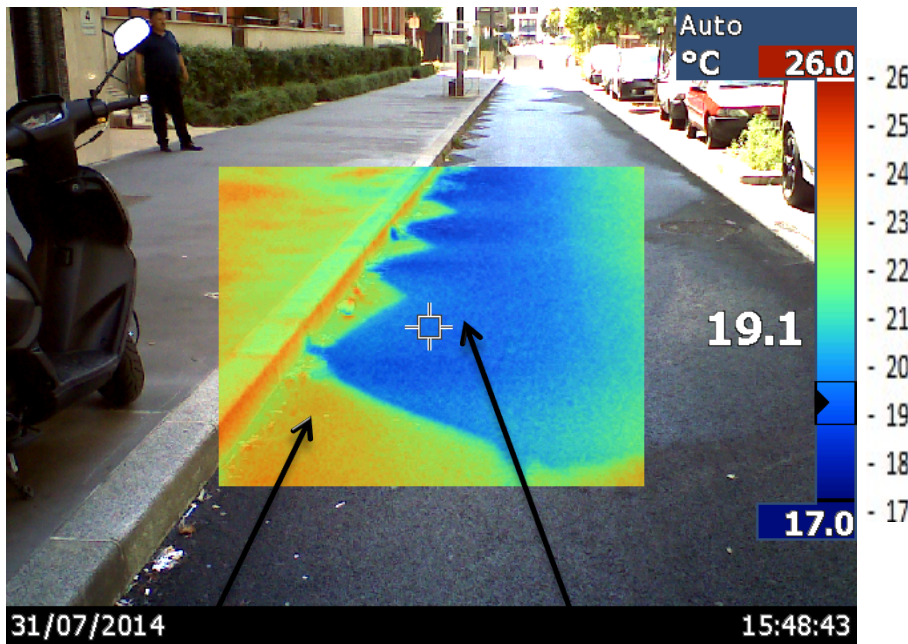


Essais & Résultats 2014

Gain de température de surface grâce à l'eau

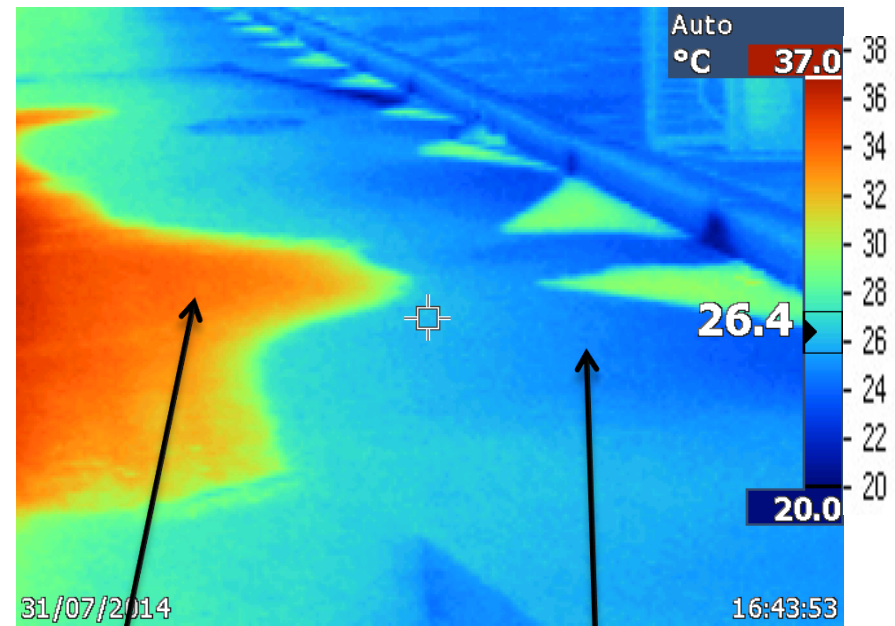
Rue à l'ombre
Gain $\approx 4^\circ\text{C}$

Rue ensoleillée
Gain $\approx 12^\circ\text{C}$



$\approx 23^\circ\text{C}$
sec

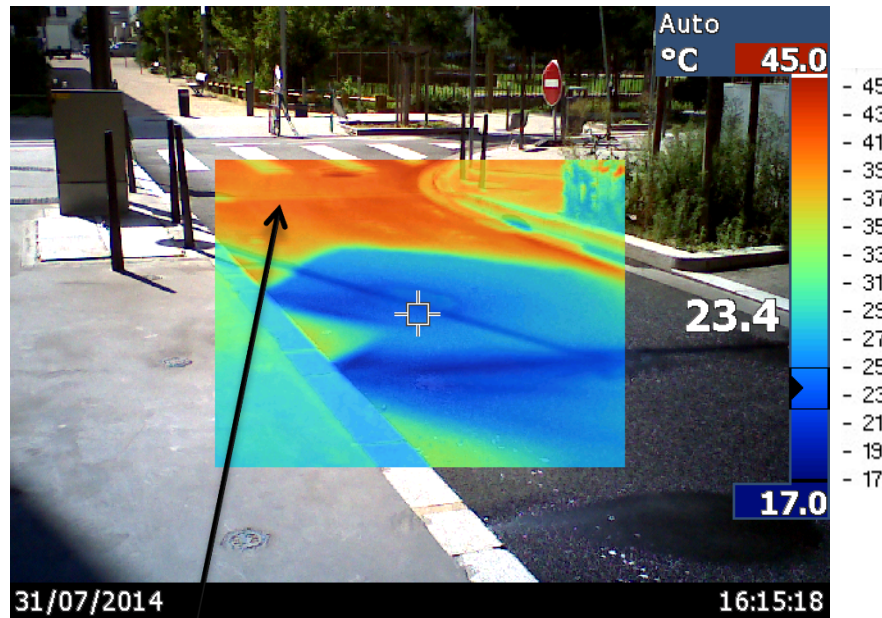
$\approx 19^\circ\text{C}$
humidifiée



$\approx 34^\circ\text{C}$
sec

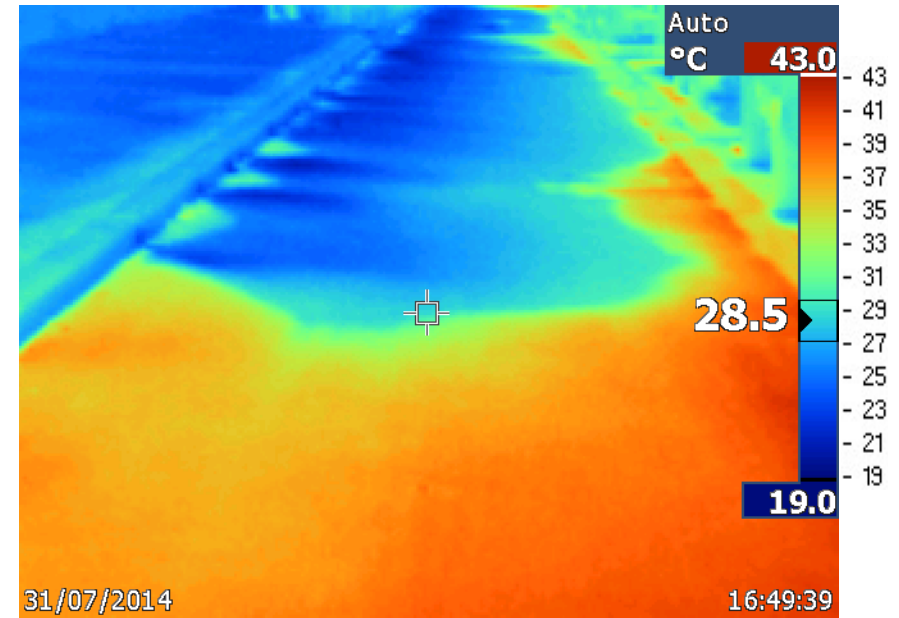
$\approx 22^\circ\text{C}$
Humide

Essais & Résultats 2014



$\approx 43^{\circ}\text{C}$ rue plein soleil

Plus forte chauffe dans les rues plus ensoleillées
(plus fort potentiel de gain de T° ?)



Répartition assez homogène de T° sur la largeur + longueur de la rue

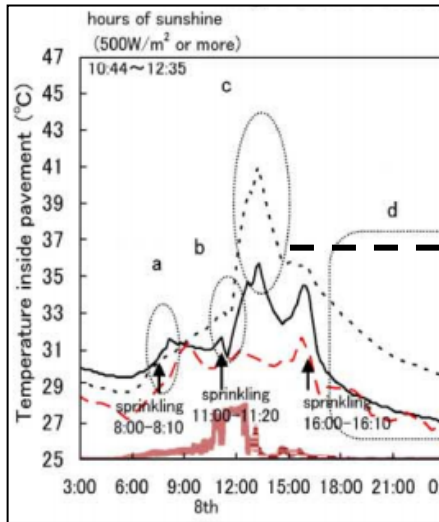
Exceptés:

- Certains bords de caniveaux
- Face aux buses endommagées
- Zone inter-buses

Autres projets

JAPON

2008 - Yamamoto - Heat island mitigation using water retentive pavement sprinkled with reclaimed wastewater



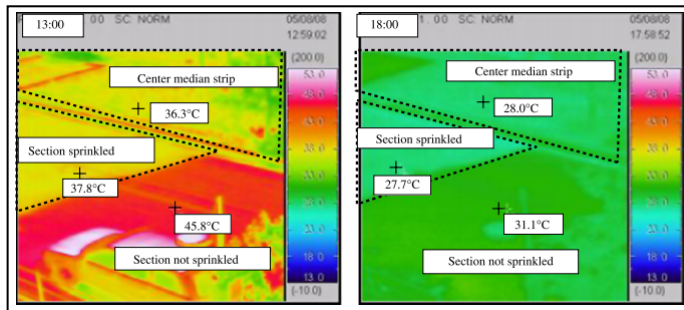
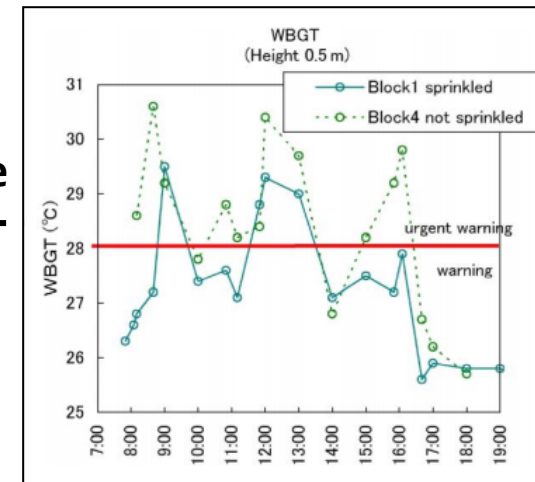
Gain maximum de 6°C dans le sol (2,5cm)

Baisse d'environ 2°C de WBGT (au maximum).

→ Mesure à 50 cm au dessus de la surface !



Photo 1 | View of a road surface sprinkled with treated wastewater (Shio site).



Température de surface:
Baisse de 8 °C au soleil
Baisse de 3°C le soir

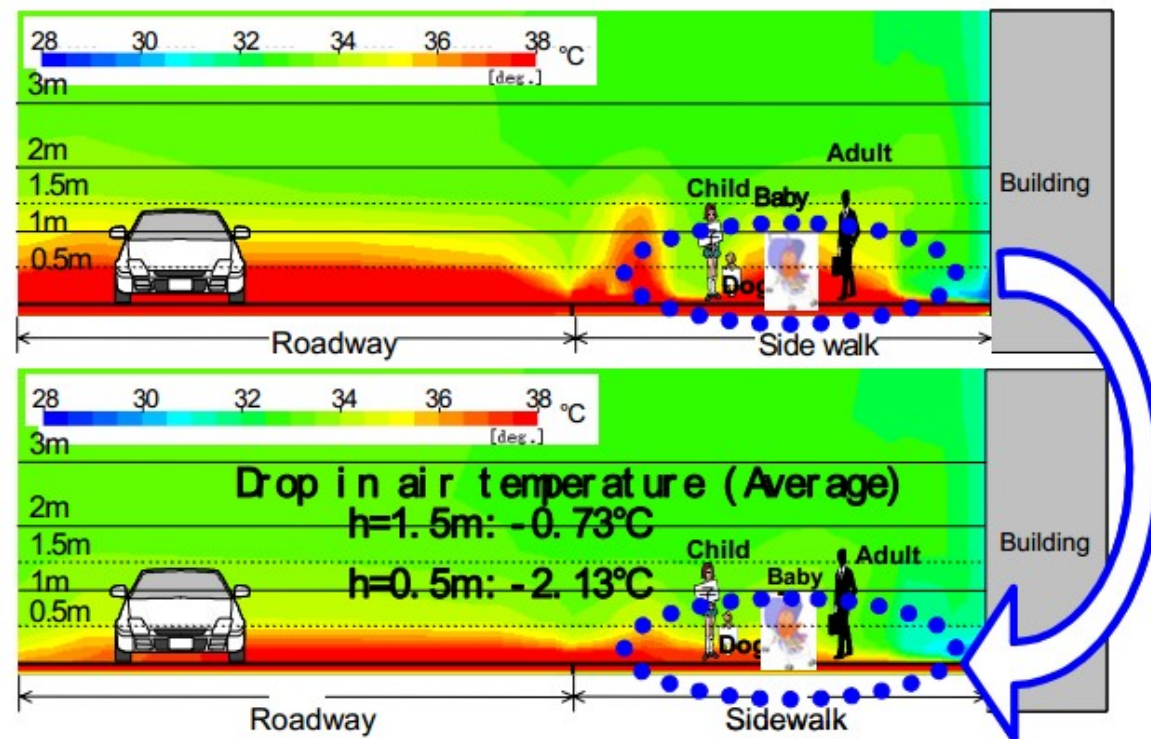
Autres Projets

JAPON

2006 - Kubo - *Study on pavement technologies to mitigate the heat island effect and their effectiveness*

Résultats de simulation avec un impact sur $T^{\circ}\text{air}$:

- important à 0,5m
- Très faible à 1,5m



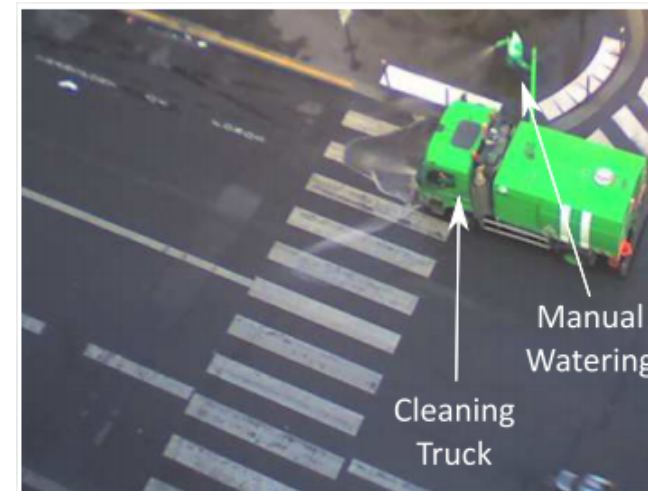
Autres Projets

Travaux de recherche d'humidification menées à Paris.

Publications M. Hendel et. al (2012-2015)

Mairie de Paris, EIVP, MSC

- Amélioration de l'instrumentation et du protocole de mesures
- Optimisation de l'arrosage en fonction des flux d'évaporation



Perspectives

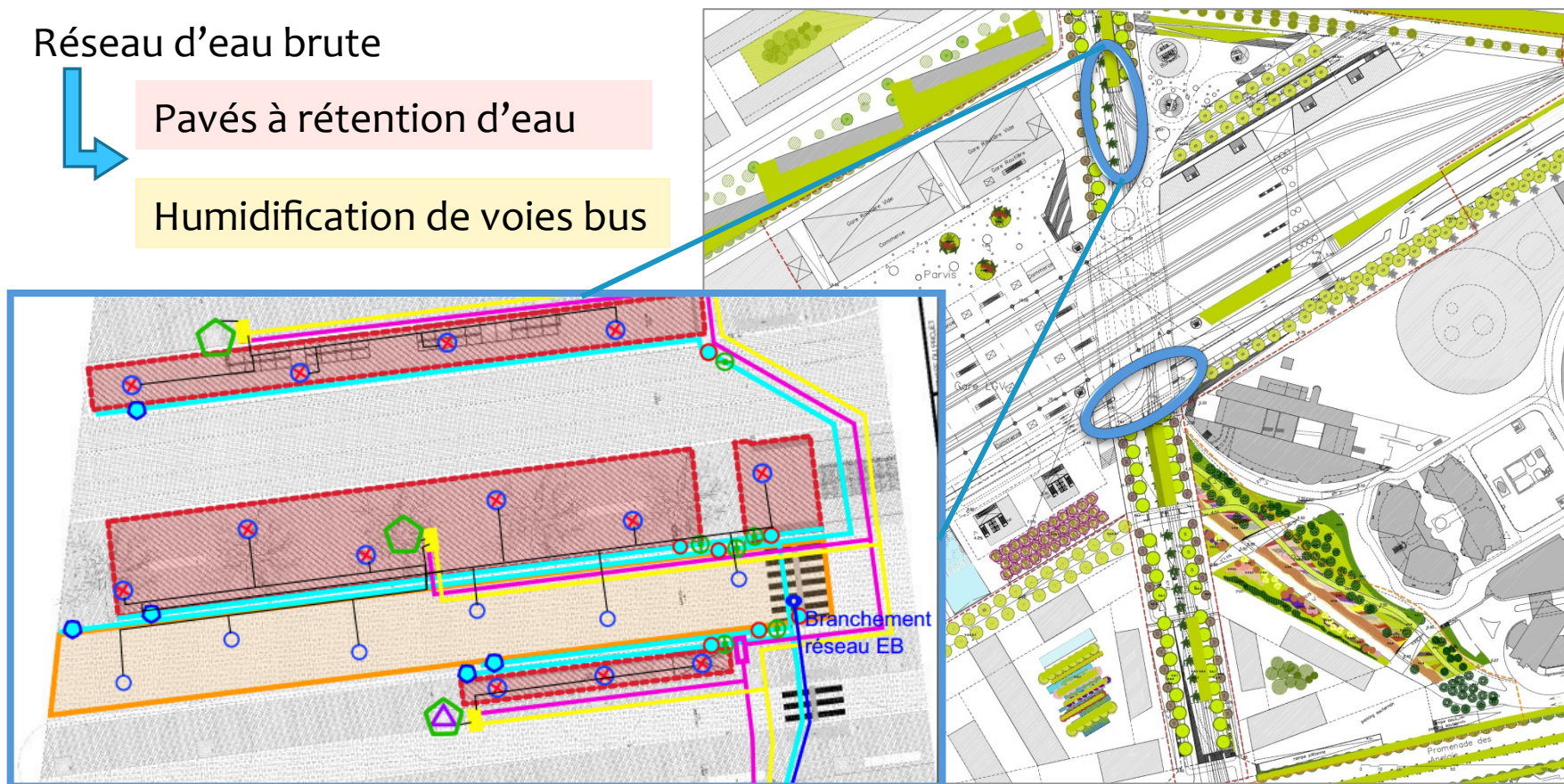
Futur Pole Multimodal de Nice Création d'une zone de confort :

Réseau d'eau brute



Pavés à rétention d'eau

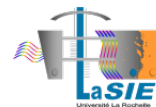
Humidification de voies bus





Modèle d'humidification Solene-Microclimat

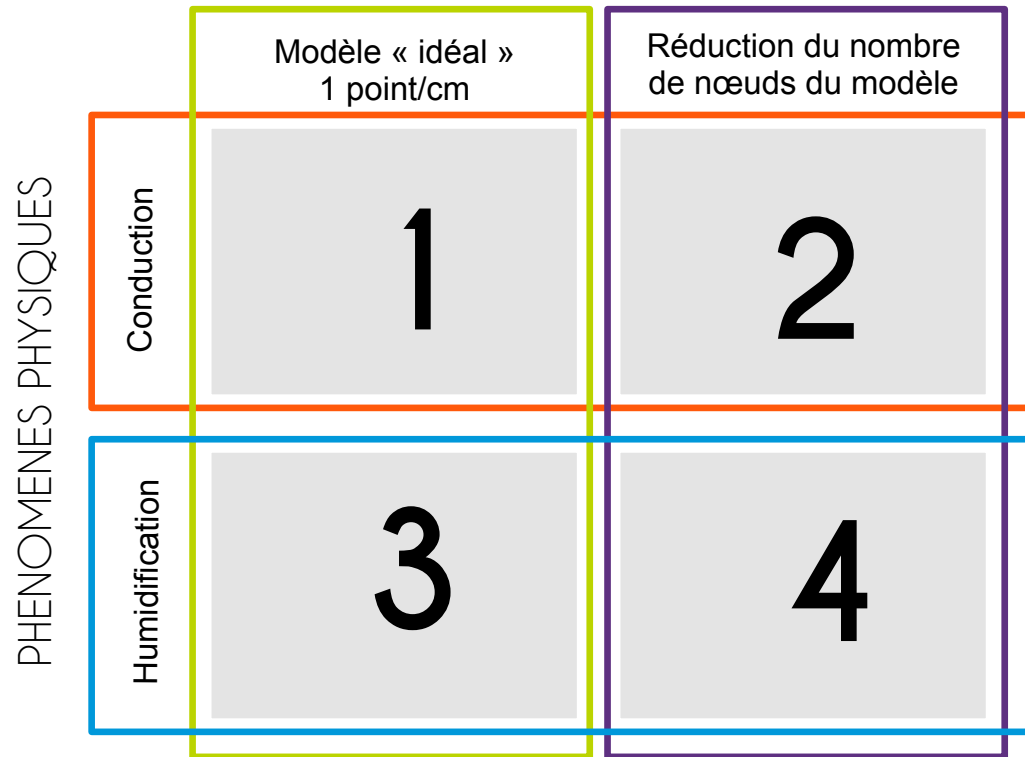
Séminaire EVA à Lyon le 23/03/2016



Méthodologie

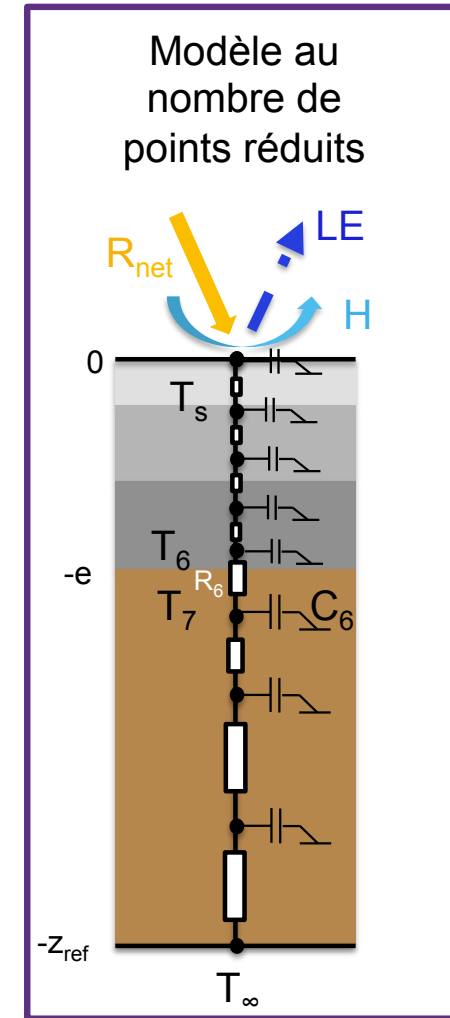
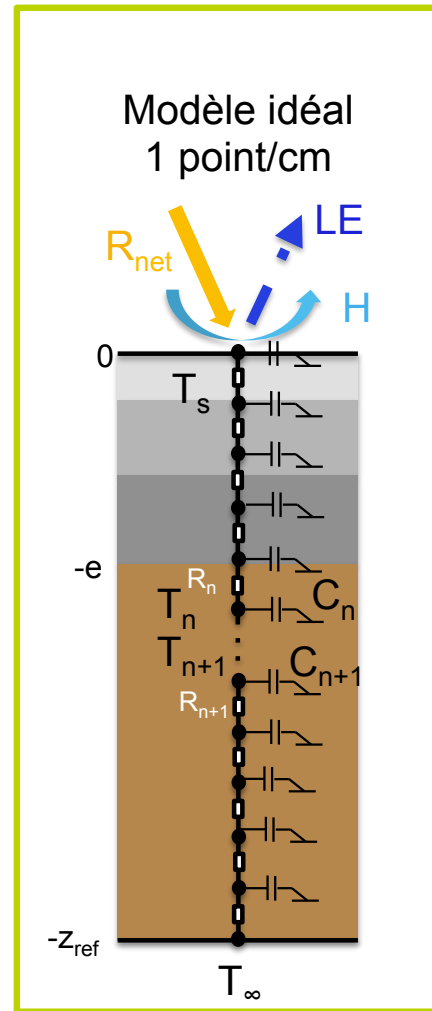
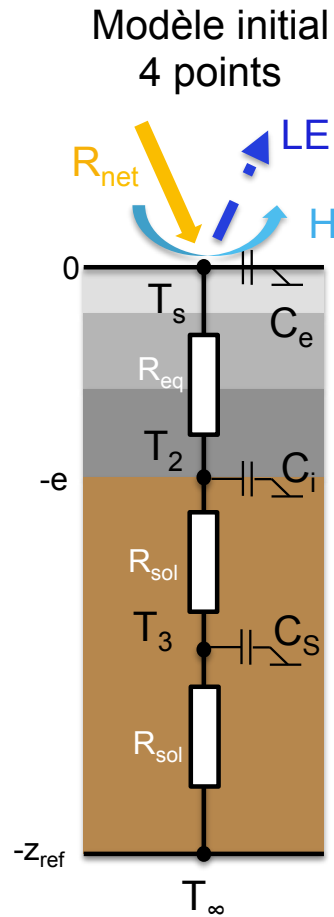
0 Présentation de ROSURE

DISCRETISATION NODALE

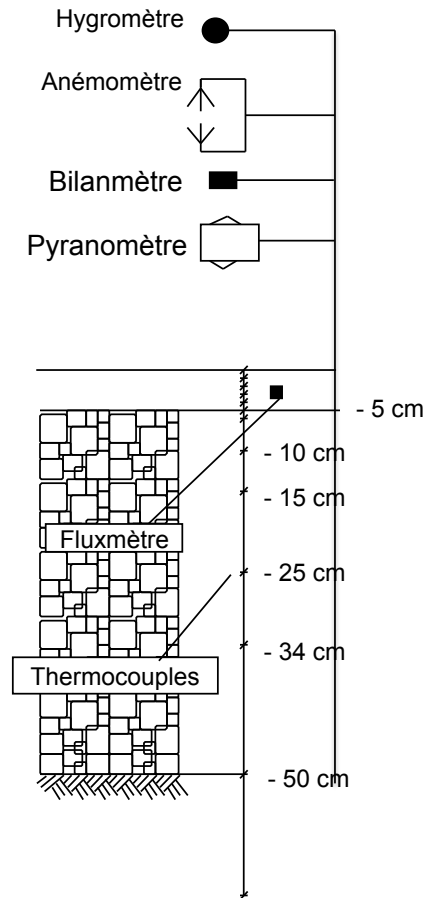


5 Modélisation de la rue de la Buire à Lyon
Applications possibles du modèle

Schéma des différents modèles de points

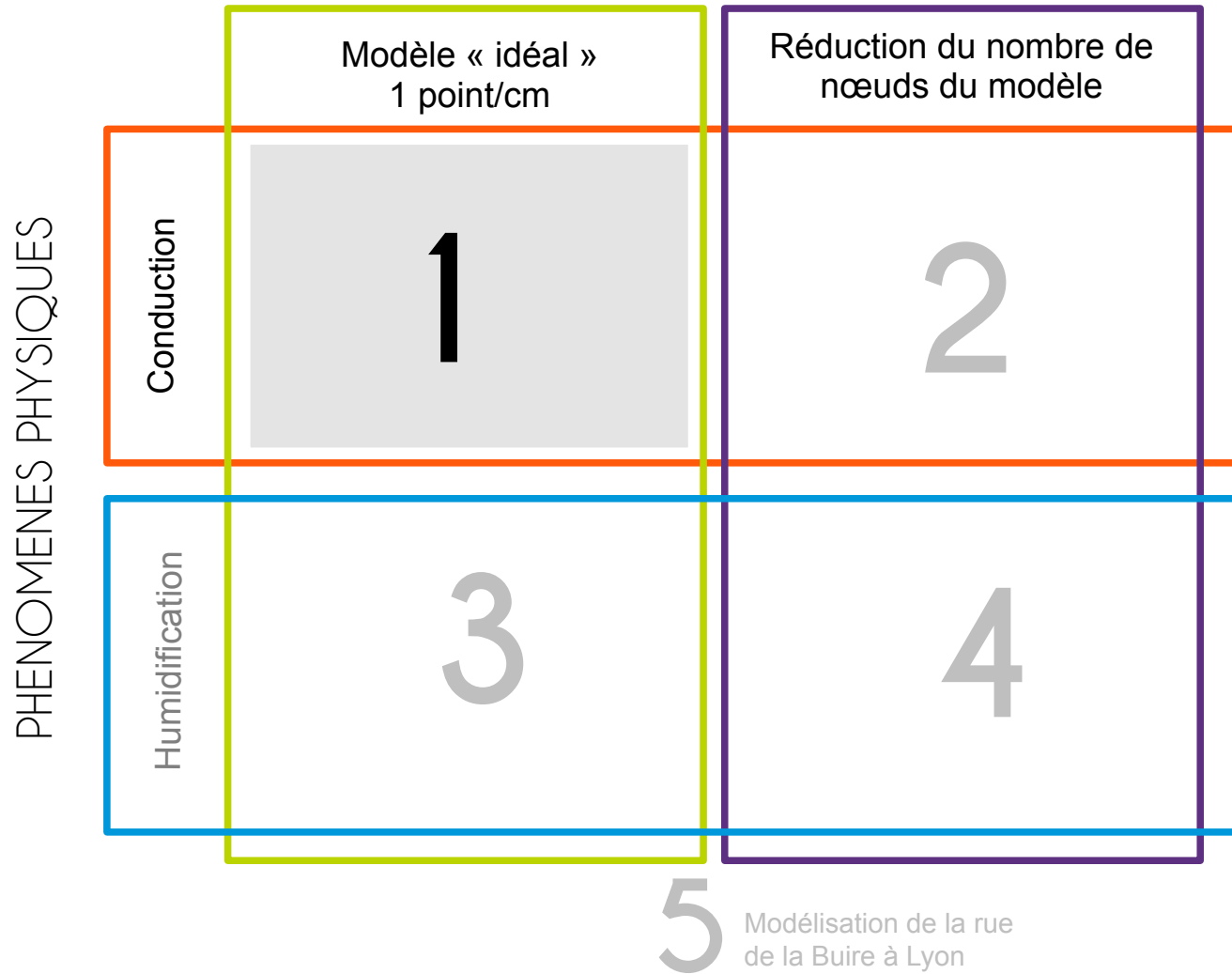


Présentation de ROSURE



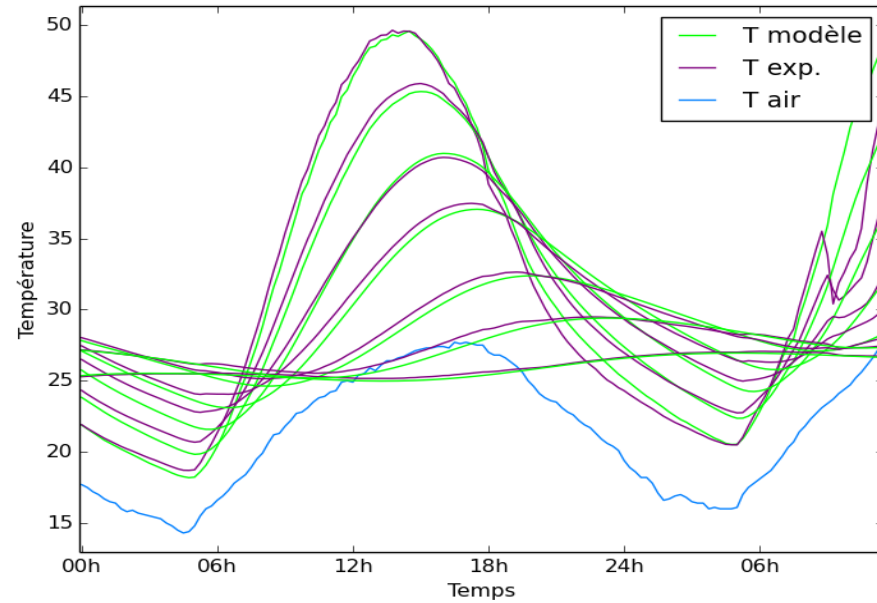
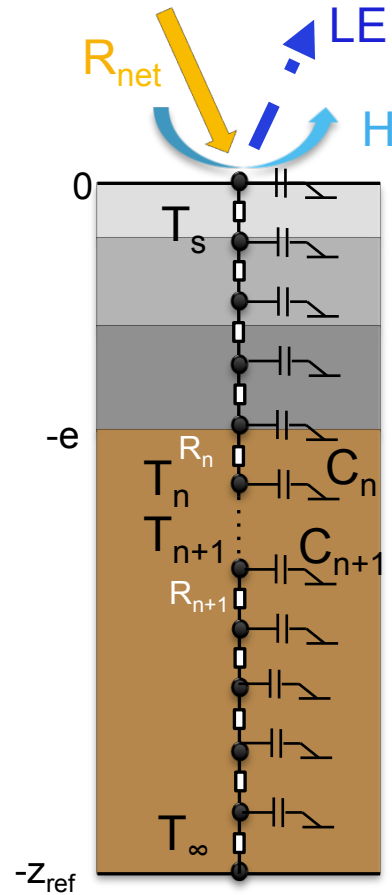
0 Présentation de ROSURE

DISCRETISATION NODALE



Modèle « idéal » 1 point/cm

Conduction



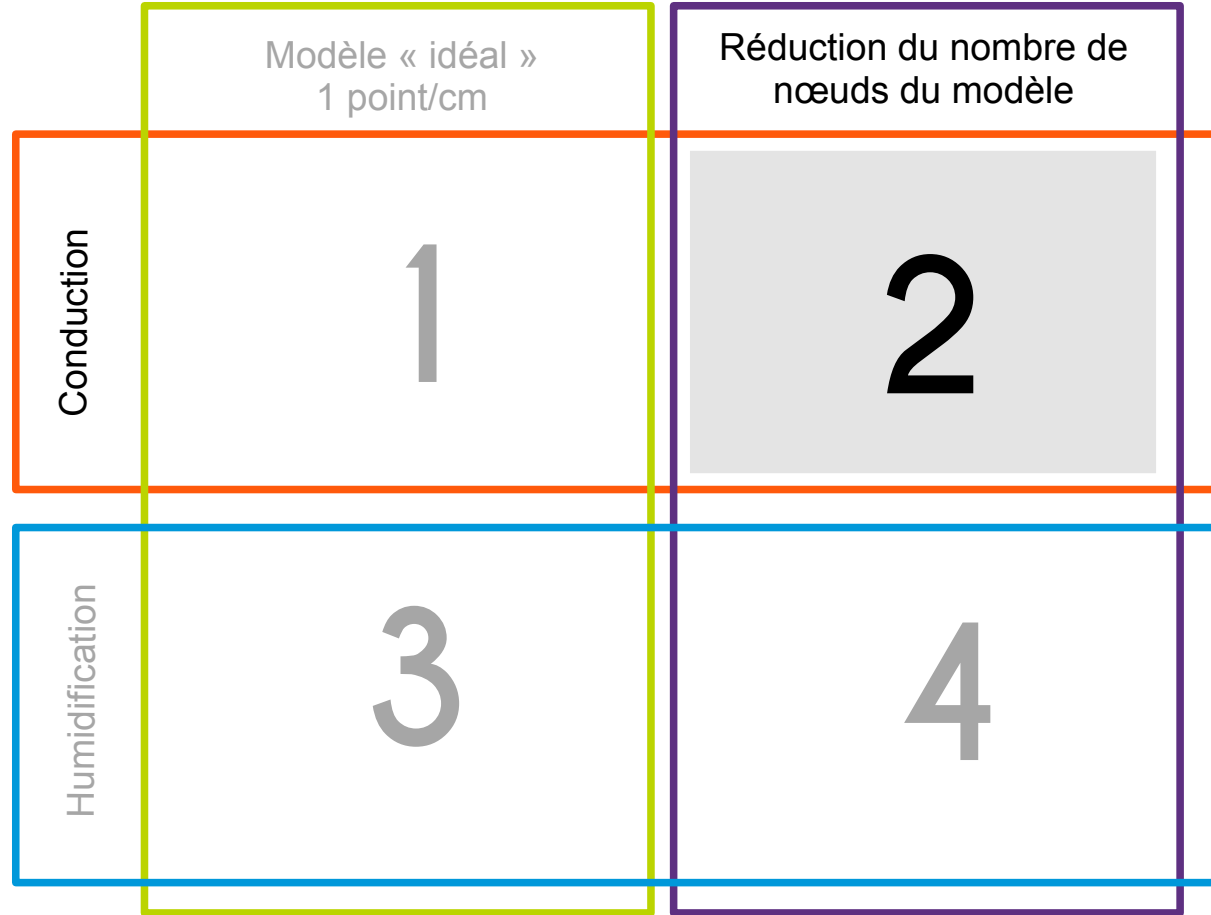
Ecart quadratique moyen de 0,53

0

Présentation de ROSURE

DISCRETISATION NODALE

PHENOMENES PHYSIQUES

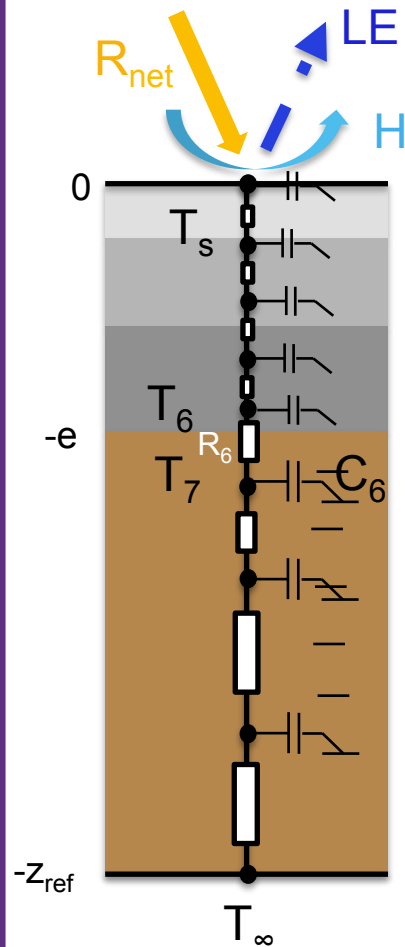


5

Modélisation de la rue
de la Buire à Lyon

Réduction du nombre de points

Conduction

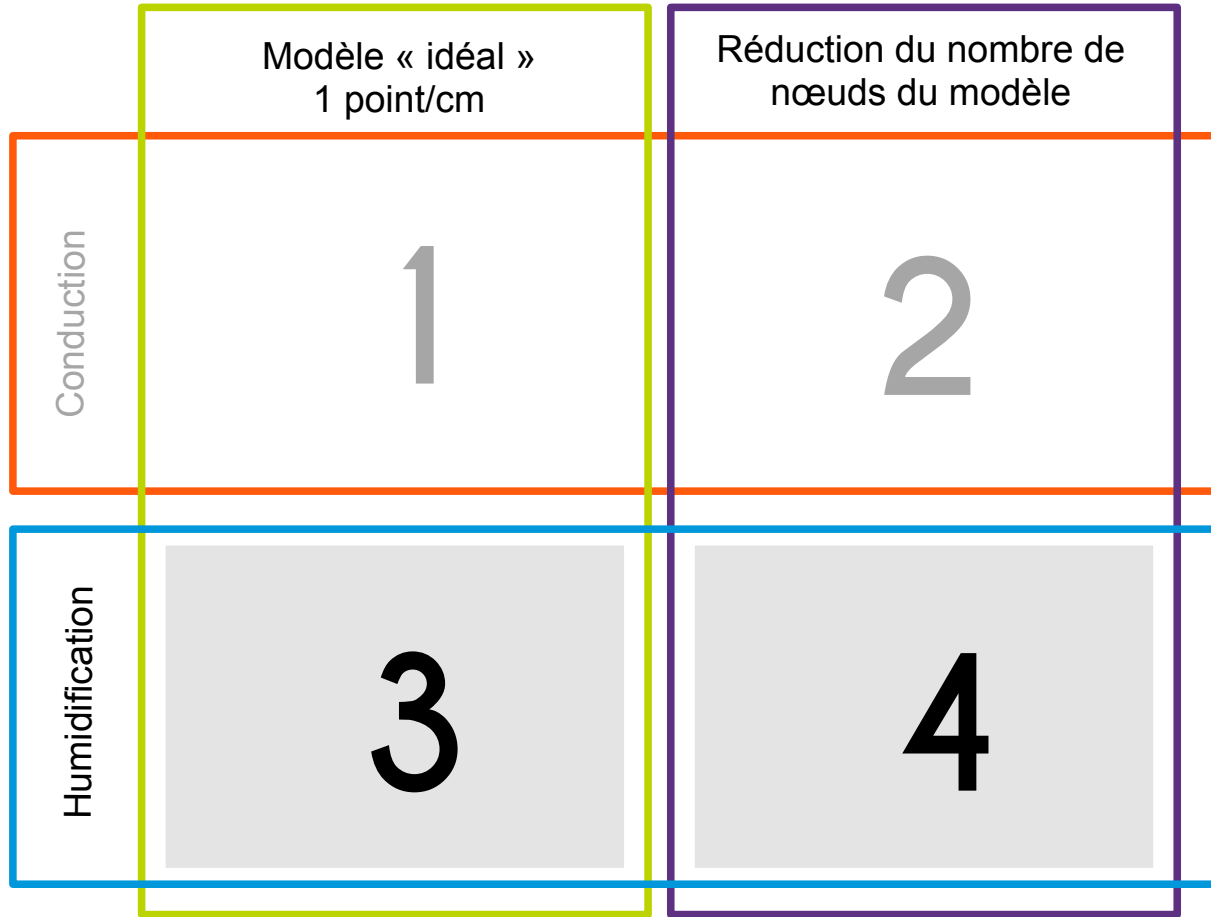


Nombre de points	75	22	12	9
Erreur quadratique moyenne(°C)	0,53	0,56	0,75	1,05

0 Présentation de ROSURE

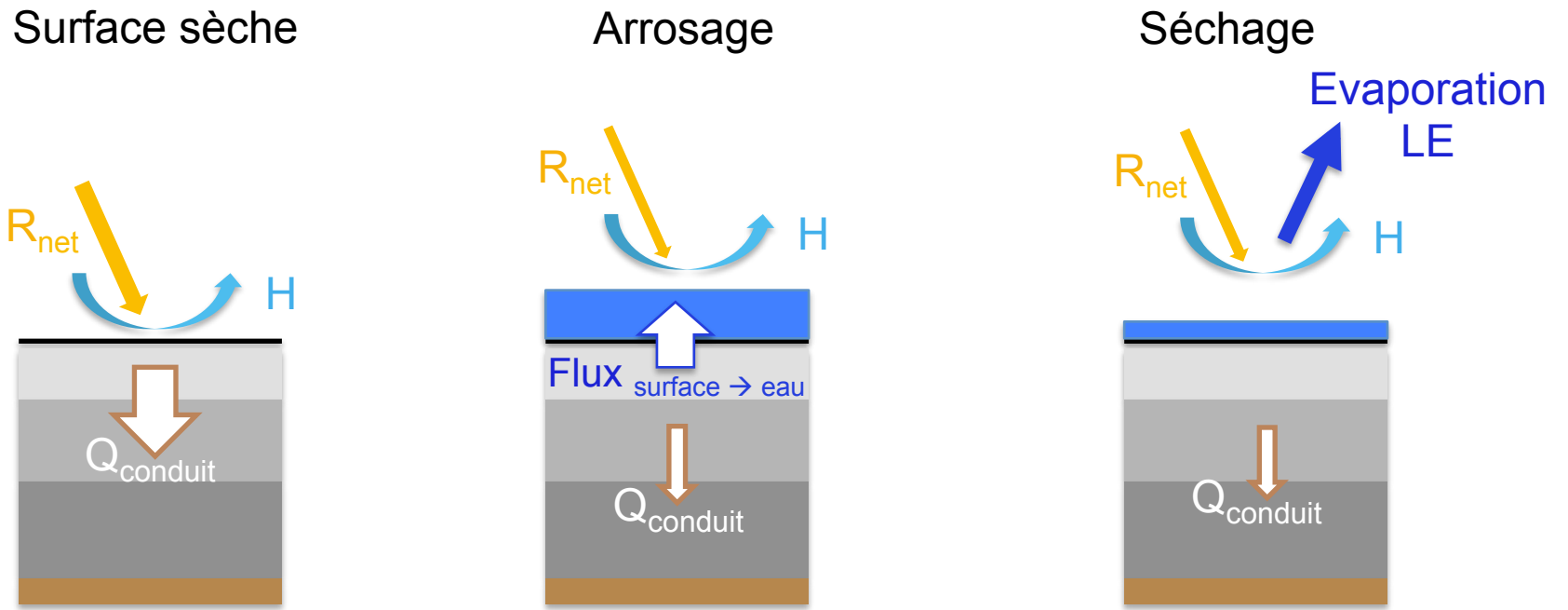
DISCRETISATION NODALE

PHENOMENES PHYSIQUES



5 Modélisation de la rue de la Buire à Lyon

Modèle d'humidification



Réduction du modèle

Modèle	1pt/cm	22pt
Erreur quadratique moyenne	0,96	1,37

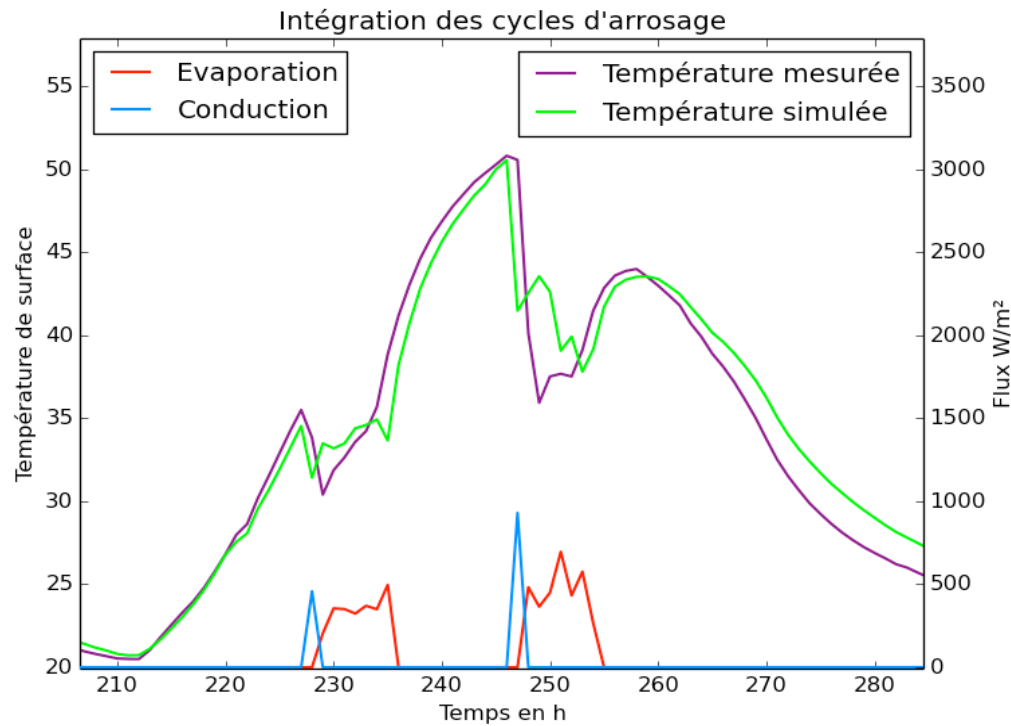


Tableau récapitulatif de la précision du modèle

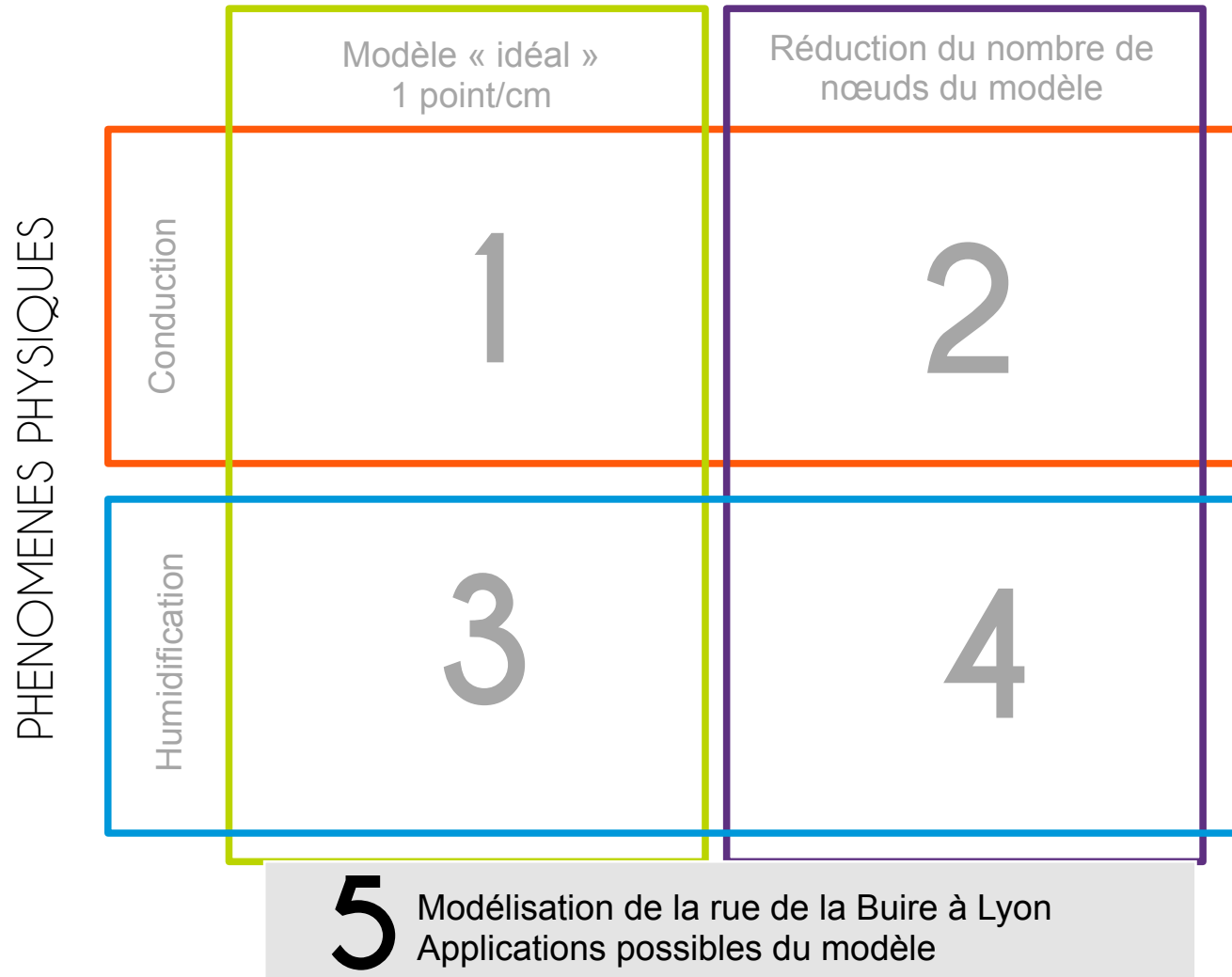
DISCRETISATION NODALE

	Modèle « idéal » 1 point/cm	Réduction du nombre de nœuds du modèle
PHENOMENES PHYSIQUES Conduction	0,53 °C	0,56 °C
Humidification	0,96 °C	1,37 °C

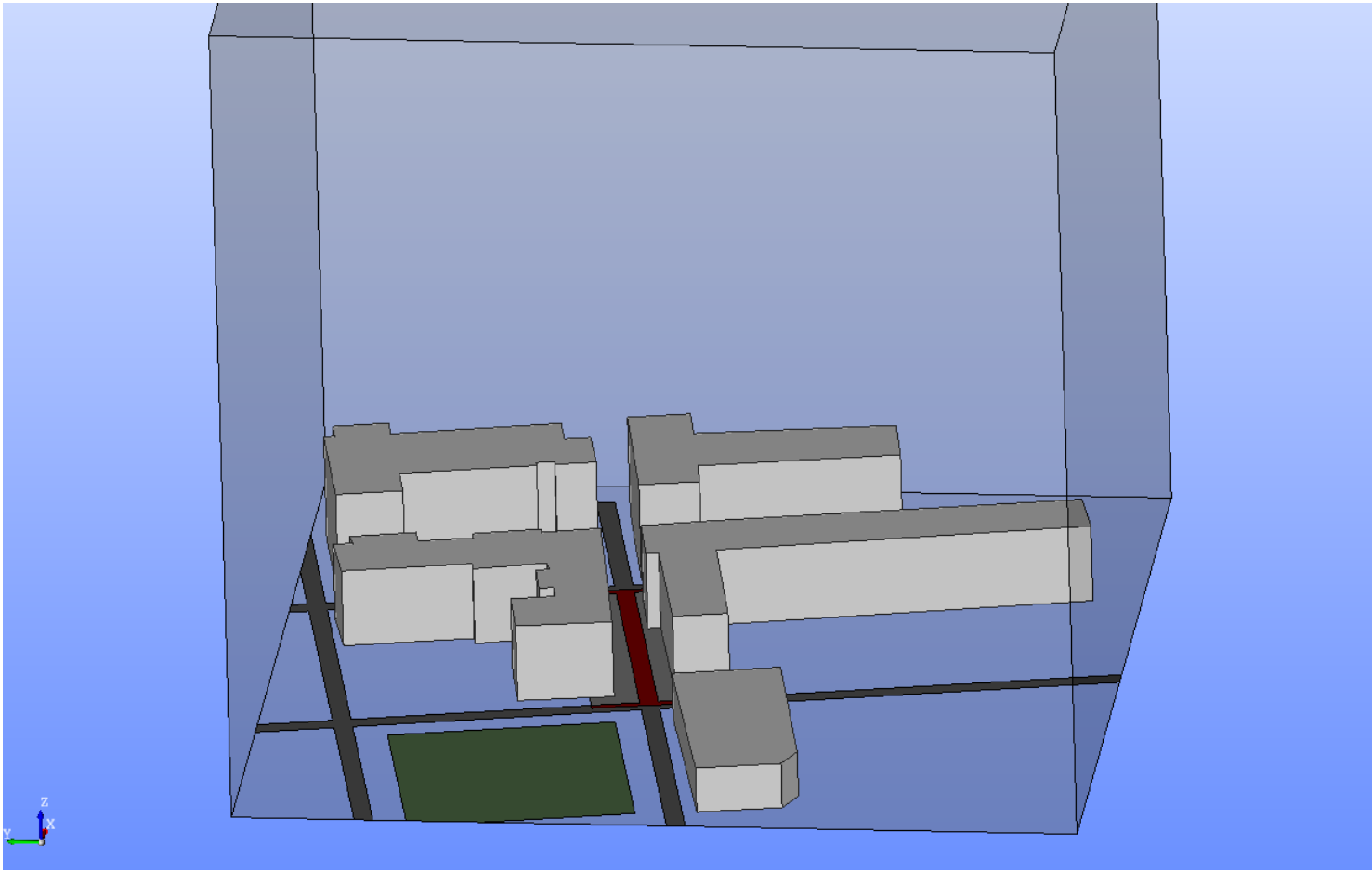
0

Présentation de ROSURE

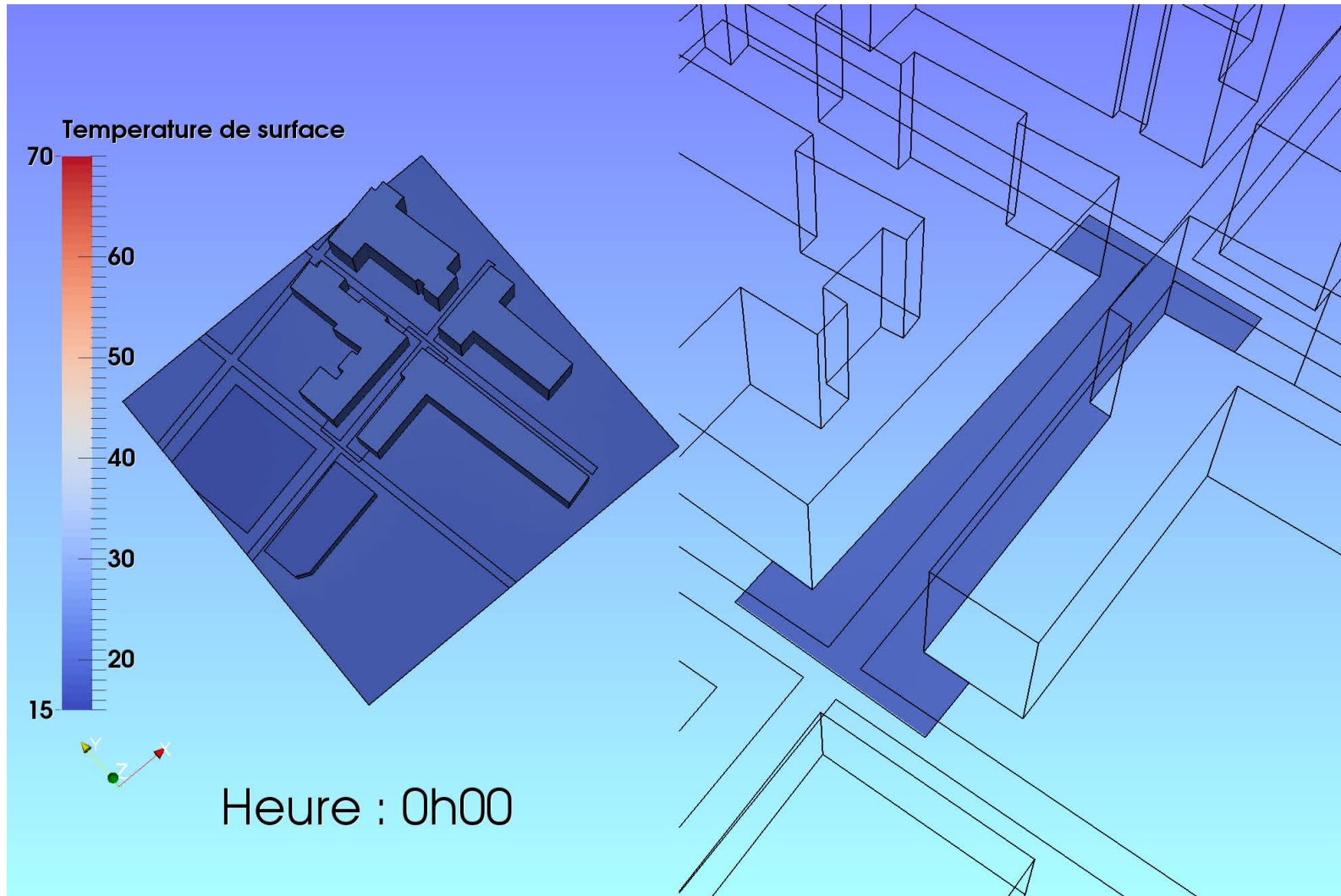
DISCRETISATION NODALE



Modélisation de la rue de la Buire



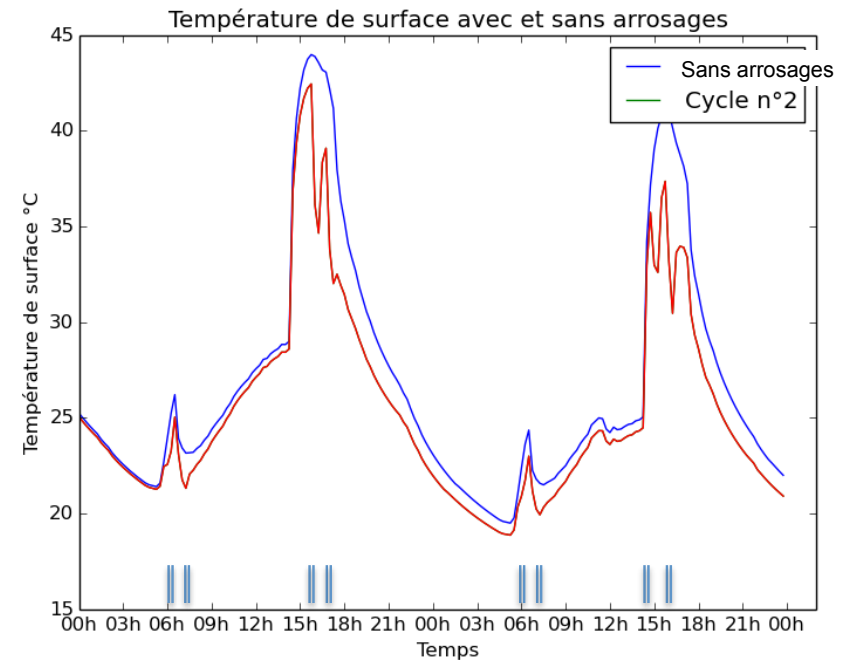
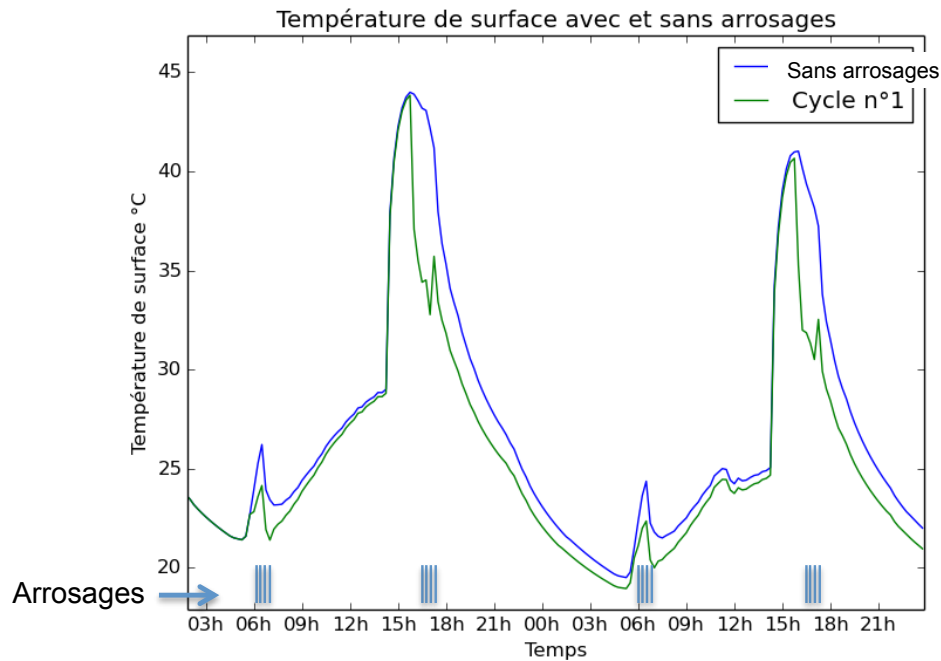
Température de surface simulée



Comparaison de la température simulée avec et sans arrosages

Cycle n°1: 1h d'évaporation à 6h et 16h

Cycle n°2: 1/2h d'évaporation à 6h, 7h, 16h, 17h.



7.3. Choix des sites et mise en place des scénarios - Benjamin MORILLE et Marjorie MUSY



Choix des sites et mise en place des scénarios

Benjamin Morille, Adrien Gros et Marjorie MUSY

Séminaire EVA à Lyon le 23/03/2016

 **IRSTV** FR CNRS 2488
Institut de Recherche
en Sciences et Techniques de la Ville



ZEI  **VEOLIA**



AAU crenou
ambiances
architectures
urbanités 

LHEEA



Choix des sites

Séminaire EVA à Lyon le 23/03/2016

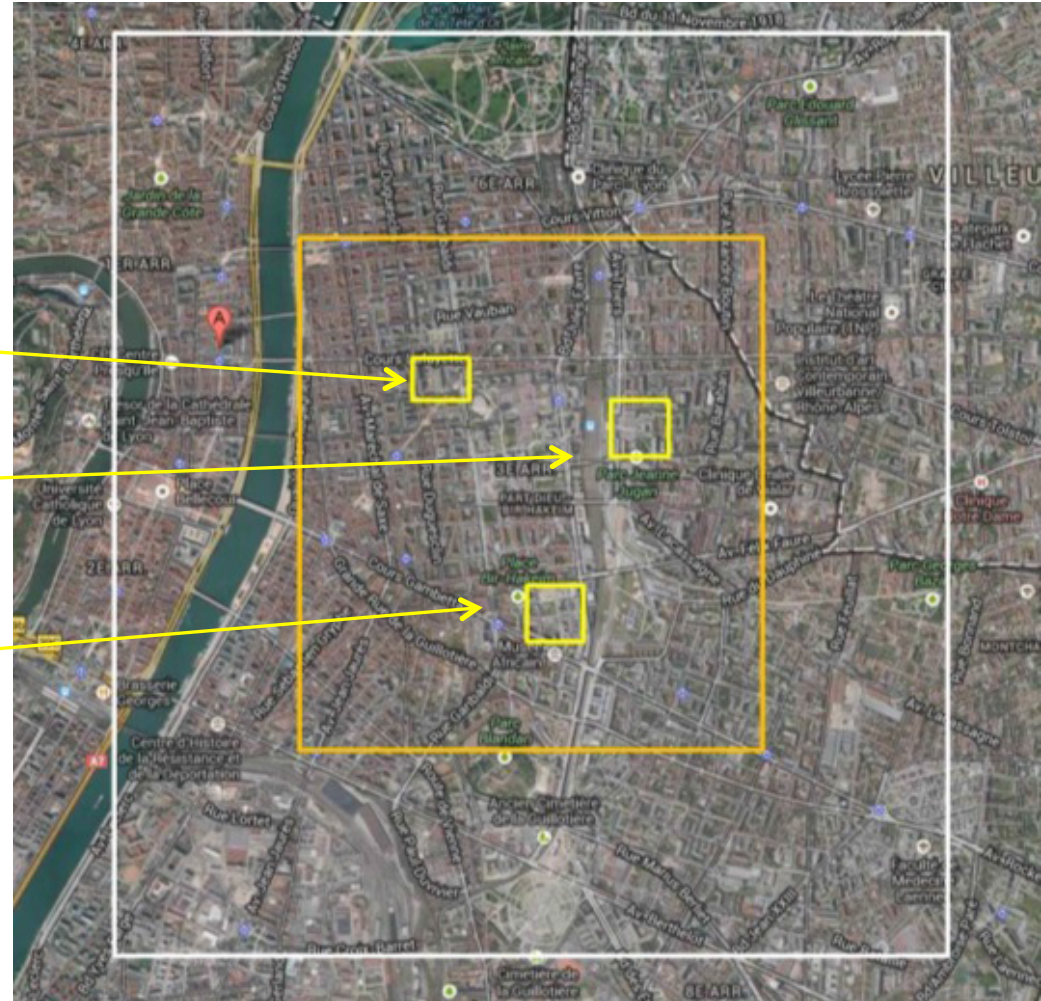


Quartier Part-Dieu (un quartier dense, en évolution, avec du bâti ancien dont la réhabilitation est problématique)
3 sites d'étude choisis pour leurs caractéristiques et intérêt

Barres rue Moncey

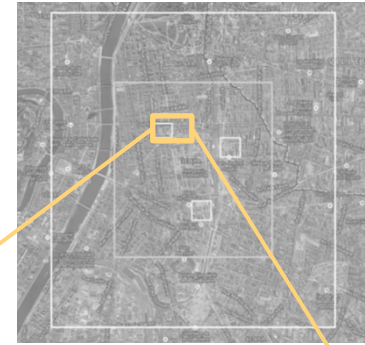
Place de Francfort

ZAC de la Buire



Barres Moncey

- Immeubles de logements (1963-65)
- 135m de long sur 53m de haut
- *label «patrimoine du XXème siècle»*

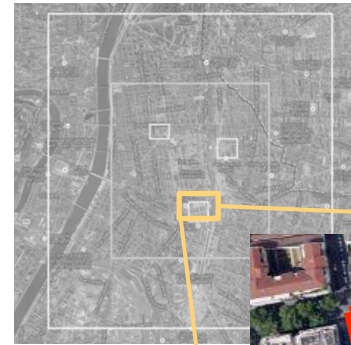


Google Maps© & skyscrapercity.com



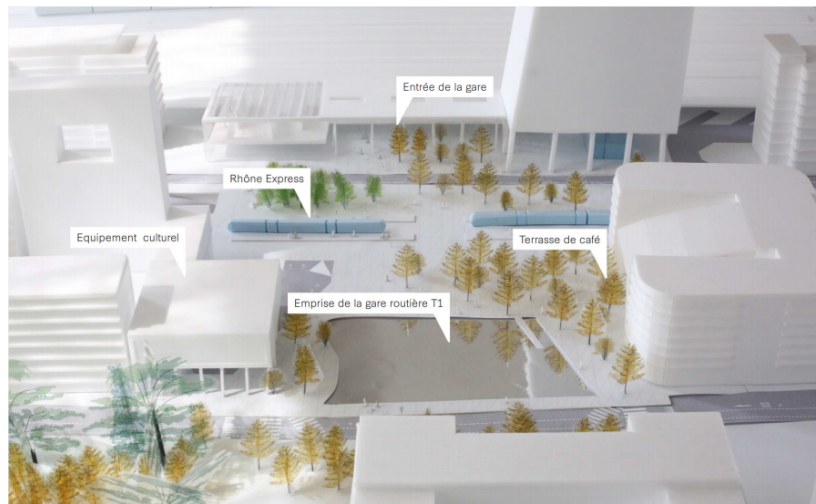
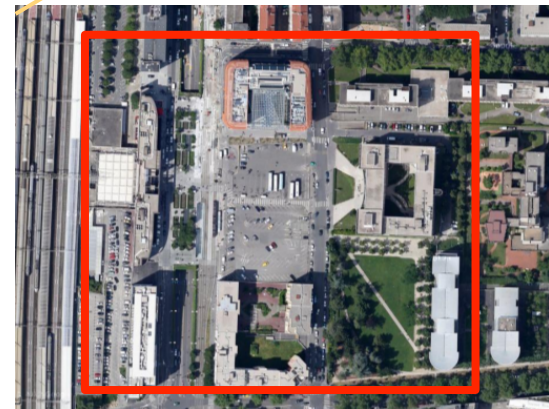
ZAC de la Buire

- Quartier neuf de centre-ville, typique d'un nouveau quartier dense, comportant un espace vert, une grande avenue en bordure
- Points particuliers : présence du pilote d'humidification de chaussée situé rue de la Buire et d'un stockage d'eaux pluviales



Part-Dieu (Place Francfort)

- Place très minérale en réaménagement
- Recherche de solutions pour promouvoir l'attractivité de l'espace public



Elaboration des scénarios

Séminaire EVA à Lyon le 23/03/2016



Scénarios Monodispositifs

Eau

Végétation

Albédo

Scénario optimisé

Eau + Végétation + Albédo

Scénarios Soustractifs

Optimisé

-

Eau

Optimisé

-

Végétation

Optimisé

-

Albédo

Zac de la Buire



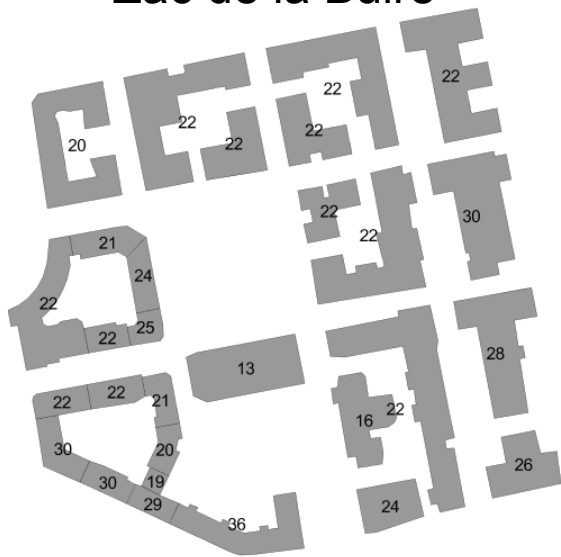
Place de Francfort



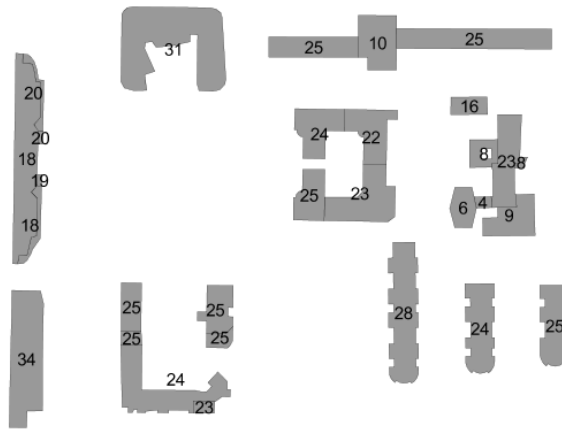
Quartier des
barres Moncey



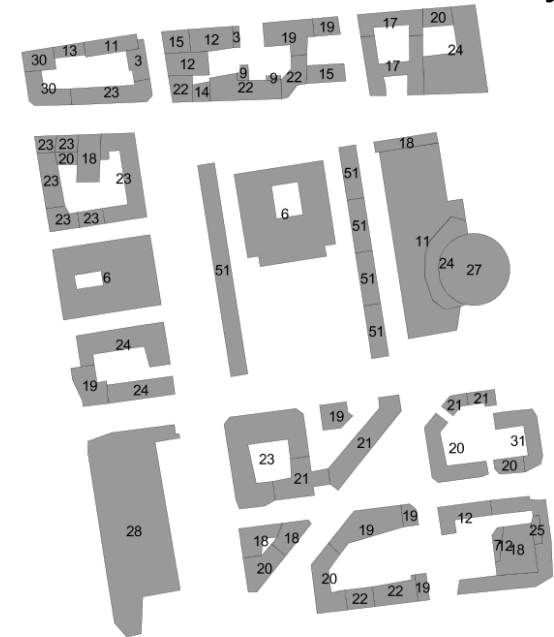
Zac de la Buire



Place de Francfort



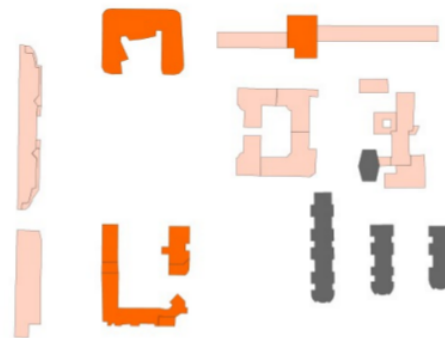
Quartier des barres Moncey



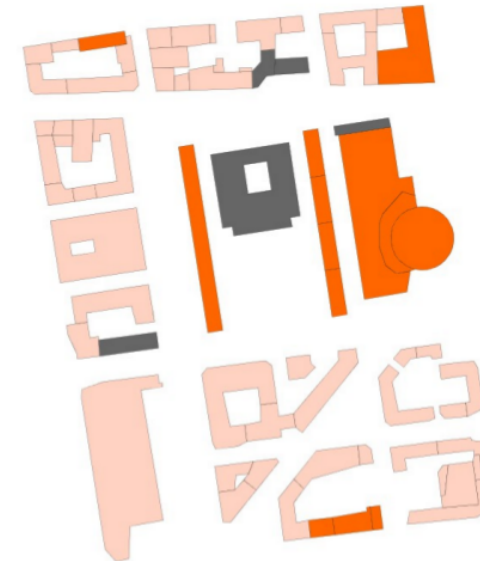
Zac de la Buire



Place de Francfort



Quartier des barres Moncey



Albédo faible



Albédo moyen

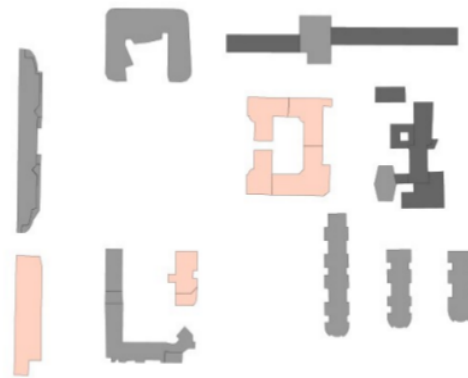


Albédo fort

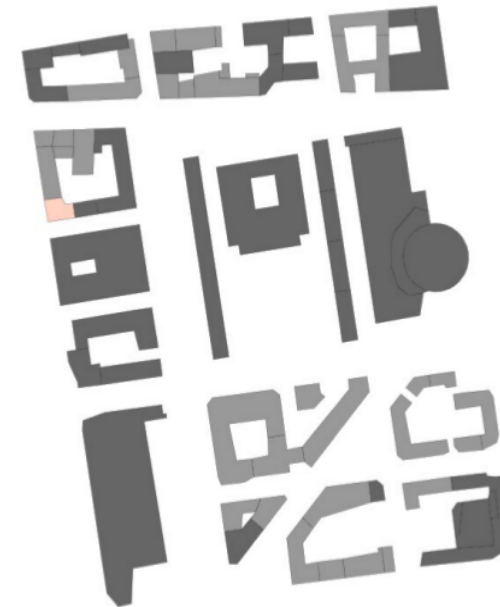
Zac de la Buire



Place de Francfort



Quartier des barres Moncey



Albédo faible



Albédo moyen

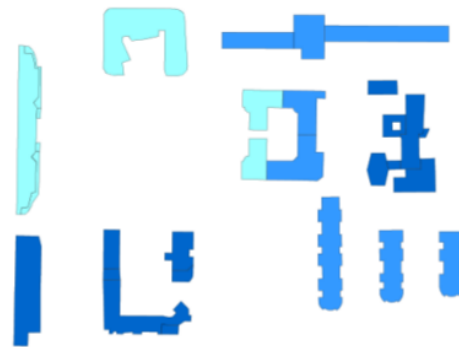


Albédo fort

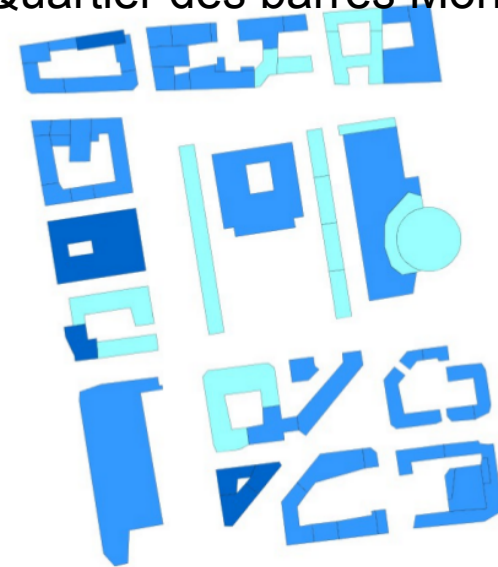
Zac de la Buire





Place de Francfort




Quartier des barres Moncey



 Pourcentage de vitrage faible

 Pourcentage de vitrage moyen

 Pourcentage de vitrage fort

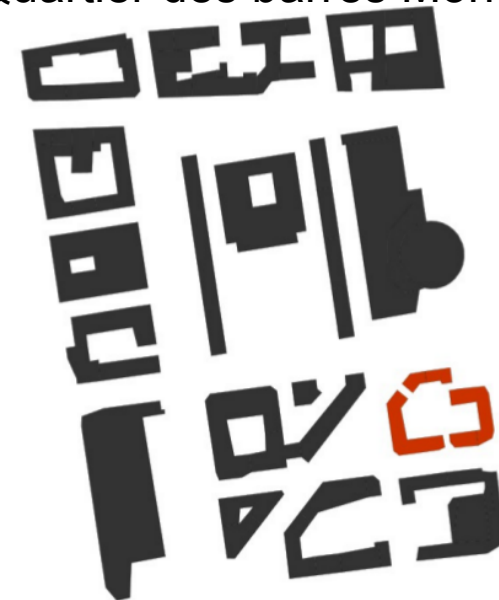
Zac de la Buire



Place de Francfort



Quartier des barres Moncey

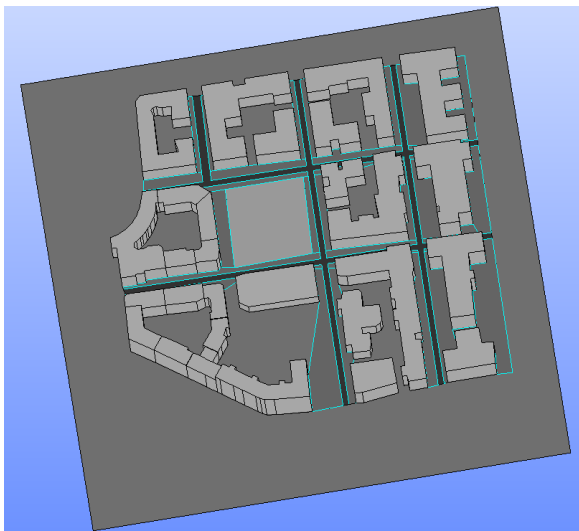


■ Isolation faible

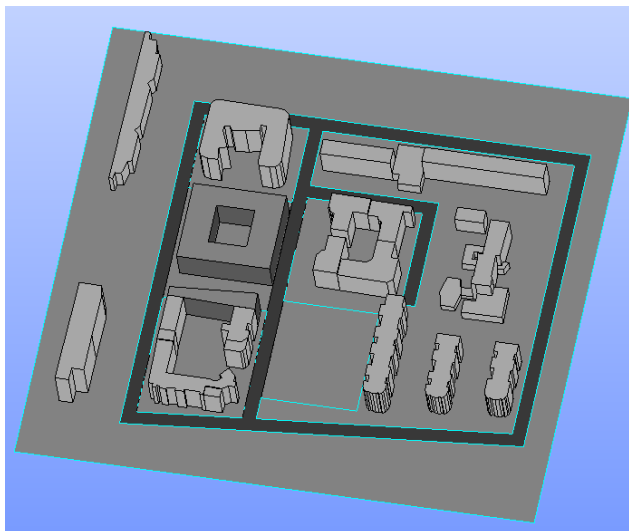
■ Isolation moyenne

■ Isolation forte

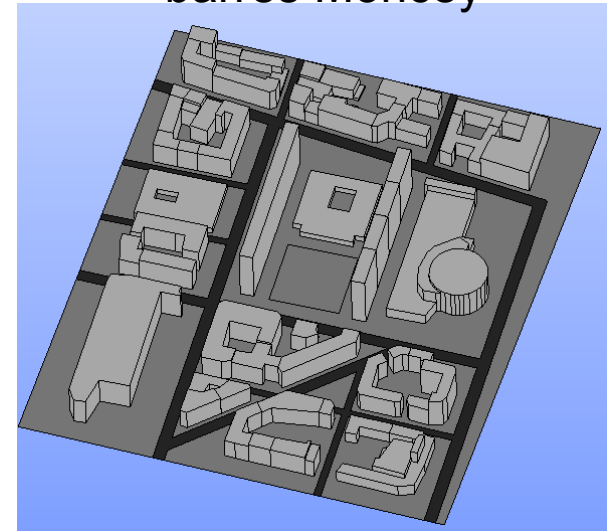
Zac de la Buire



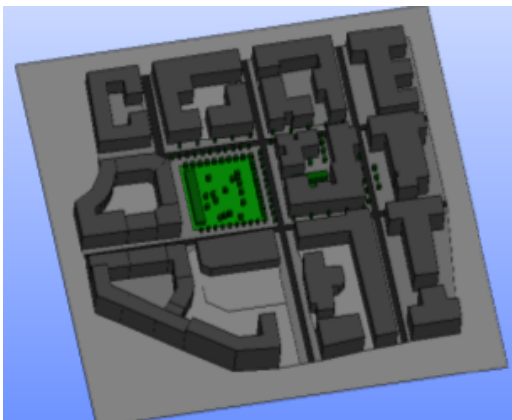
Place de Francfort



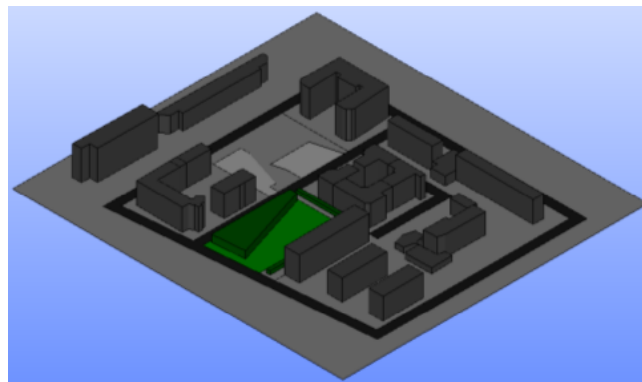
Quartier des
barres Moncey



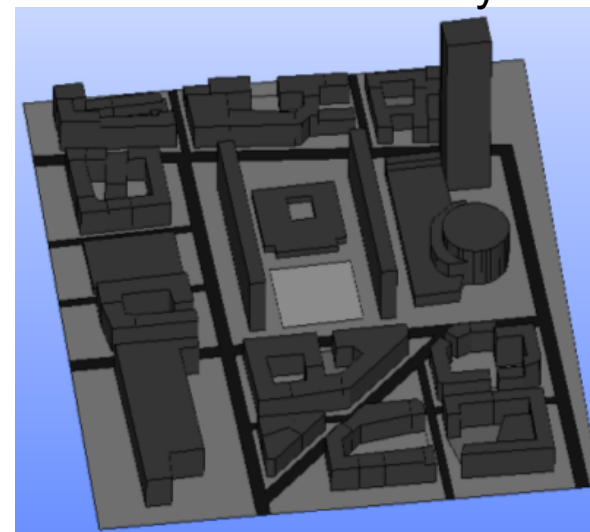
Zac de la Buire



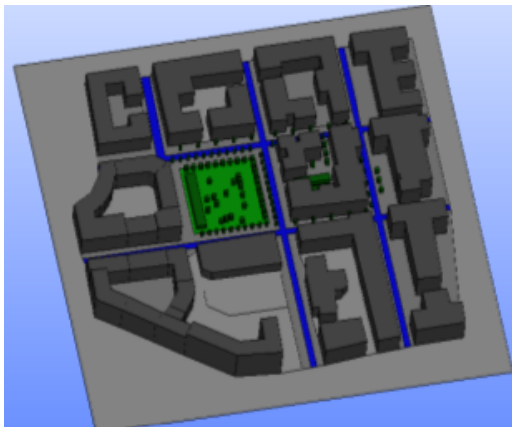
Place de Francfort



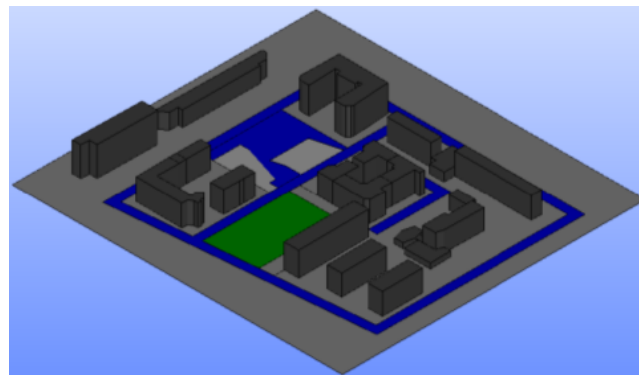
Quartier des
barres Moncey



Zac de la Buire



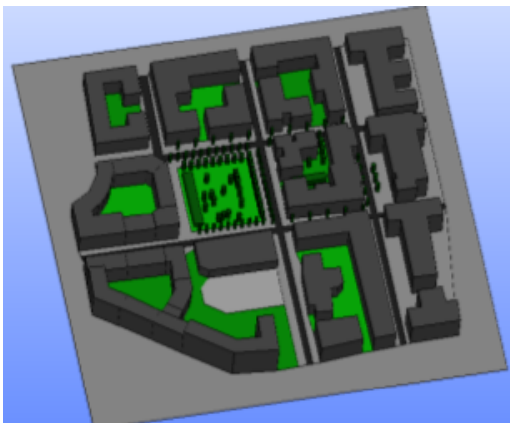
Place de Francfort



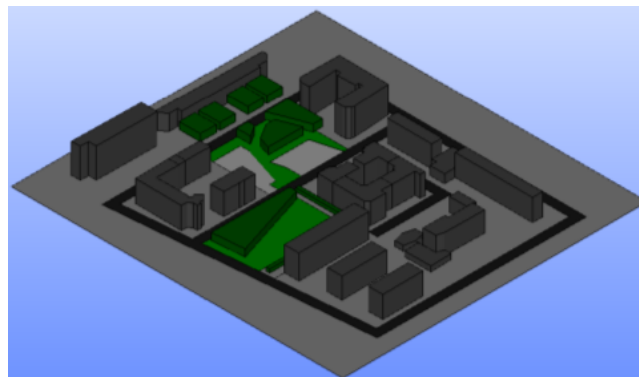
Quartier des
barres Moncey



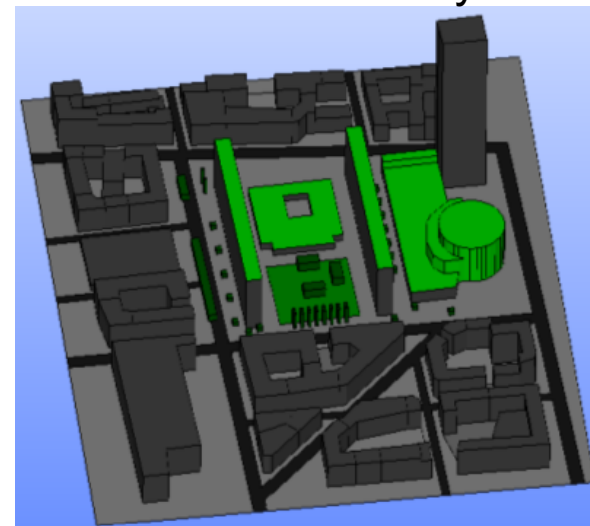
Zac de la Buire



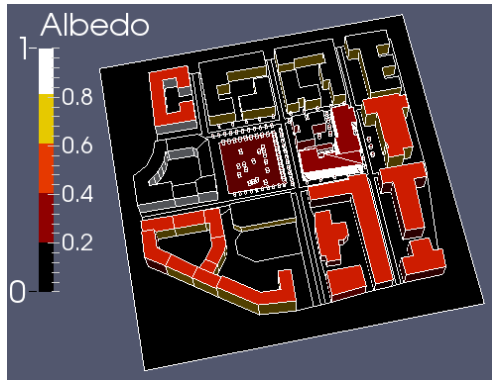
Place de Francfort



Quartier des
barres Moncey



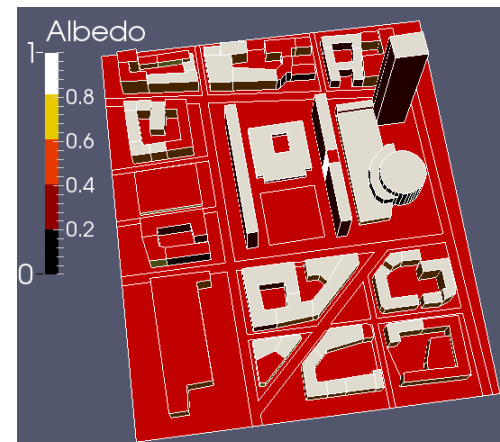
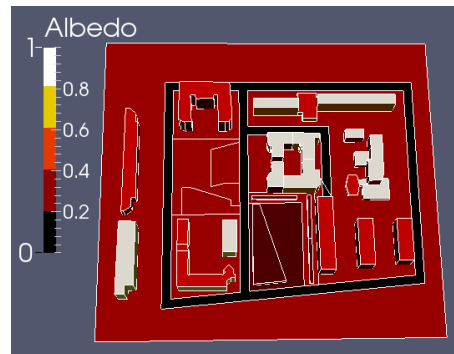
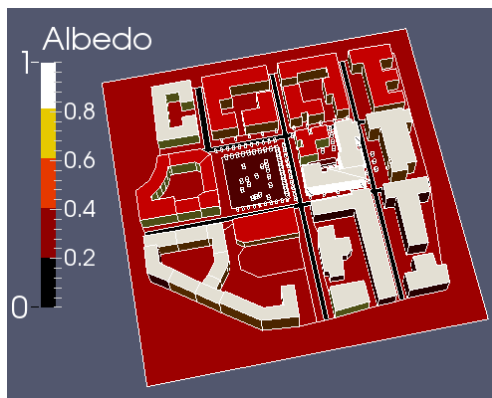
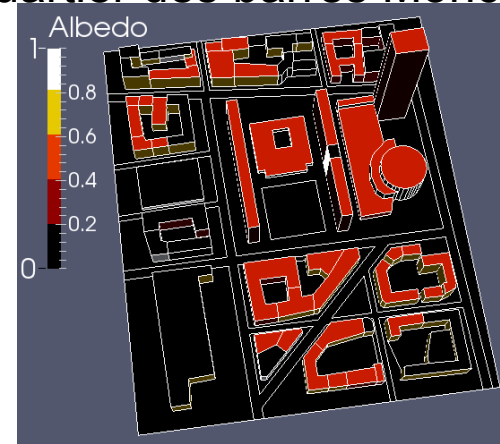
Zac de la Buire



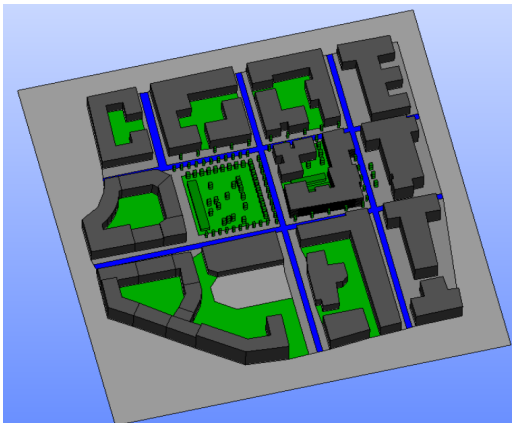
Place de Francfort



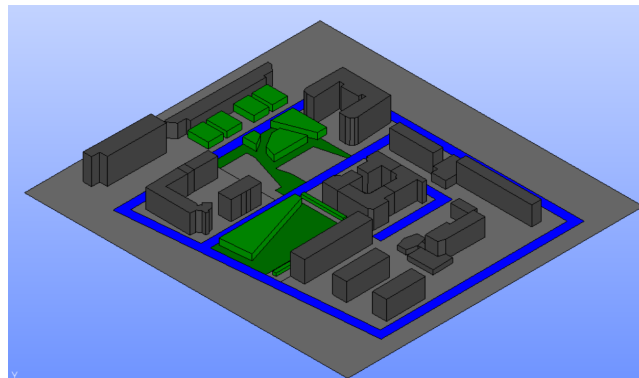
Quartier des barres Moncey



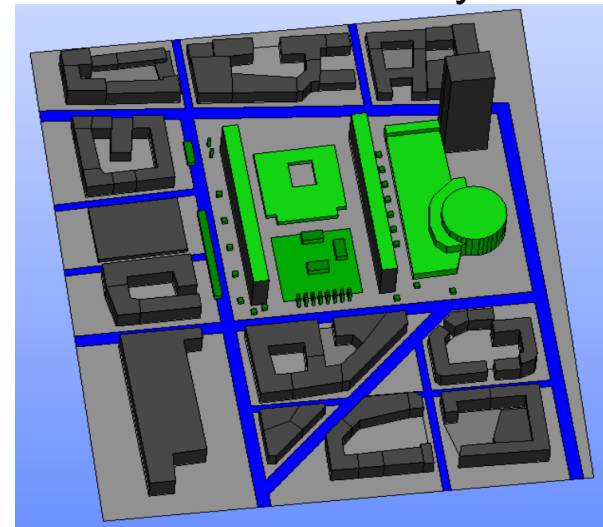
Zac de la Buire



Place de Francfort



Quartier des
barres Moncey



Données de changement climatique

Séminaire EVA à Lyon le 23/03/2016



Scénario de changement climatiques

Plusieurs scénarios sociaux-économiques futurs proposés par le GIEC (2007)

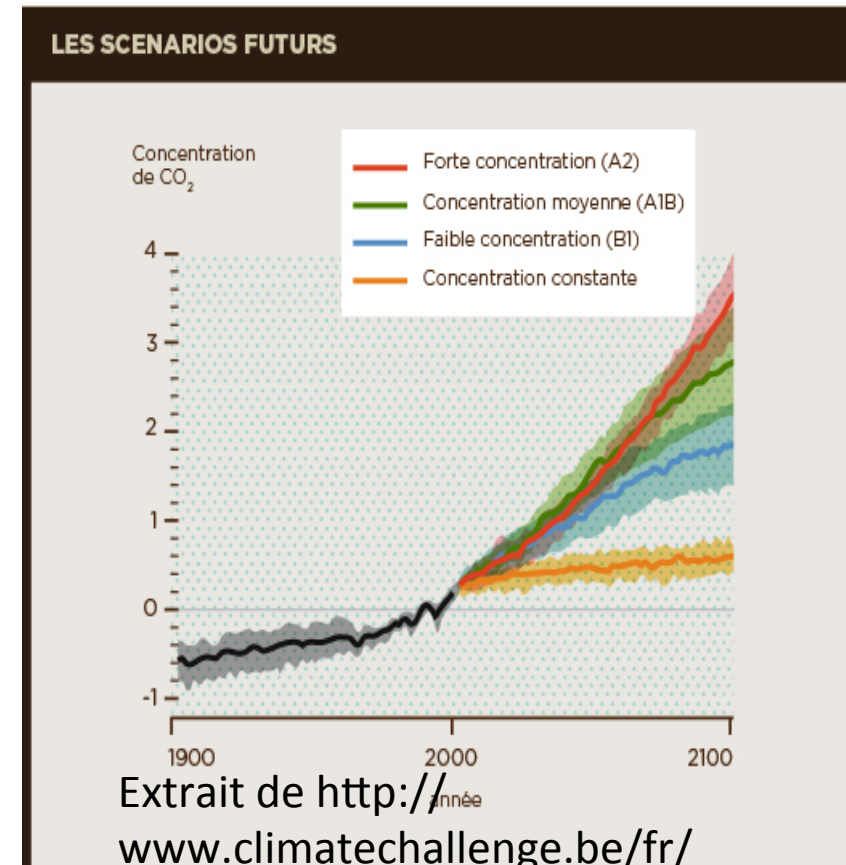
		Priorité	
		économie	environnement
Répartition des richesses	élevée	A1	B1
	faible	A2	B2

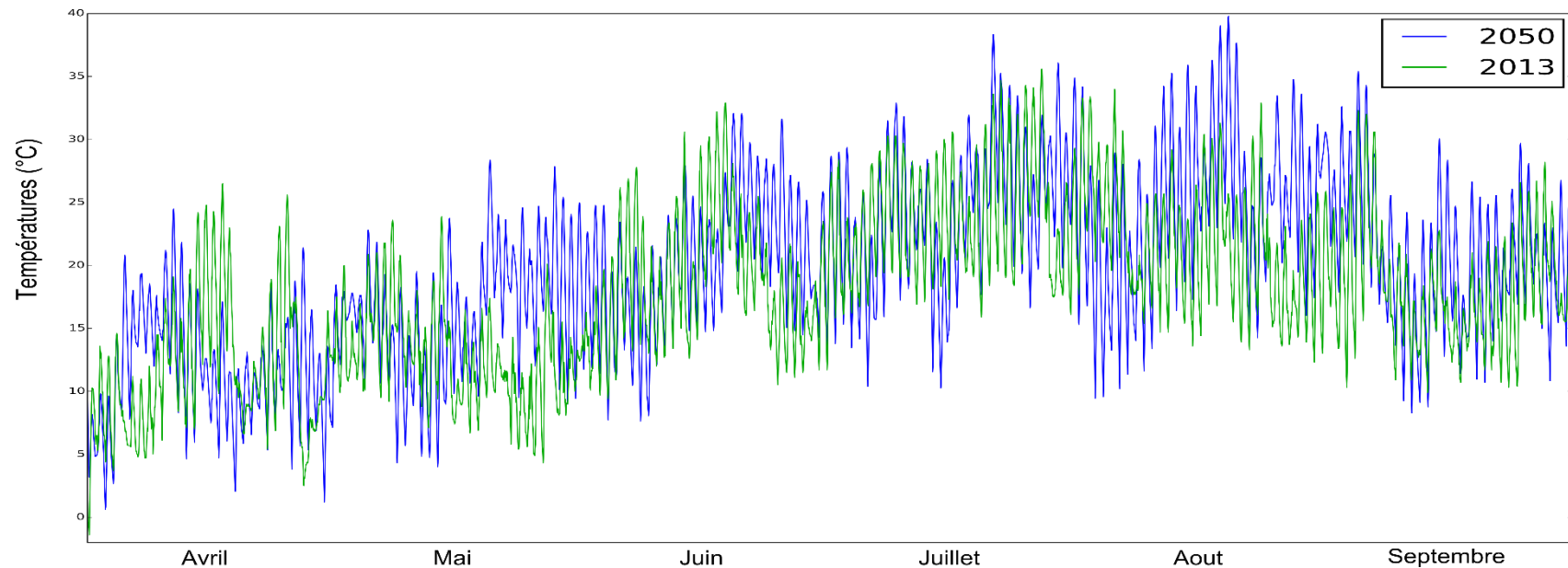


Simulations climatiques pour 2020, 2050 et 2080:

- Augmentation concentrations CO₂
- Augmentation températures

Choix du scénario pessimiste A2





- Utilisation du générateur de climat futur CCWorldWeatherGen (Jentsch et al., 2013)
- Sur la base du Scénario A2 définis par le GIEC
- Utilisation des résultats du modèle atmosphérique **HadCM3**
- Génération de fichiers météo horaires

	2013	2050	augmentation
Nombre de degrés-heures supérieur à 26°C	1515.7	3047	101%
Température maximale (°C)	35.6	39.8	4.2°C
Irradiation solaire (kWh/m ²)	676	729	8%

7.4. Résultats – Stéphanie Zaba, Benjamin MORILLE et Adrien GROS



Résultats de simulation et analyse comparative

Stéphanie Zaba, Benjamin Morille, Adrien Gros

1. Présentation des modèles
2. Méthodologie de l'analyse multicritère
3. Résultats quartier par quartier
4. Résultats 2050
5. Synthèses

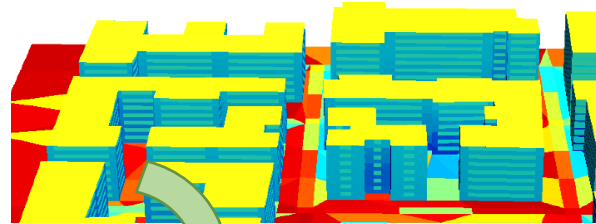


1. Présentation des modèles

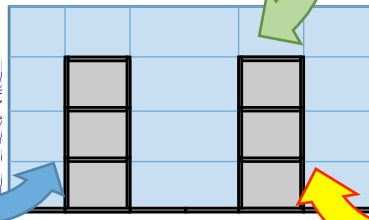
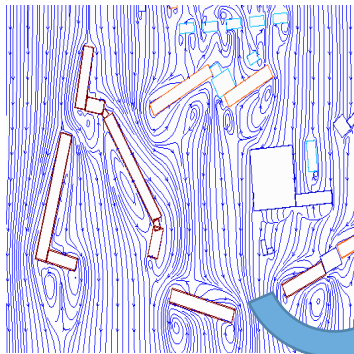
1.1 SOLENE-microclimat et ENVIBATE

EnvibatE

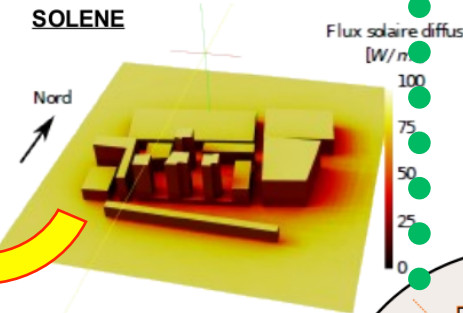
Modèles thermiques dynamiques des bâtiments



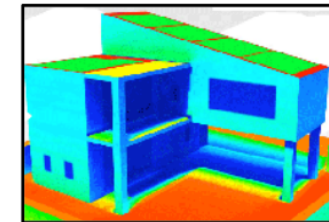
QUIC-URB



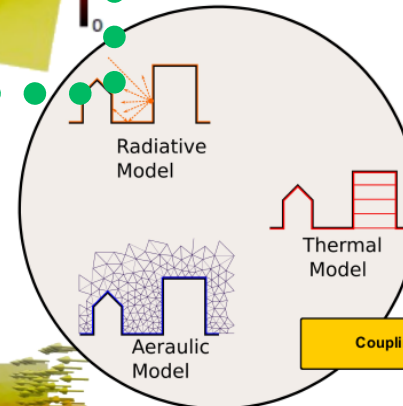
SOLENE



SOLENE-microclimat Model



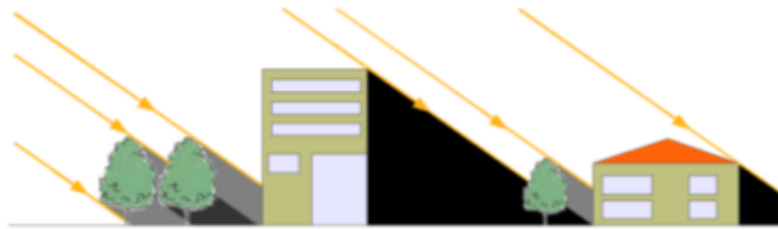
Thermal Building Model



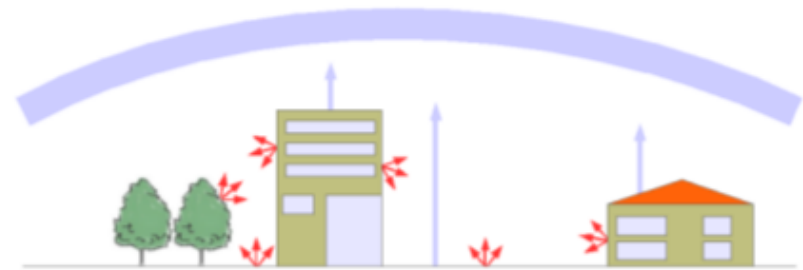
Code Saturne



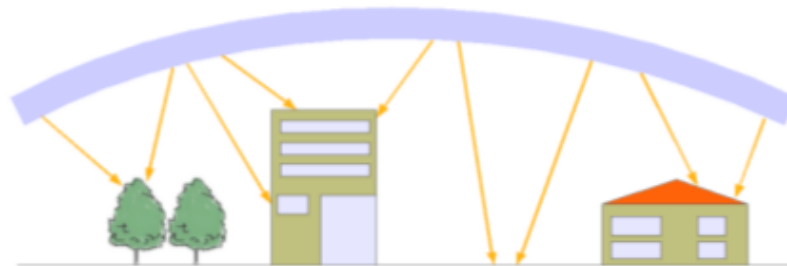
1.1 SOLENE-microclimat et ENVIBATE



Ensoleillement direct, masques solaires



Echanges infrarouges



Ensoleillement diffus



Phénomènes aérodynamiques, échanges convectifs, transport de chaleur



Inter-réflexions solaires, piégage radiatif



Phénomènes évaporatifs, transport d'humidité

1.1 SOLENE-microclimat et ENVIBATE

Capacités des outils

Solene-microclimat :

- Plus de détails :
 - Confort extérieur et intérieur
 - Consommation eau (végétation et humidification)
- Temps de calculs plus important



Simulation pour une semaine pour un bâtiment

EnviBatE :

- Moins de détails
- Interaction entre tous les bâtiments

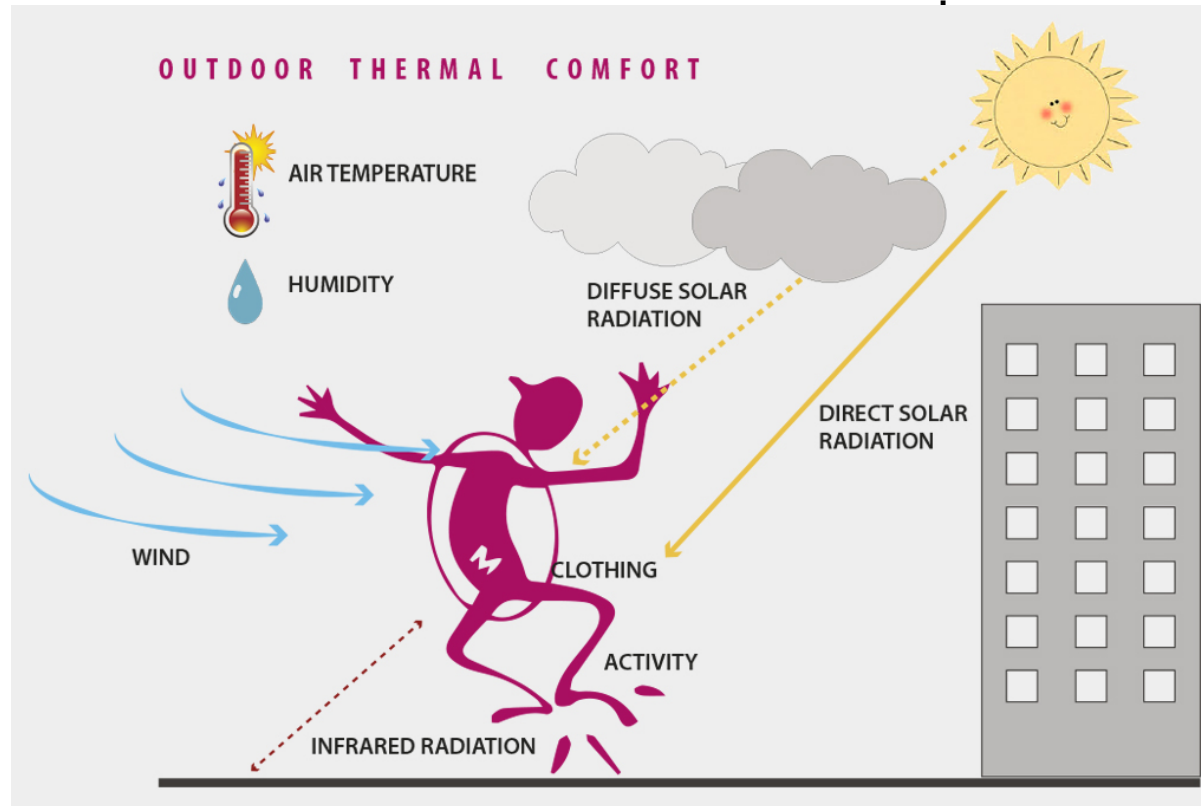


Simulation pour une saison pour tous les bâtiments

	Solene-microclimat	EnviBatE
Temps de calcul	3 à 4 jours	Entre 30 et 48 h
Période de simulation	12/07/2013 – 26/07/2013	01/04/2013-30/09/2013
Nombre de bâtiments	1 seul	tous
Taille mailles 2D	Entre 1 et 50m ²	Entre 5 et 900 m ²
Taille mailles 3D	Entre 1 et 166m ³	Entre 30 et 2700 m ³
Phénomènes modélisés	hygro-thermo-aérauliques	thermo-aérauliques

1.2 SOLENE-microclimat

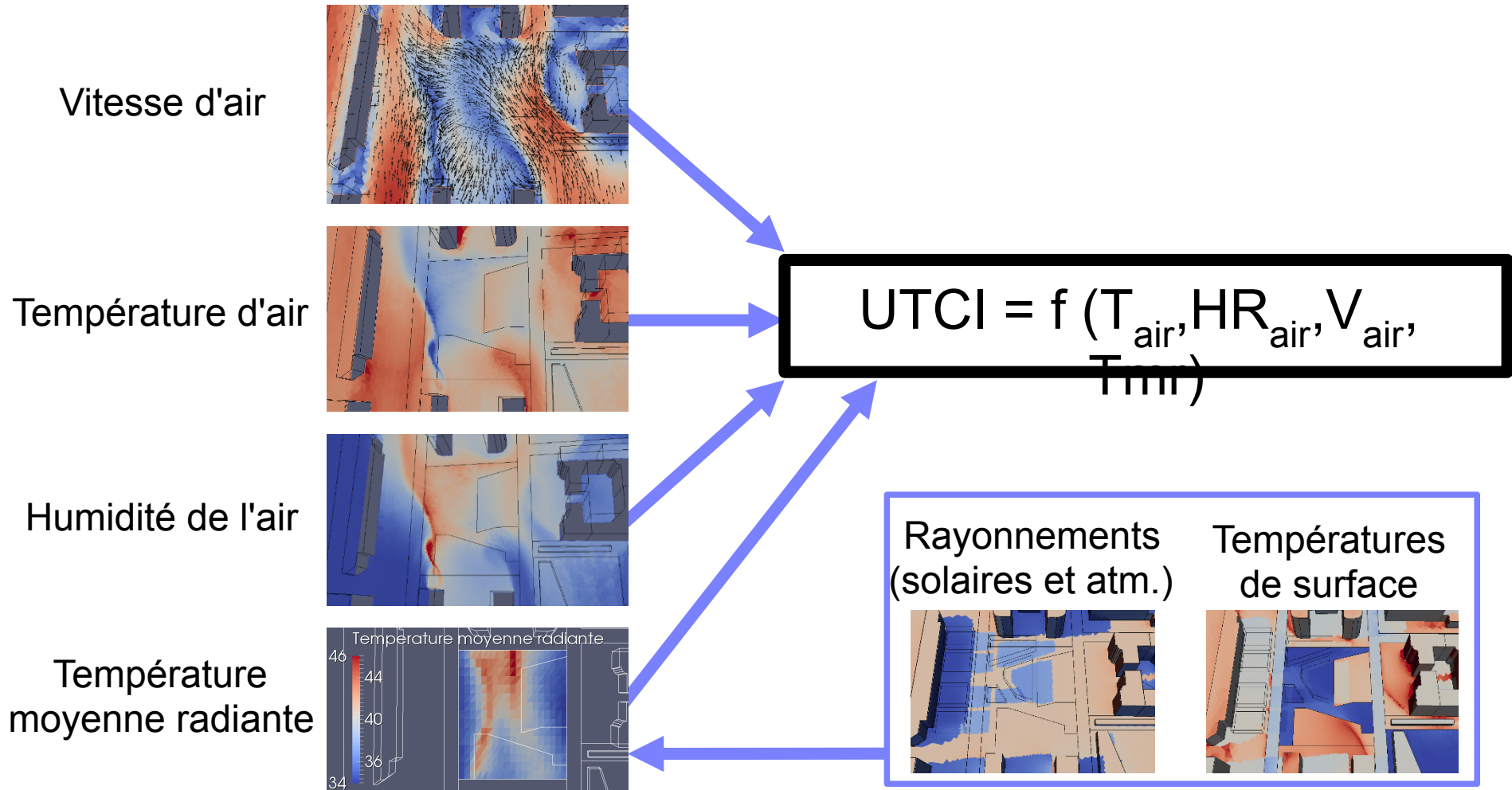
Détail du calcul du confort



$$UTCI = f (T_{air}, HR_{air}, V_{air}, T_{irr})$$

1.2 SOLENE-microclimat

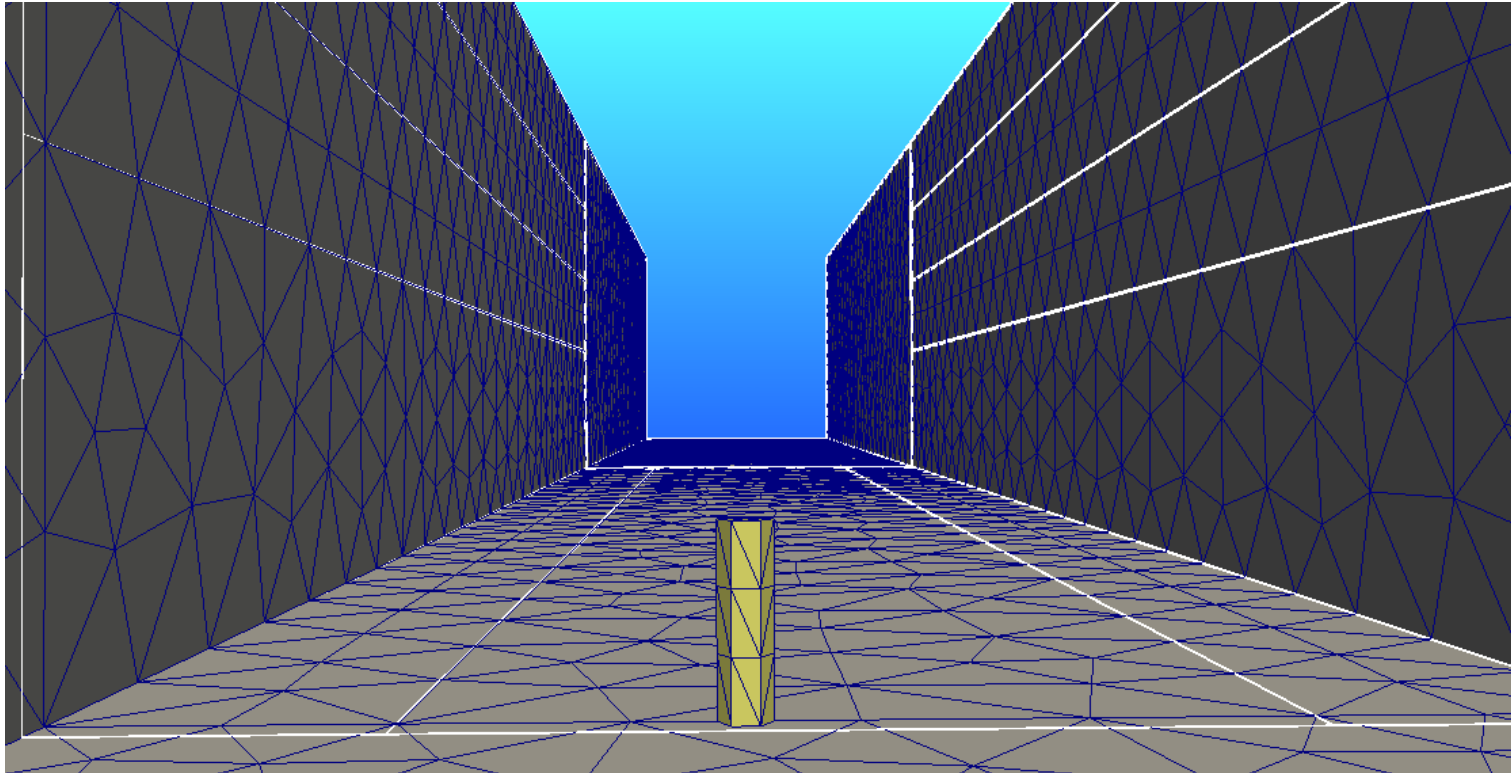
Détail du calcul du confort



1.2 SOLENE-microclimat

Détail du calcul du confort

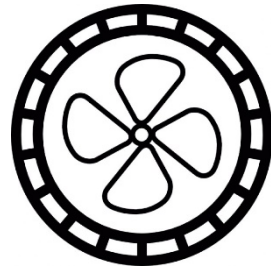
Calcul de la température moyenne radiante :



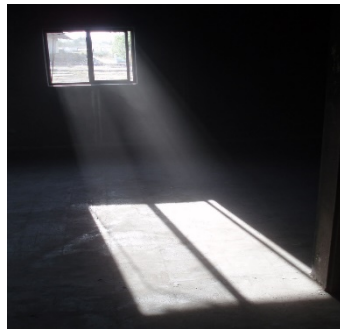
=> bilan radiatif sur chaque facette d'un cylindre représentant un bonhomme

1.3. EnvibatE

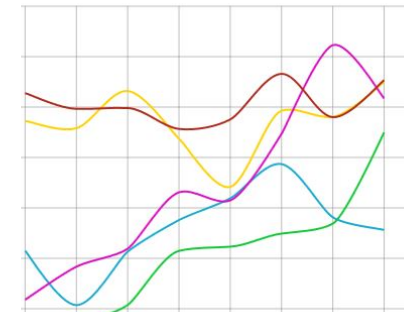
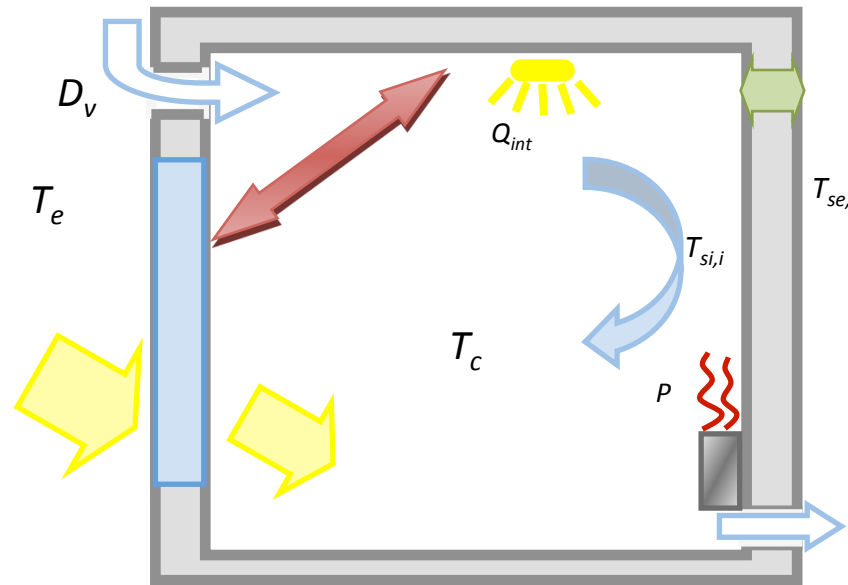
Modélisation des besoins énergétiques



Renouvellement
d'air



Apports solaires



Taux d'occupation

Température de
consigne: 26°C

Gains internes :



Caractéristiques thermo-physiques des
matériaux de l'enveloppe



2. Méthodologie de l'analyse multicritère

2.1. LES CRITÈRES ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX DU COMPARATIF MULTI-CRITERES

6 CRITERES RETENUS

- 1. RÉDUCTION DE L'ICU / AMÉLIORATION DU CONFORT THERMIQUE
- 2. COUT GLOBAL
- 3. CONSOMMATION EN EAU
- 4. EMPREINTE CARBONE
- 5. RÉDUCTION DE LA CONSOMMATION DE CLIMATISATION
- 6. COEFFICIENT DE BIOTOPE

2.1.1. RÉDUCTION DE L'ICU / AMÉLIORATION DU CONFORT THERMIQUE

→ ÉTABLIS À L'ÉCHELLE LOCALE

CONFORT THERMIQUE

Evaluation pour chaque point du confort thermique à travers l'analyse de la valeur de l'UTCI (Universal Thermal Climate Index): Température d'air équivalente exprimée en °C.

UTCI (°C) range	Stress Category
above +46	extreme heat stress
+38 to +46	very strong heat stress
+32 to +38	strong heat stress
+26 to +32	moderate heat stress
+9 to +26	no thermal stress
+9 to 0	slight cold stress
0 to -13	moderate cold stress
-13 to -27	strong cold stress
-27 to -40	very strong cold stress
below -40	extreme cold stress

Figure 19 - UTCI assessment scale in terms of thermal stress

1. Evaluation du gain en confort à partir du nombre d'heures soumises à des stress thermique fort et/ou modéré.
2. Evaluation des variations de températures permis par les solutions de rafraîchissement sur une période comprise entre 9h et 16h par rapport au scénario de référence.

2.1.2. COUT GLOBAL €

→ **ETABLIS À L'ÉCHELLE DU QUARTIER – CALCULÉ SUR 30 ANS**

- **EVALUATION DU COÛT D'INVESTISSEMENT LIÉ À LA MISE EN PLACE DES SOLUTIONS DE RAFRAÎCHISSEMENT**
- **ESTIMATION DU COÛT D'EXPLOITATION INTÉGRANT L'ENTRETIEN ET LA MAINTENANCE DES OUVRAGES, LE COÛT DE PRODUCTION D'EAU POTABLE, LA MAIN D'ŒUVRE**

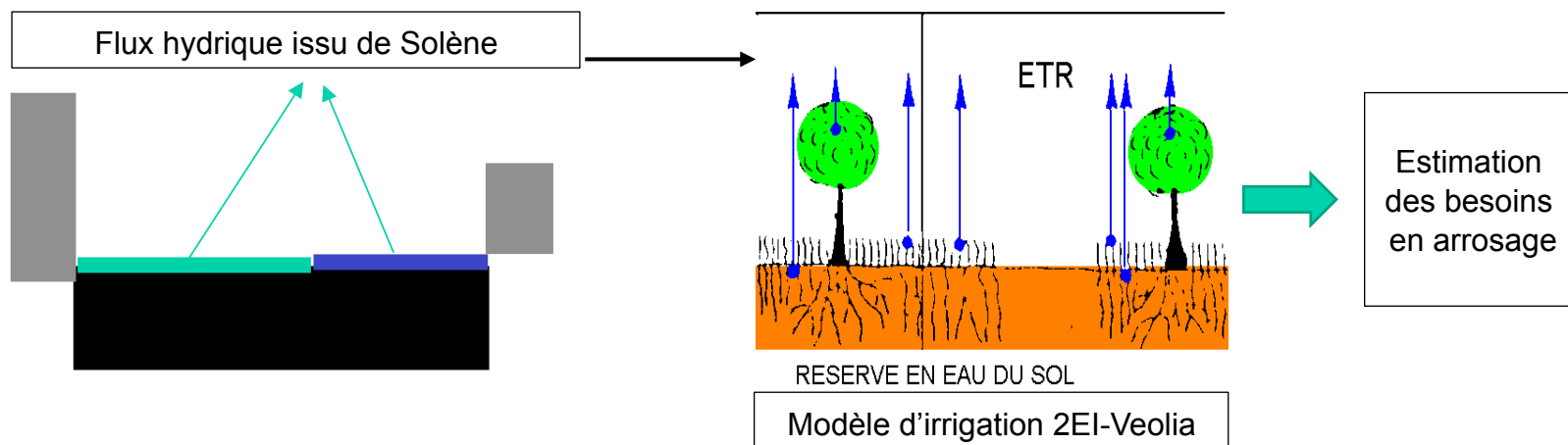
2.1.3. CONSOMMATION EN EAU



→ **ÉTABLIS À L'ÉCHELLE QUARTIER – BILAN ANNUEL**

■ **EVALUATION EN COUPLANT DEUX OUTILS**

1. **OUTIL SOLÈNE-MICROCLIMAT** : FLUX HYDRIQUE INTÉGRANT L'ÉVAPORATION DU SOL ET L'ÉVAPOTRANSPIRATION DE LA VÉGÉTATION PRENANT EN COMPTE LES PARAMÈTRES LIÉS À L'ENVIRONNEMENT URBAIN (OMBRAGE, COURANT DE VENT, TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE)
2. **OUTIL D'IRRIGATION VEOLIA** : ÉVALUATION DES BESOINS EN ARROSAGE EN INTÉGRANT LES PARAMÈTRES PÉDOLOGIQUES ET CLIMATIQUES LOCAUX



2.1.4. EMPREINTE CARBONE



→ **ETABLIS À L'ÉCHELLE QUARTIER – CALCULÉ SUR 30 ANS**

- **ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES SOLUTIONS**

Evaluation de l'Empreinte Carbone des solutions (kg équivalent CO₂)

- Production des matériaux
- Mise en place des solutions
- Entretien
- Fin de vie

Sources :



2.1.5. RÉDUCTION DES BESOINS DE CLIMATISATION



→ ETABLIS À L'ÉCHELLE DU QUARTIER – BILAN ANNUEL

■ CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE LIÉE À L'UTILISATION DE SYSTÈMES DE CLIMATISATION

✓ Résultats fournis par l'outil EnviBatE

✓ Evaluation des consommations en MWh lié à l'utilisation de climatiseurs pour conserver une température de consigne inférieure à 26 °C

✓ Hypothèse considérée: système de climatisation de type split individuel d'une COP de 3

2.1.5. RÉDUCTION DES BESOINS DE CLIMATISATION

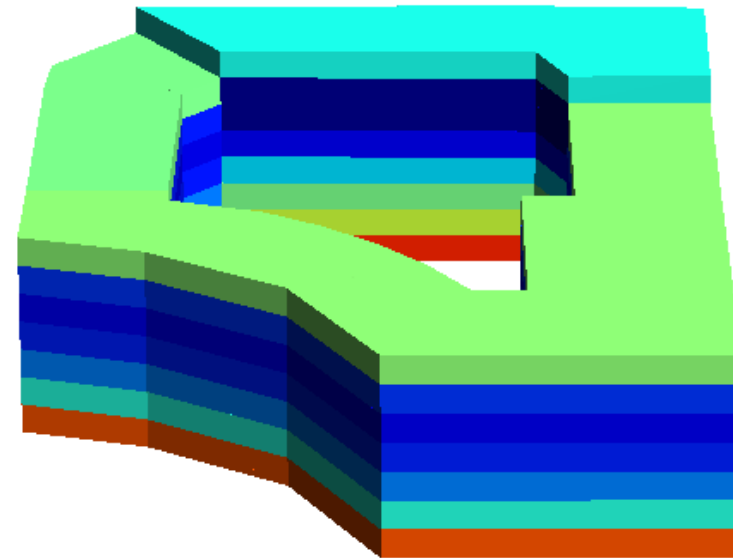
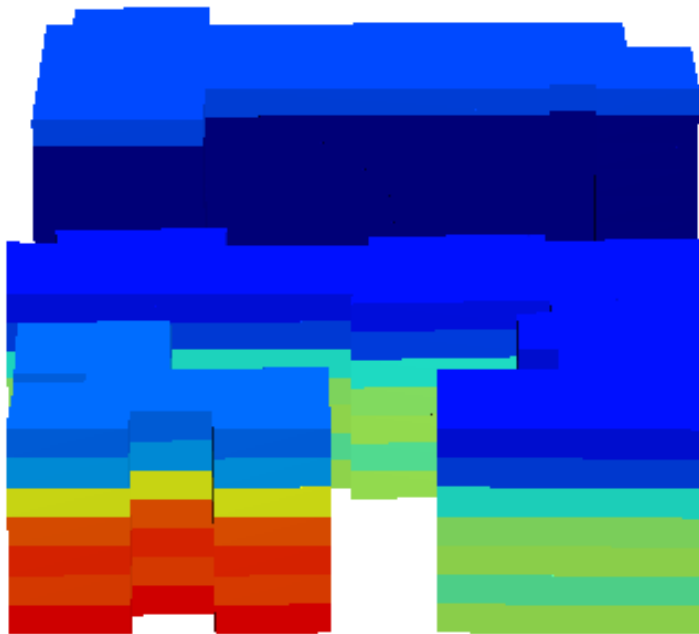


→ ÉTABLIS À L'ÉCHELLE LOCALE

DÉTAIL DES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES LIÉS À LA CLIMATISATION

Analyse à l'échelle de chaque bâtiment

Analyse fine à l'échelle de chaque étage des différents bâtiments



2.1.6. COEFFICIENT DE BIOTOPE



→ ETABLIS À L'ÉCHELLE QUARTIER

- ÉVALUATION DES SURFACES ÉCO-AMÉNAGEABLES FAVORABLES À L'EXPRESSION DE LA BIODIVERSITÉ SUR LA PARCELLE DE CHAQUE QUARTIER

Surface écoaménageable
= (surface de type A x coef. A) + (surface de type B x coef. B) + ...
(surface de type N x coef. N)



Surfaces
semi-ouvertes
0,5

revêtement perméable pour l'air et l'eau, infiltration d'eau de pluie, avec végétation (par ex. dallage de bois, pierres de treillis de pelouse)



Espaces verts
sur dalle
0,5

Espaces verts sur les dalles de rez-de-chaussée et garages souterrains avec une épaisseur de terre végétale jusqu'à 80 cm



Espaces verts
sur dalle
0,7

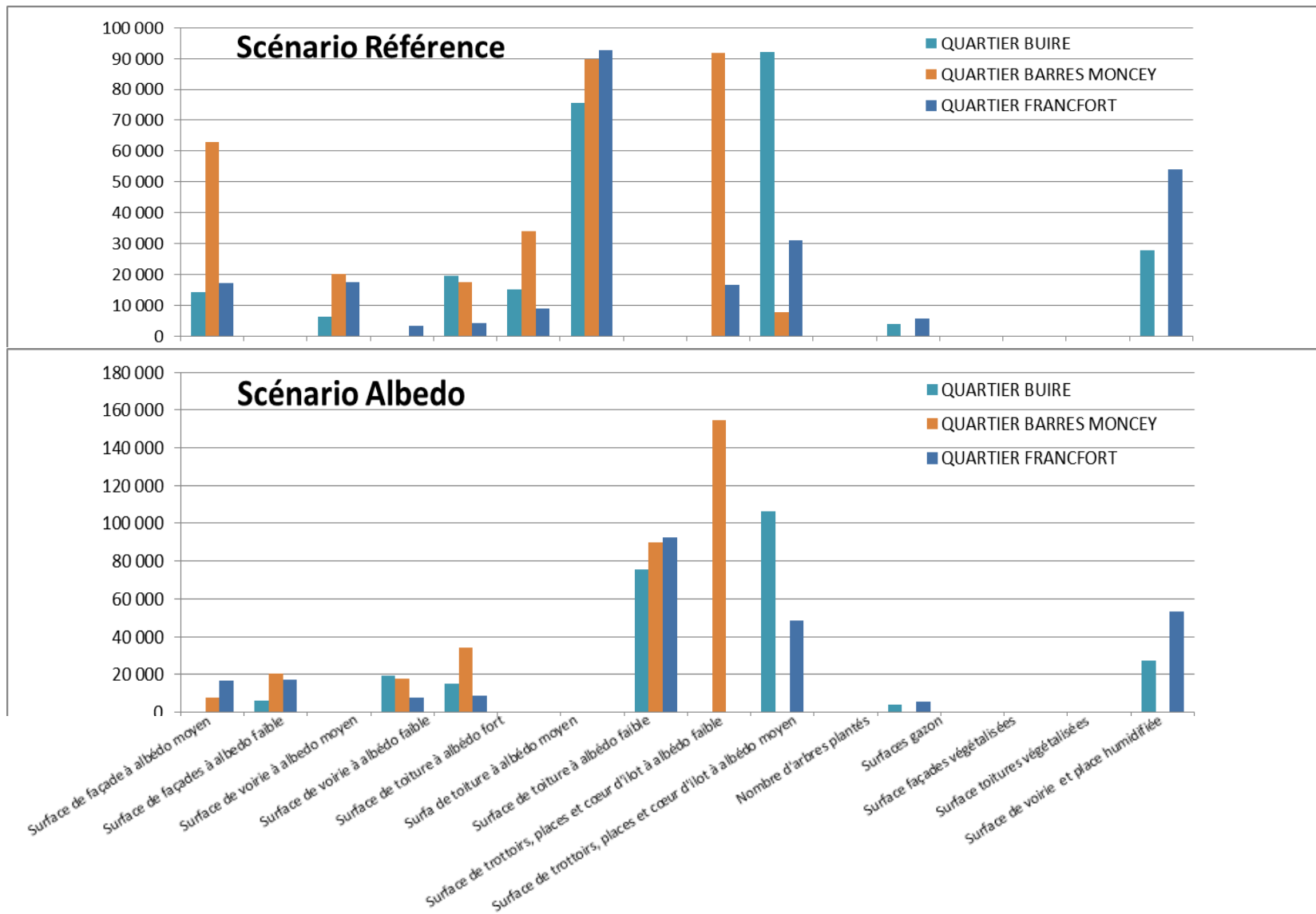
Espaces verts sans corrélation en pleine terre avec une épaisseur de terre végétale au moins de 80 cm



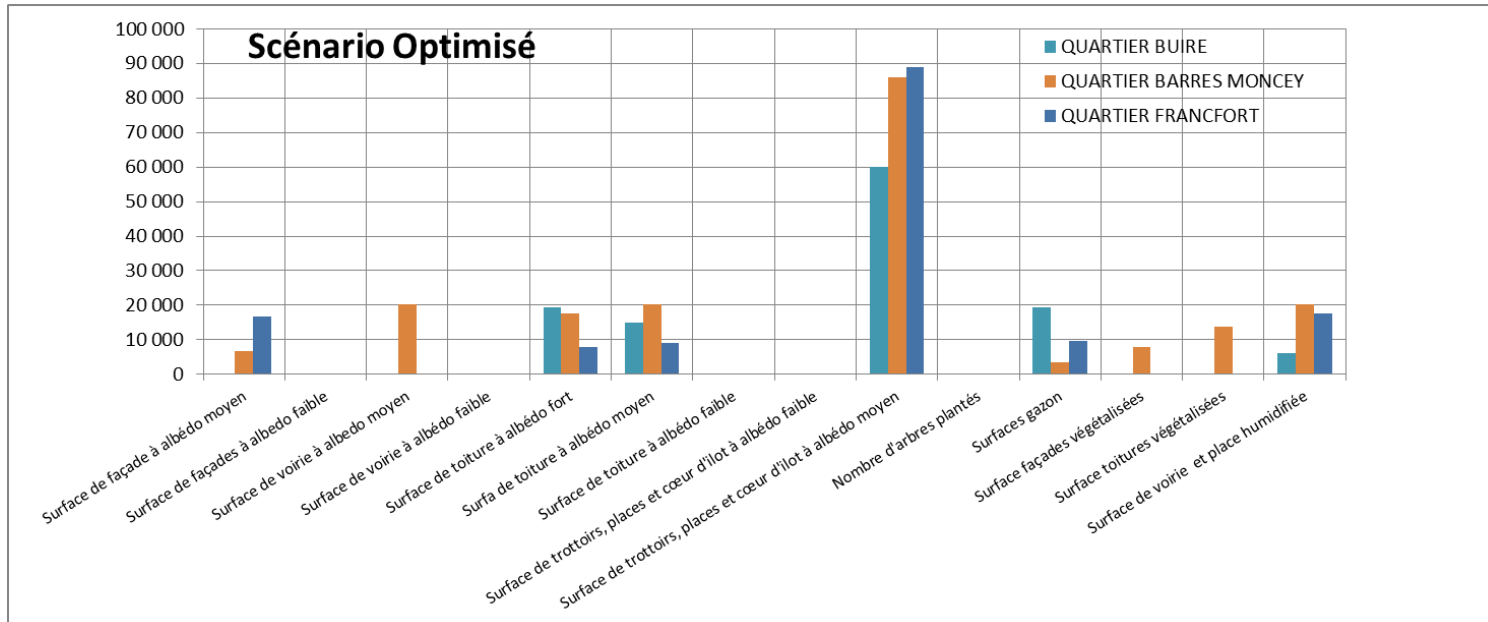
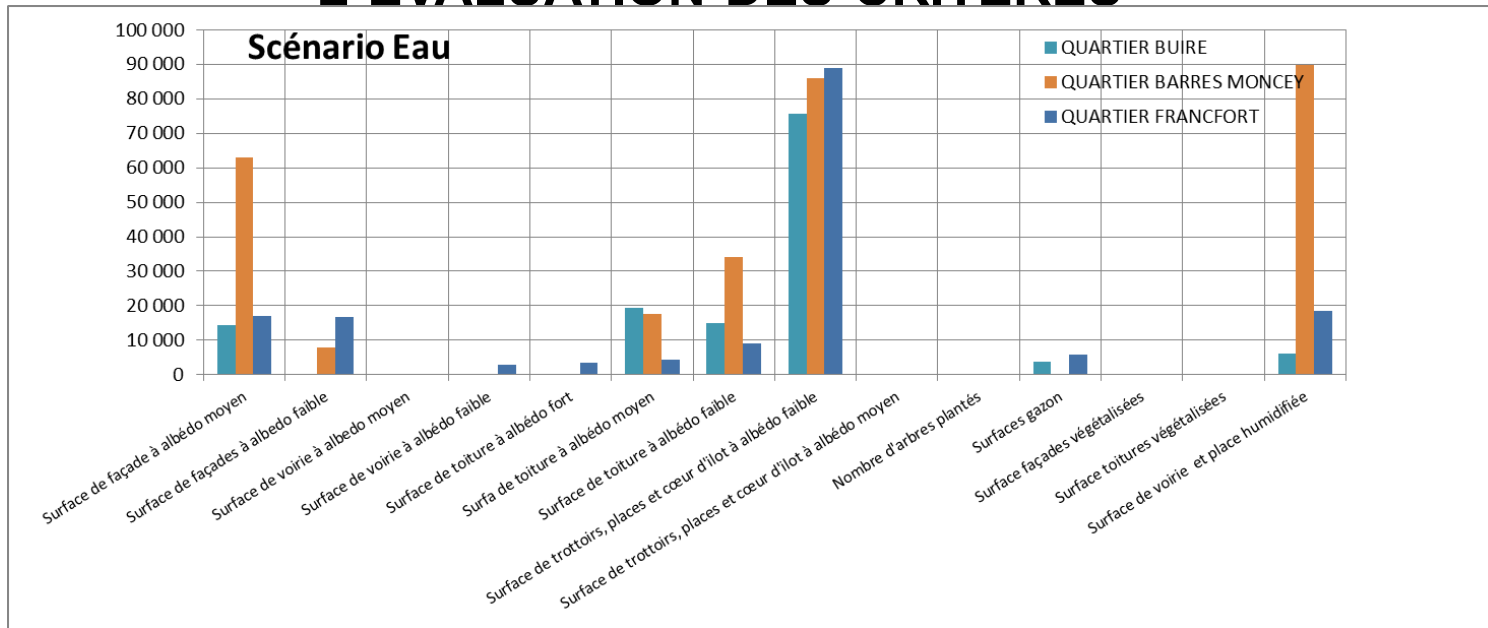
Espaces verts
en pleine terre
1,0

Continuité avec la terre naturelle, disponible au développement de la flore et de la faune

2.2. LES DONNÉES SURFACIQUES NÉCESSAIRES À L'ÉVALUATION DES CRITÈRES



2.2. LES DONNÉES SURFACIQUES NÉCESSAIRES À L'ÉVALUATION DES CRITÈRES





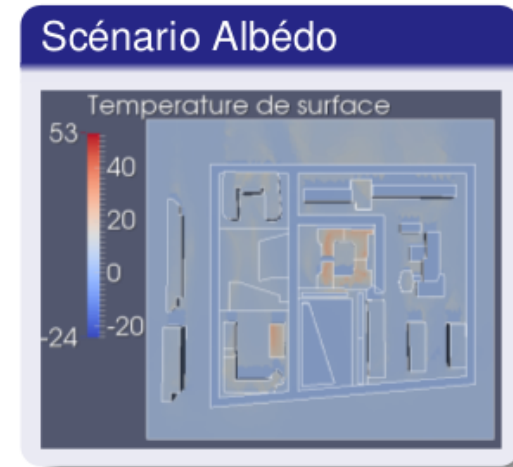
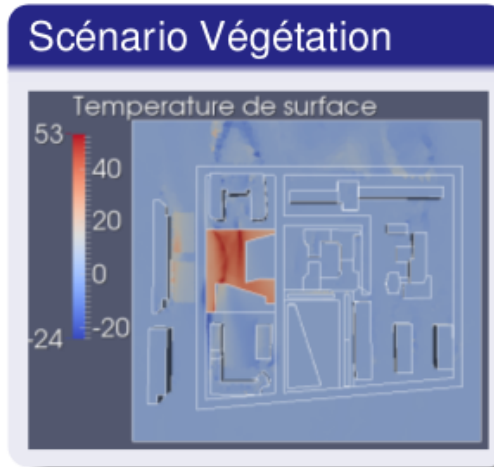
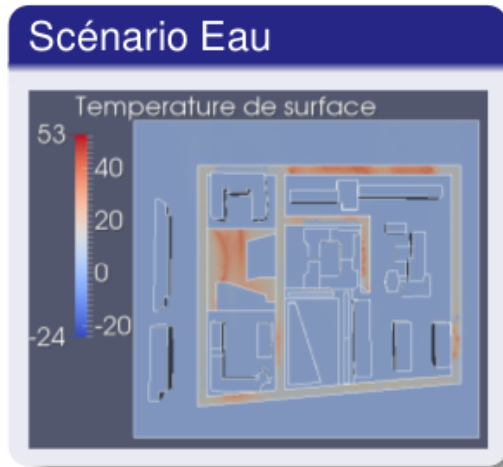
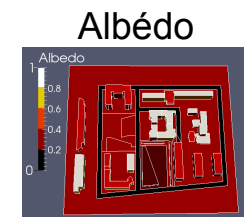
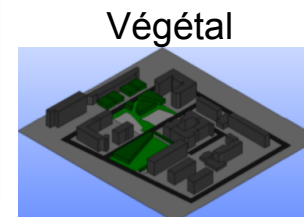
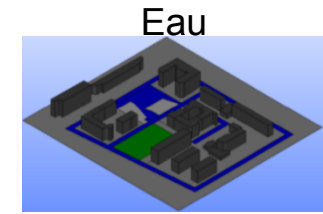
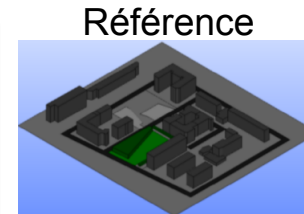
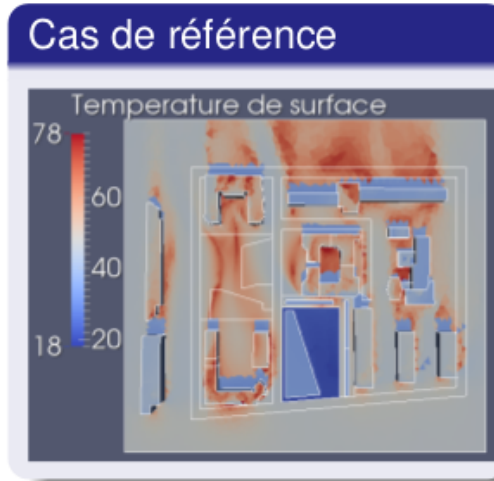
3. RÉSULTATS QUARTIER PAR QUARTIER



3.1. PLACE DE FRANCFORT

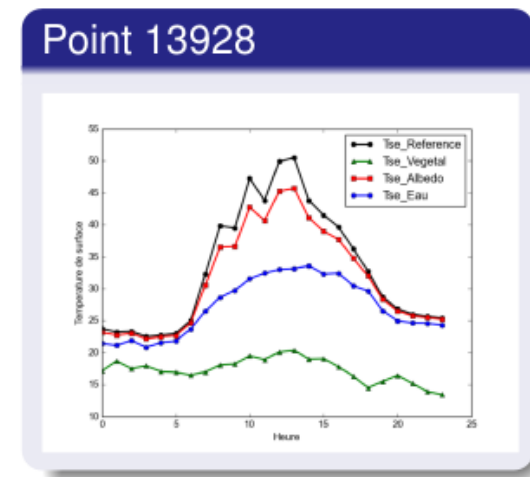
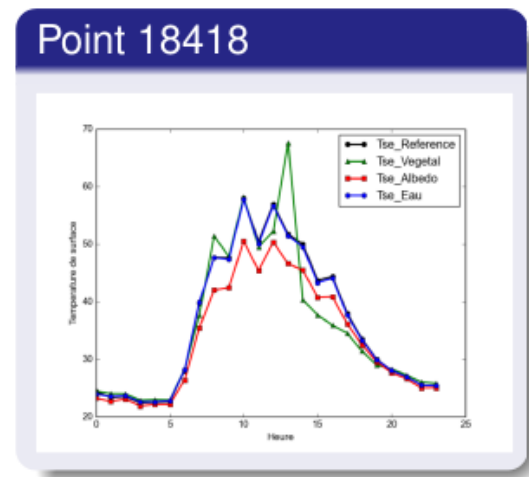
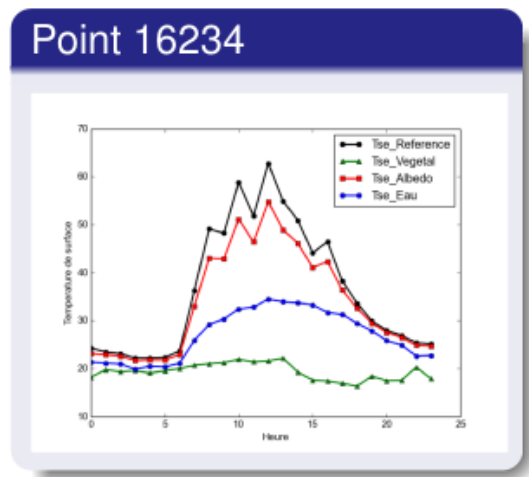
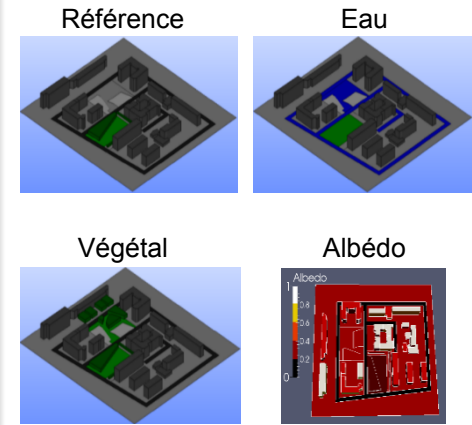
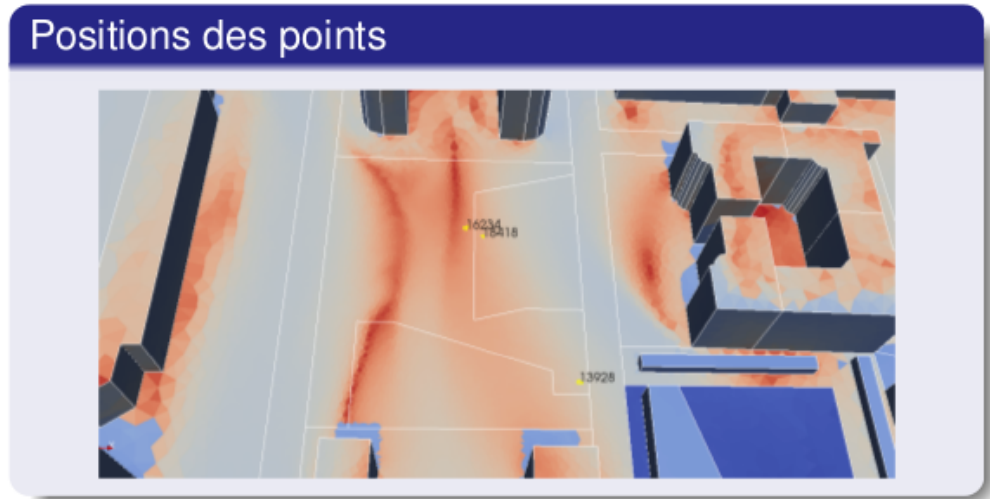
3.1.1. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR MONO-DISPOSITIFS

Distribution de la température de surface et des différences induites dans les scénarios mono-dispositifs



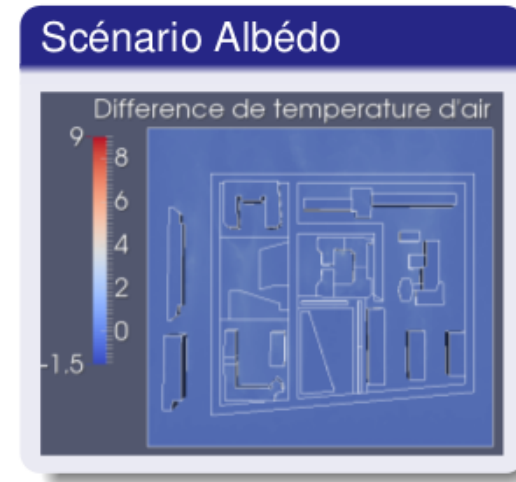
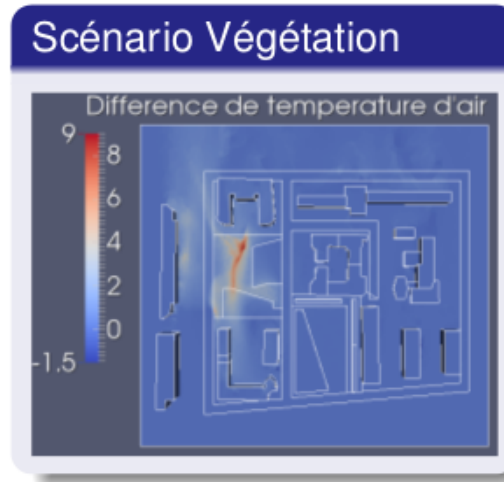
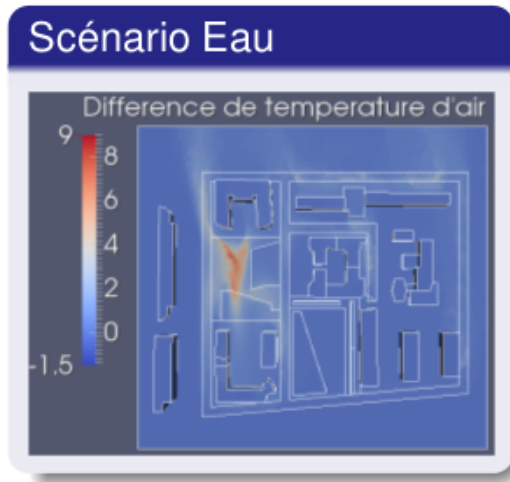
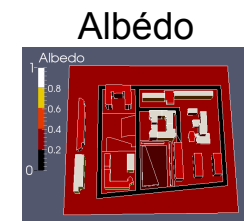
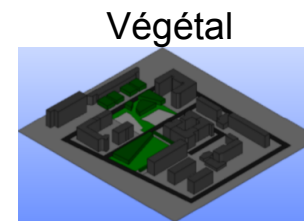
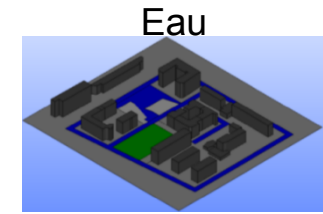
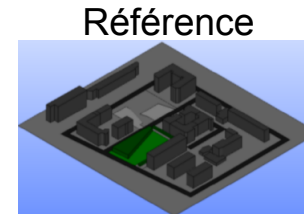
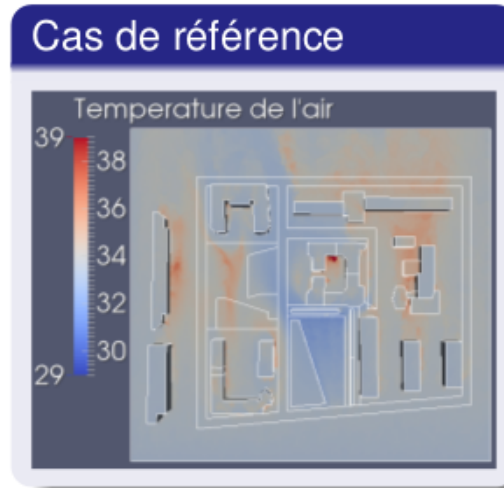
3.1.1. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR MONO-DISPOSITIFS

Évolutions temporelles des températures de surfaces



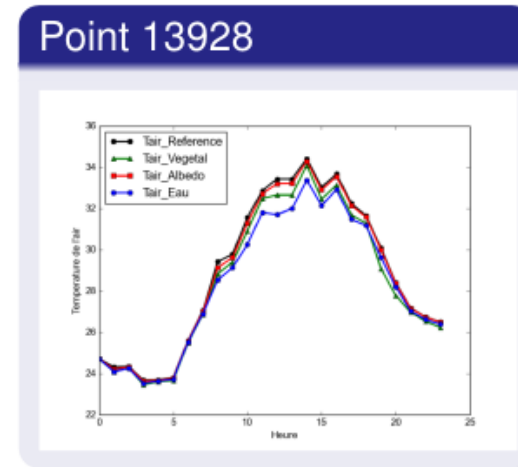
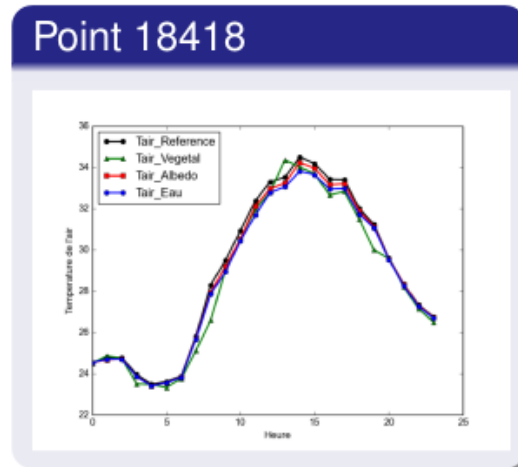
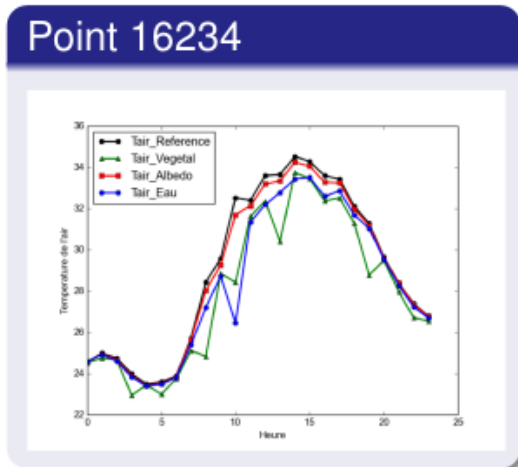
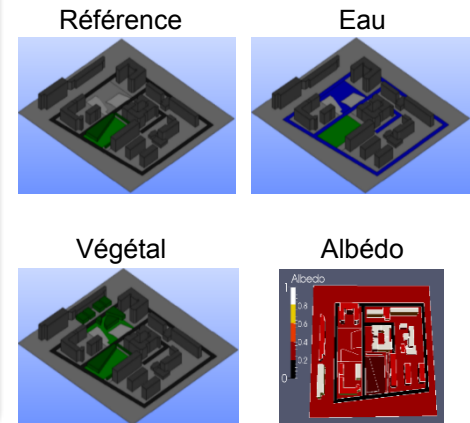
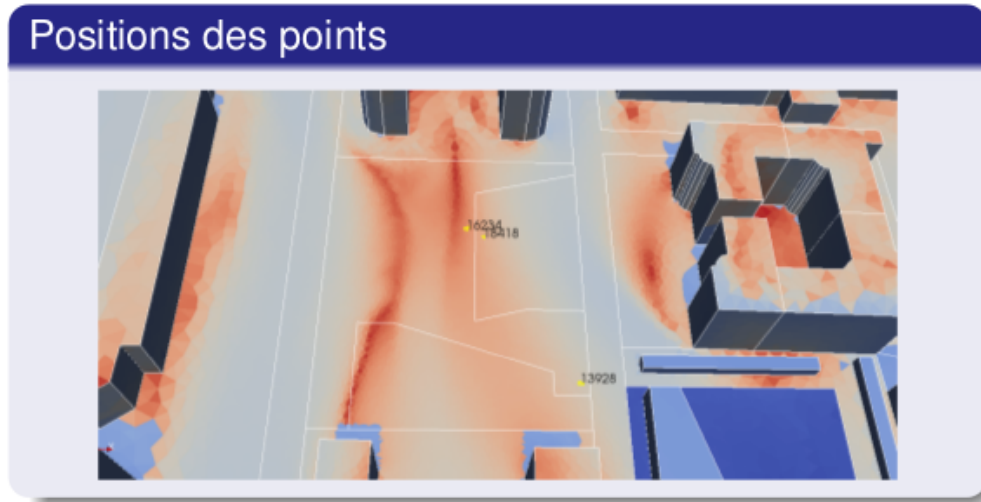
3.1.1. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR MONO-DISPOSITIFS

Distribution de la température de l'air et des différences induites dans les scénarios mono-dispositifs



3.1.1. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR MONO-DISPOSITIFS

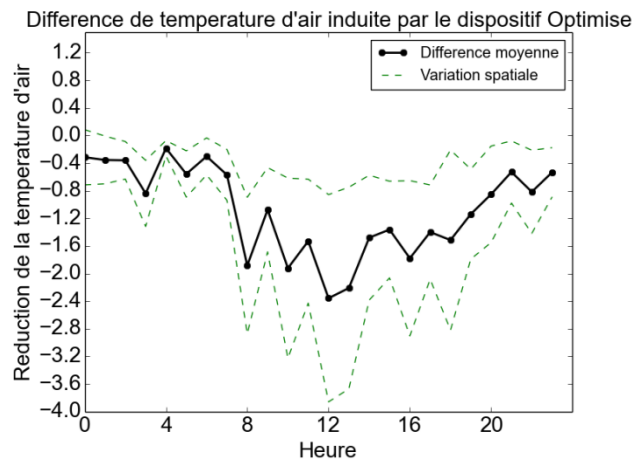
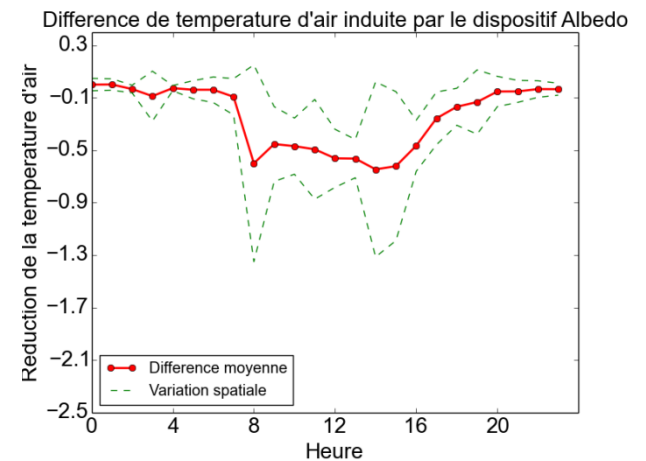
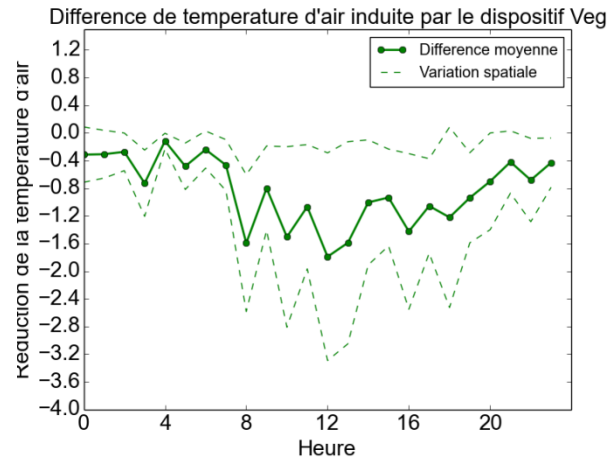
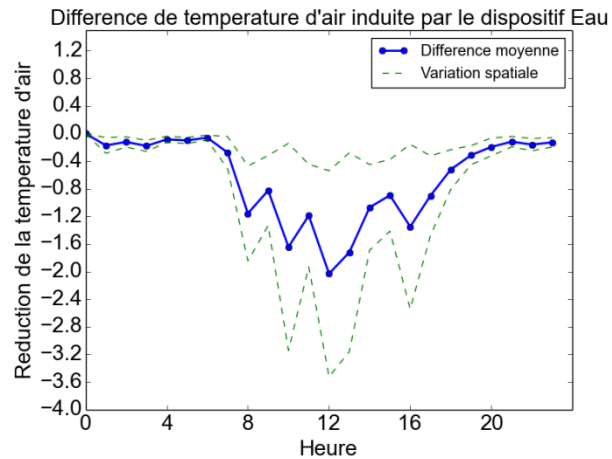
Évolutions temporelles des températures de l'air



3.1.1. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR

MONO-DISPOSITIFS

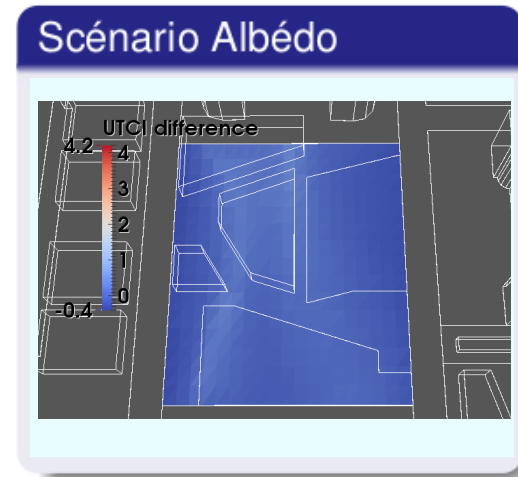
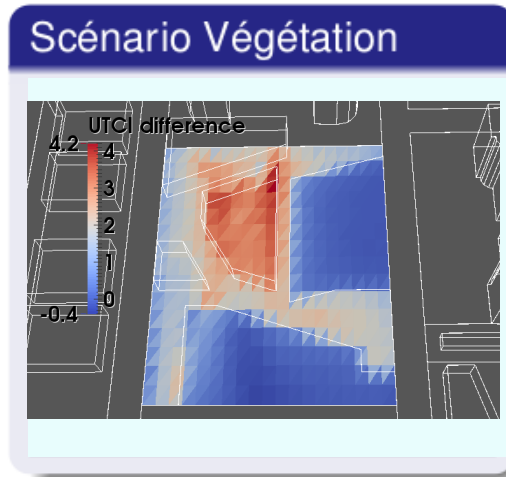
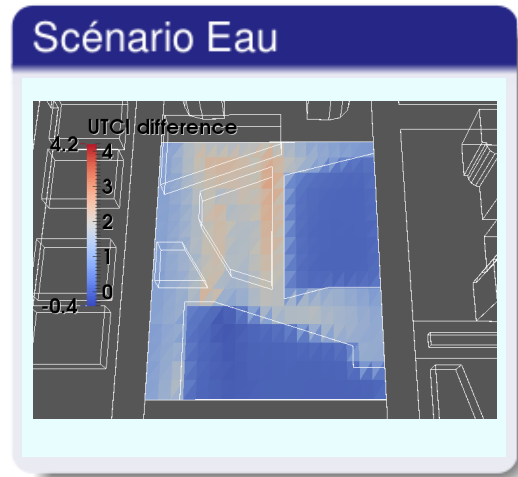
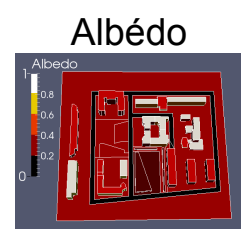
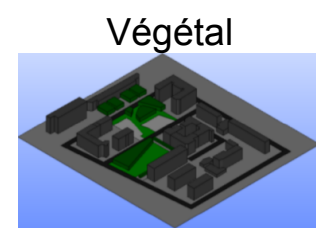
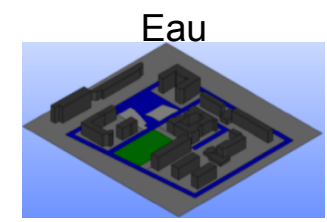
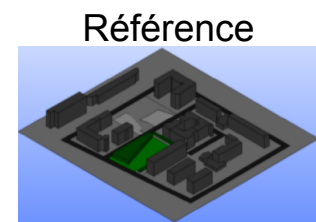
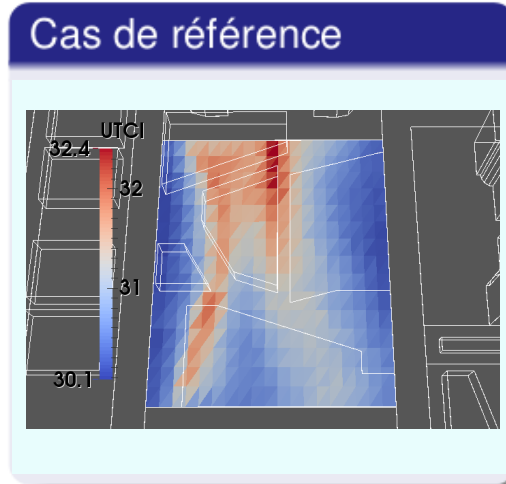
Réduction de la température de l'air induite dans les scénarios mono-dispositifs (Moyenne sur la place de Francfort)



		Tair			
		Eau	Végétal	Albédo	Optimisé
Francfort	Moyenne	-0,64	-0,84	-0,16	-1,08
	Écart Type (espace)	0,31	0,49	0,03	0,44
	Écart Type (temps)	0,46	0,72	0,07	0,7

3.1.1. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR MONO-DISPOSITIFS

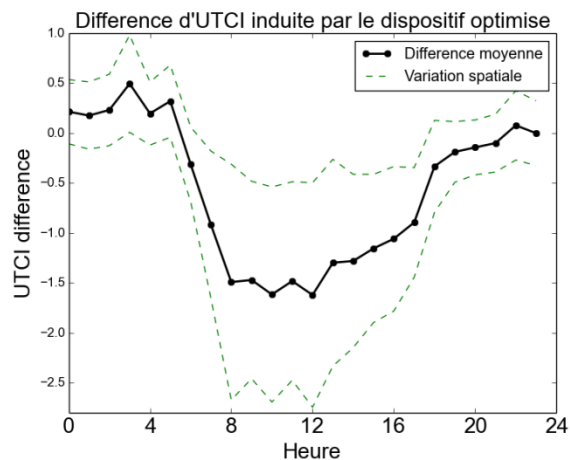
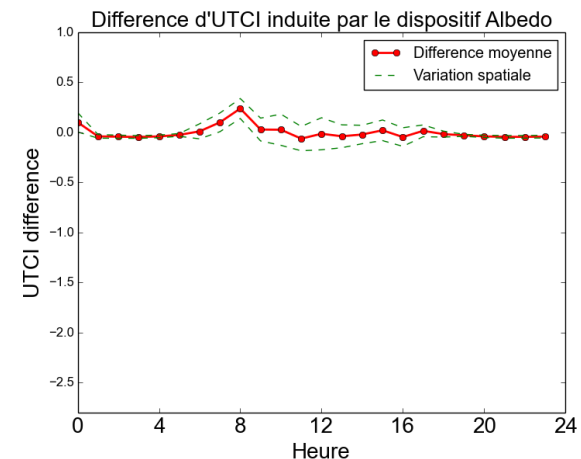
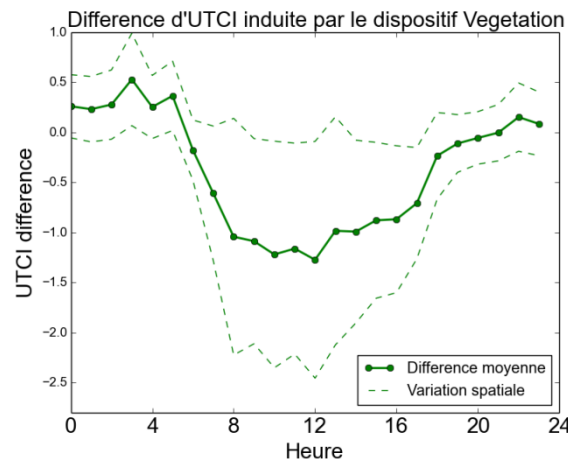
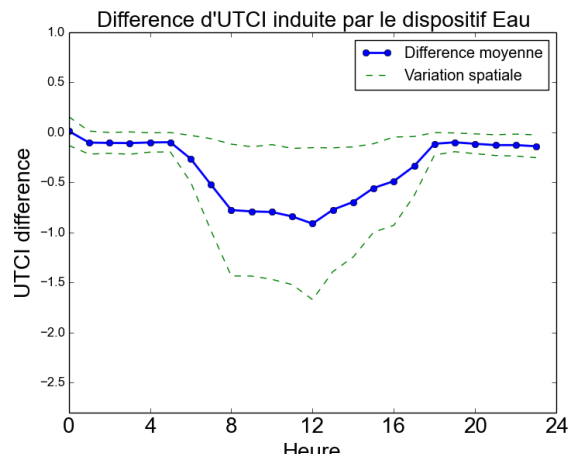
Distribution de l'UTCI
et des différences
induites dans les
scénarios mono-
dispositifs



3.1.1. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR

MONO-DISPOSITIFS

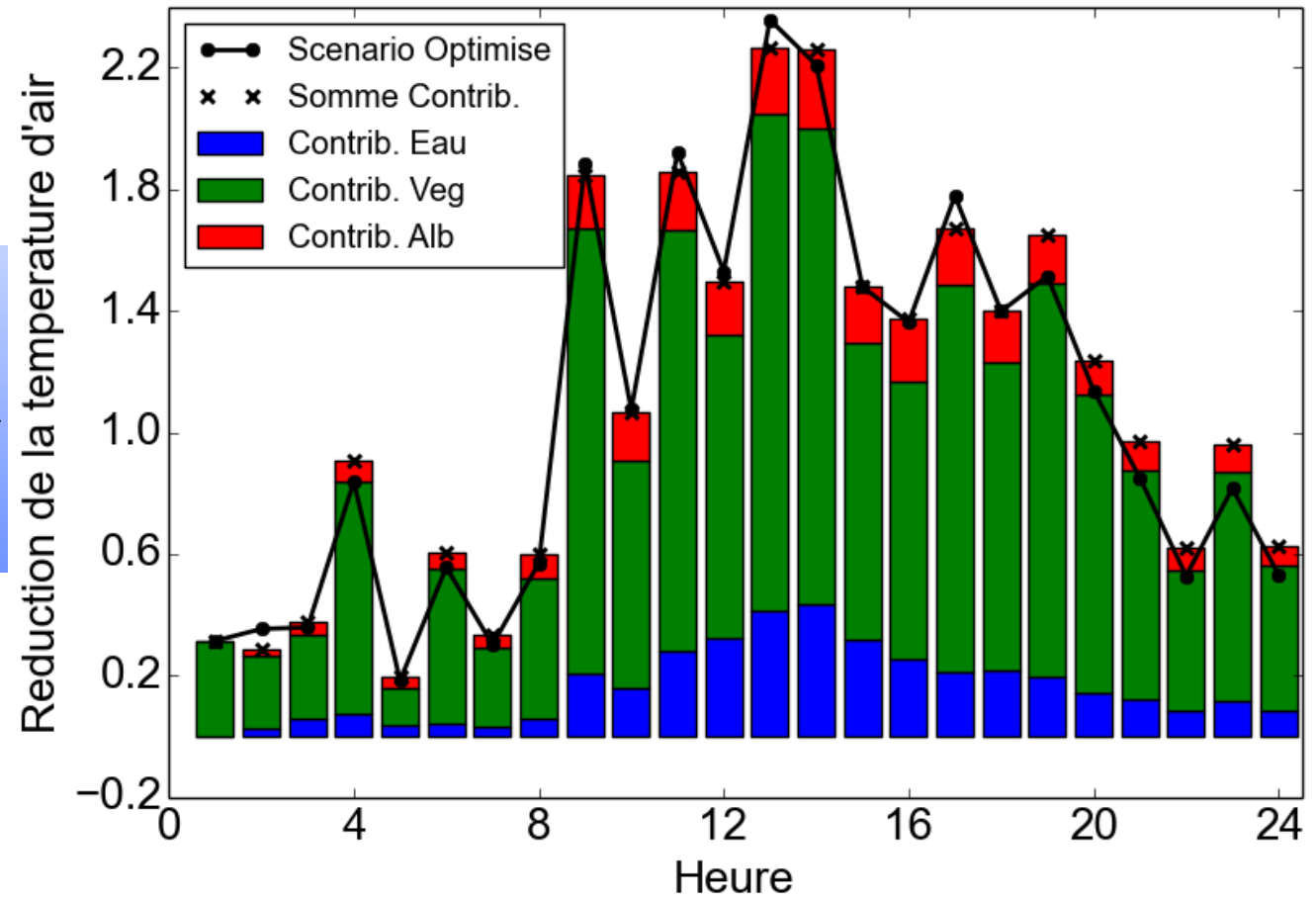
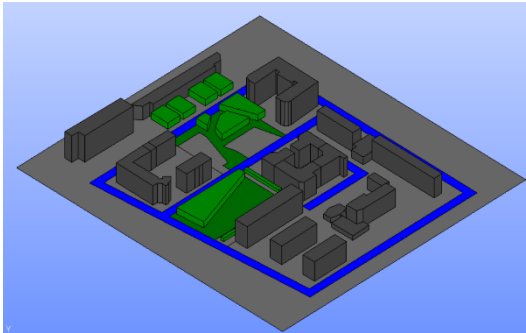
Réduction de l'UTCI induite dans les scénarios mono-dispositifs (Moyenne sur la place de Francfort)



		Tair				UTCI			
		Eau	Végétal	Albédo	Optimisé	Eau	Végétal	Albédo	Optimisé
Francfort	Scénario								
	Moyenne	-0,64	-0,84	-0,16	-1,08	-0,38	-0,39	0	-0,57
	Écart Type (espace)	0,31	0,49	0,03	0,44	0,31	0,43	0,04	0,4
	Écart Type (temps)	0,46	0,72	0,07	0,7	0,32	0,61	0,06	0,61

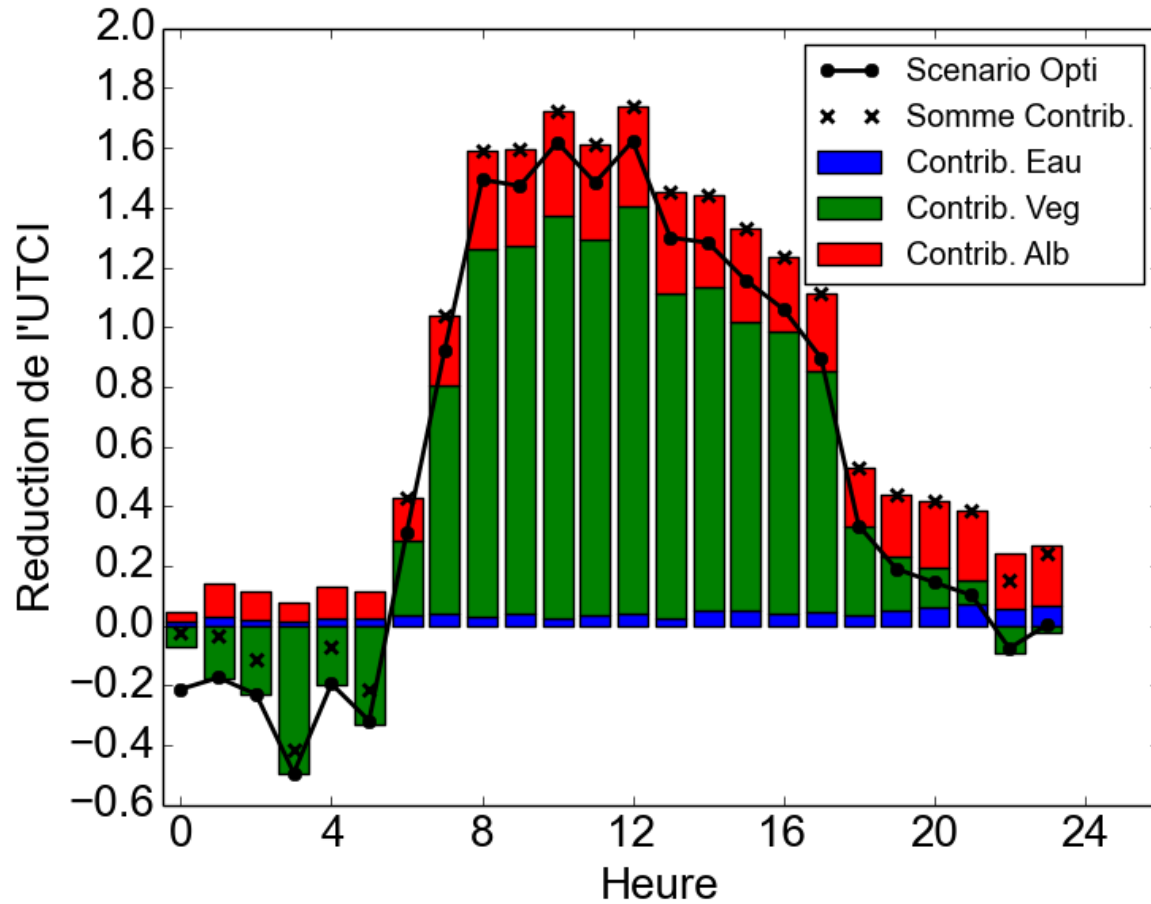
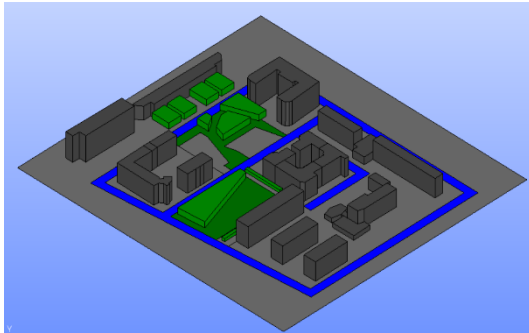
3.1.1. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR OPTIMISÉ

Contribution de chaque dispositif à la réduction de la température de l'air (Moyenne sur la place de Francfort)



3.1.1. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR OPTIMISÉ

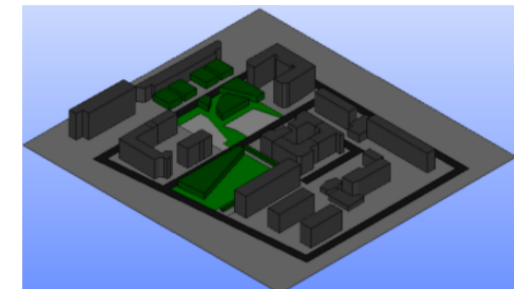
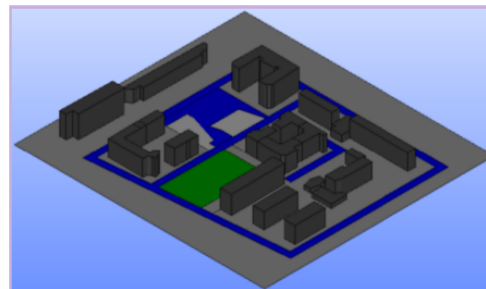
Contribution de chaque dispositif à la réduction de l'UTCI
(Moyenne sur la place de Francfort)



3.1.2. ANALYSE MULTICRITÈRE - ANALYSE DU CONFORT THERMIQUE -

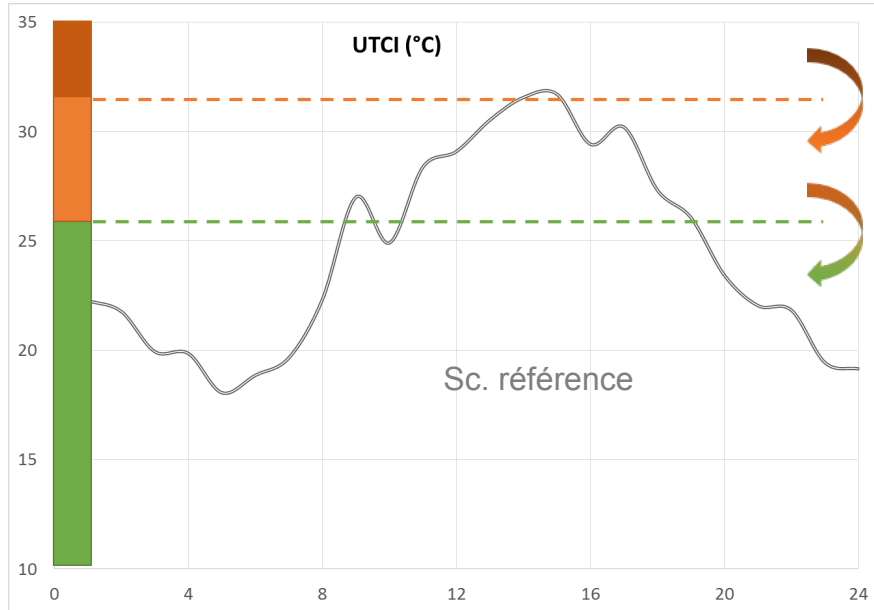
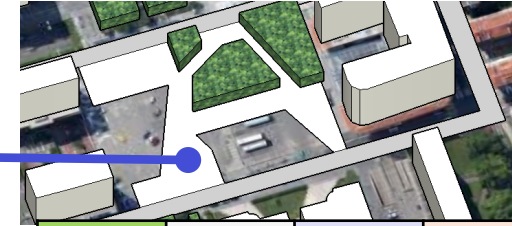
Evaluation locale des UTCI:

- **Point 113:** contrebas de l'abri bus. Espace végétalisé (scénario végétation et optimisé); Espace humidifié (scénario eau)
- **Point 364:** zone minérale: ni humidifiée, ni végétalisée
- **Point 401:** point proche des arbres sur un espace végétalisé (scénario végétation et optimisé); espace humidifié (scénario eau)

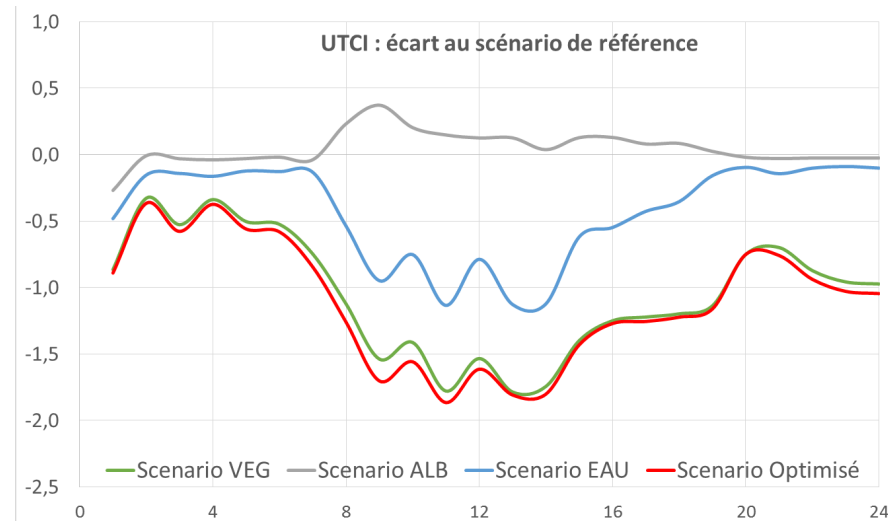


GAIN DE CONFORT FRANCFORT - BILAN POINT 113

113

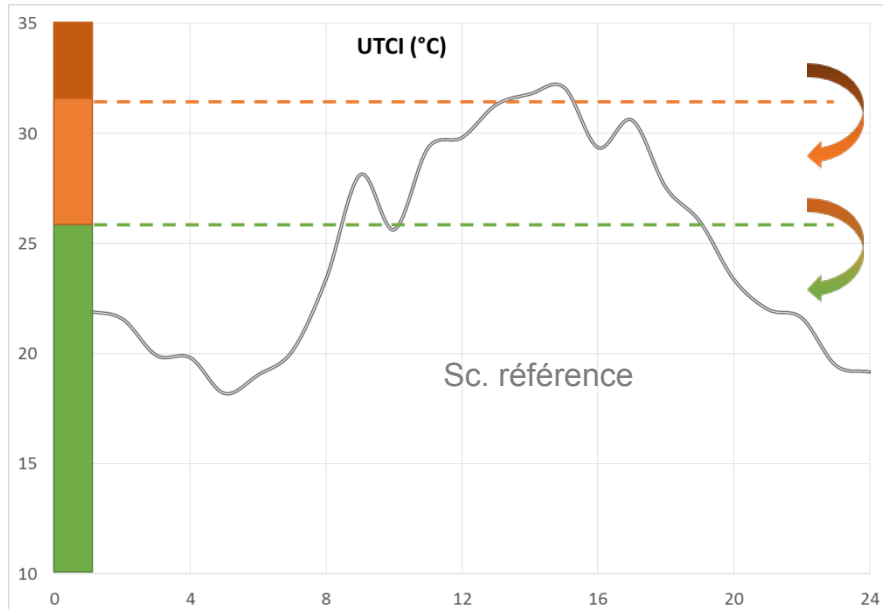
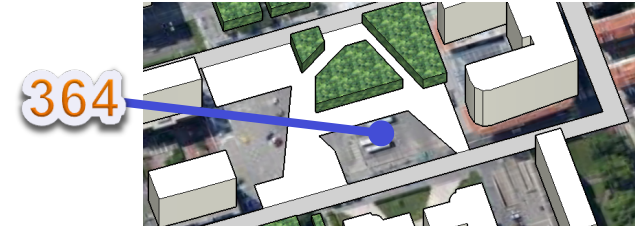


	VEG	ALB	EAU	OPTI
Heures gagnées Stress Fort → Stress Modéré	0	0	0	0
Heures gagnées Stress Modéré → Sans Stress	2	0	1	2
Gain moyen de confort (UTCI) entre 9 et 16h (°C)	-1,56	0,16	-0,88	-1,63

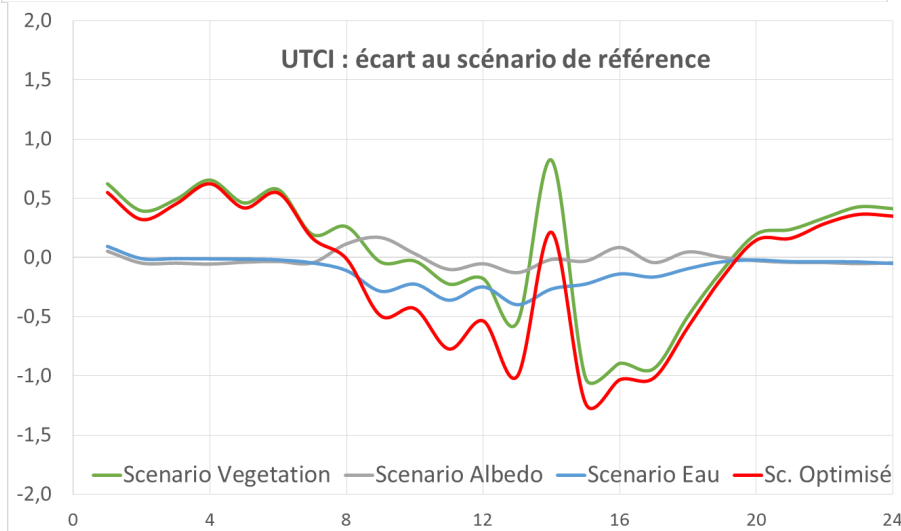


- L'eau et la végétalisation assurent la réduction du stress thermique sur la journée
- Sur les périodes comprises entre 9h et 16h: réduction de la valeur d'UTCI liée à la végétalisation ou à l'humidification du point de mesure

GAIN DE CONFORT FRANCFORT - POINT 364



	VEG	ALB	EAU	OPTI
Heures gagnées Stress Fort → Stress Modéré	0	0	1	1
Heures gagnées Stress Modéré → Sans Stress	0	0	0	0
Gain moyen de confort (UTCI) entre 9 et 16h (°C)	-0,26	-0,01	-0,27	-0,66



- **Humidification de chaussée: réduction du stress thermique sur la journée**
- **Sur les périodes comprise entre 9h et 16h: réduction de la valeur d'UTCI liée à la végétalisation ou à l'humidification au niveau du point de mesure**

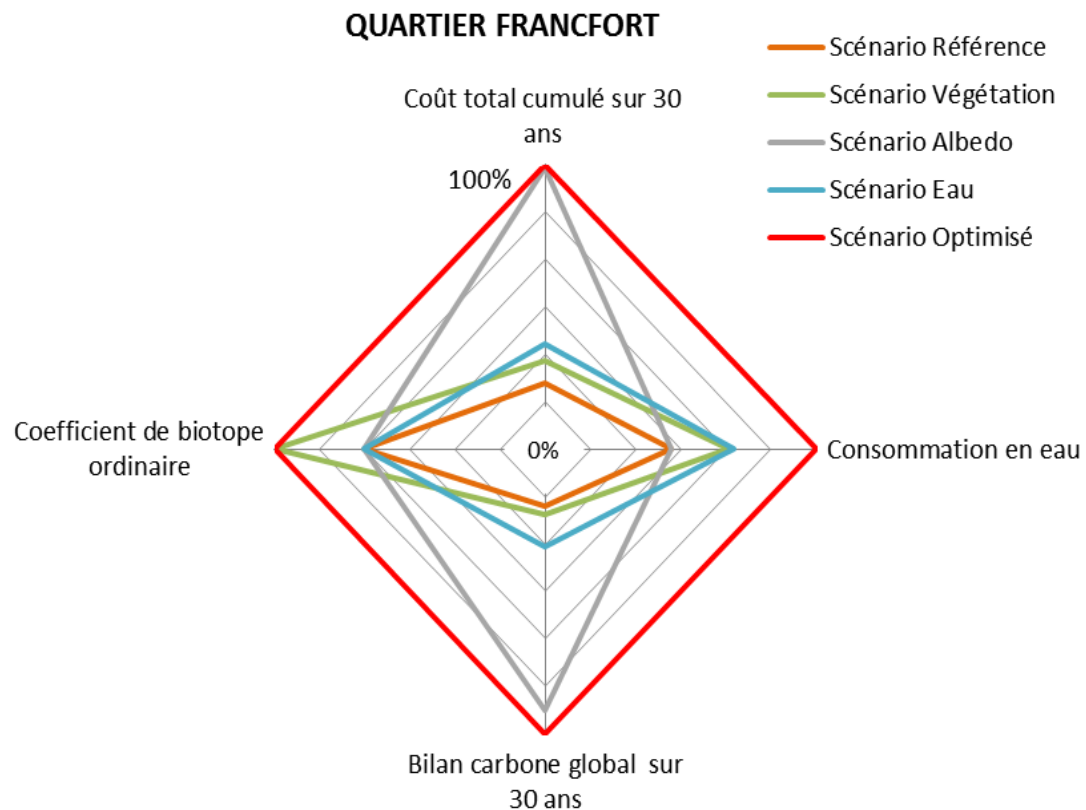
3.1.2. ANALYSE MULTICRITÈRE - IMPACTS COMPARÉS DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS-

Critère	Unité	Scénario Référence	Scénario Végétation	Scénario Albédo	Scénario Eau	Scénario Optimisé
Gain de confort au point 364	°C		-0,26	-0,01	-0,27	-0,66
Gain de confort au point 113	°C		-1,56	0,16	-0,88	-1,63
Coût total cumulé sur 30 ans	k€ HT	872	1 908	10 909	2 725	11 063
Consommation en eau	milliers de m ³ /an	32	54	32	40	60
Bilan carbone cumulé sur 30 ans	Teq CO ₂	230	458	4808	1127	5278
Coefficient Biotope ordinaire	-	1171	1945,4	1171	1171	1945,4

- Scénario « Eau » et « végétation » assurent une amélioration du confort thermique extérieur
- Scénario Végétation plus consommateur en eau: **3,3 m³/m².an contre 1,47 m³/m².an**
- Scénario « Albédo »: le plus coûteux et celui présentant la plus forte empreinte carbone pour un bienfait en confort thermique extérieur faible voire inexistant.
- Scénario optimisé: scénario le plus impactant sur les différents critères.

3.1.2. ANALYSE MULTICRITÈRE - IMPACTS COMPARÉS DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS-

VALEURS LOCALES DES UTCI



Point 113

- Scénario végétation : -1,56
- Scénario Albedo: 0,16
- Scénario Eau: -0,88
- Scénario optimisé: -1,63



Point 364

- Scénario végétation: -0,35
- Scénario Albedo: 0
- Scénario Eau: -0,24
- Scénario optimisé: -0,69

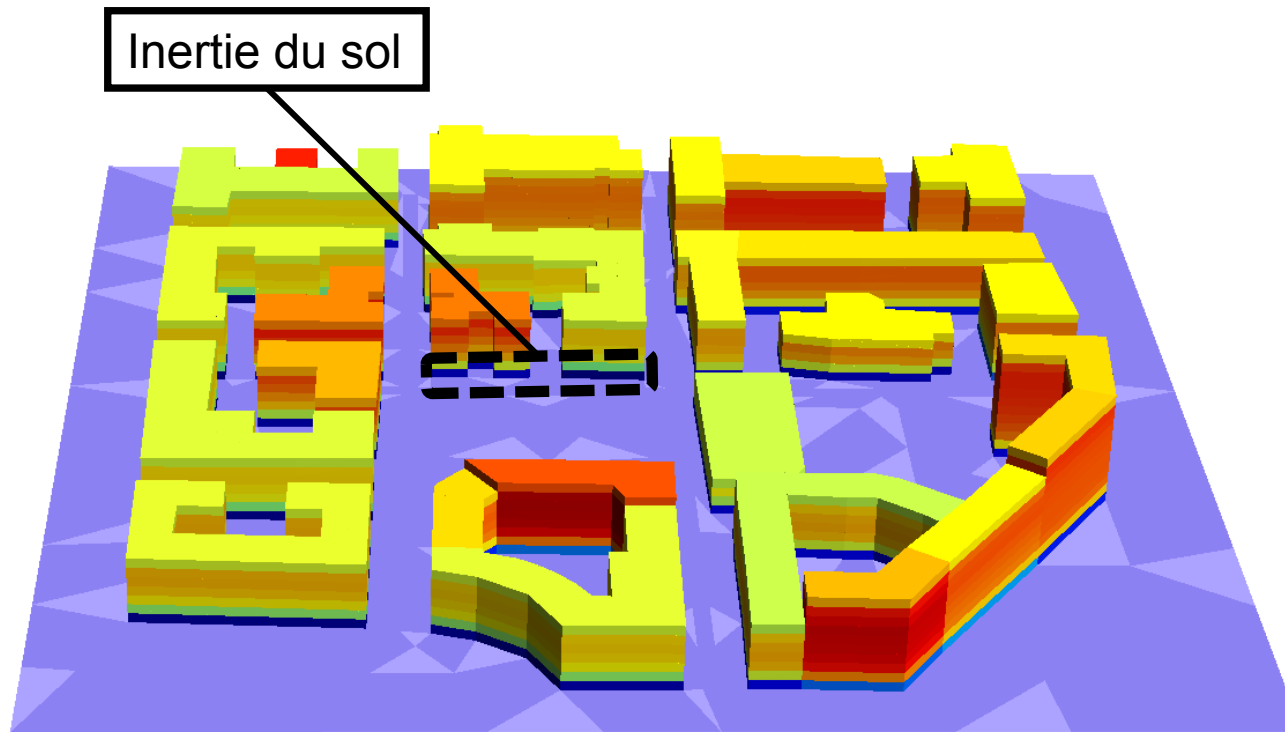
LES CONSEILS À UN AMÉNAGEUR :

- **Objectif d'amélioration du confort thermique dans les espaces extérieurs:** privilégier la solution de végétalisation des espaces au sol sur différentes strates végétales



3.2. QUARTIER DE LA BUIRE

3.2.1. ETUDE DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES - Etat existant -

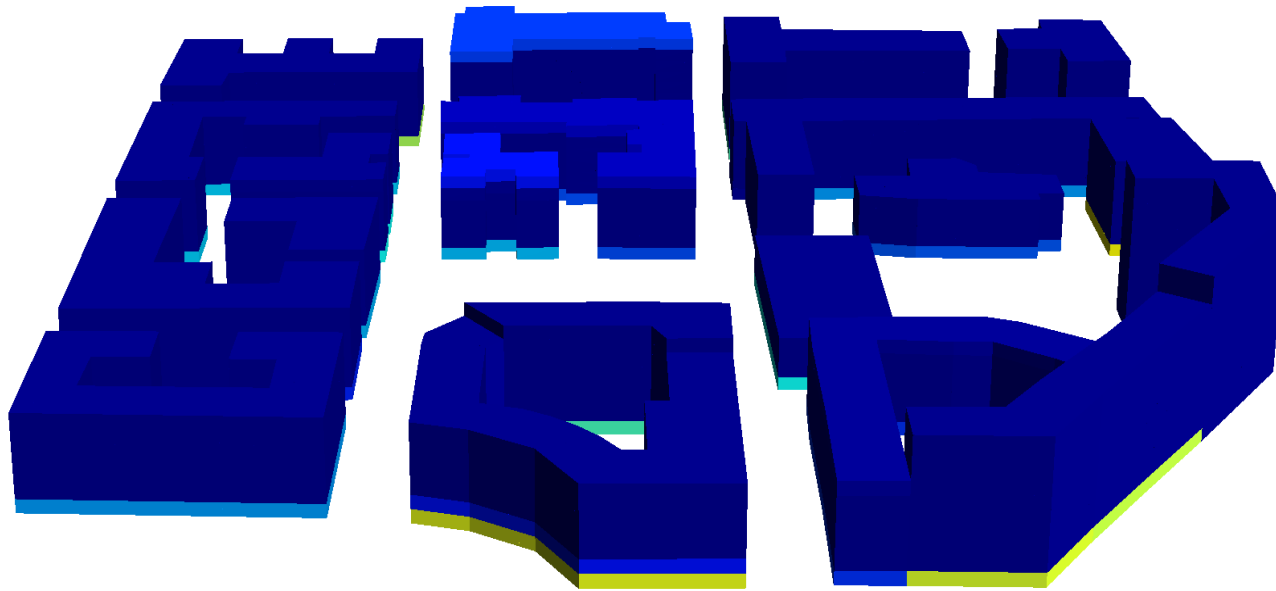


- Besoins en climatisation du 01/05 au 30/09 2013
- Température de consigne : 26°C
- Résultats homogènes
- Besoins totaux du quartier: 13 188 MWh/an

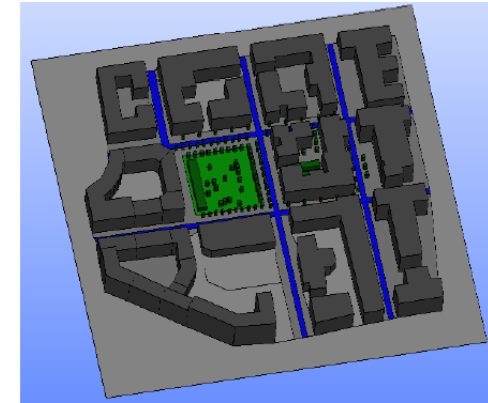
Besoins en climatisation(kWh/m²)



3.2.1. ETUDE DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES - Scénario monodispositif humidification-

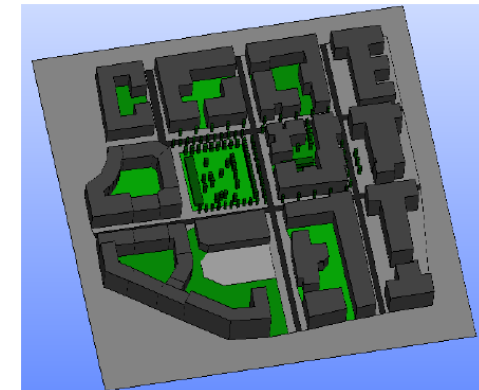
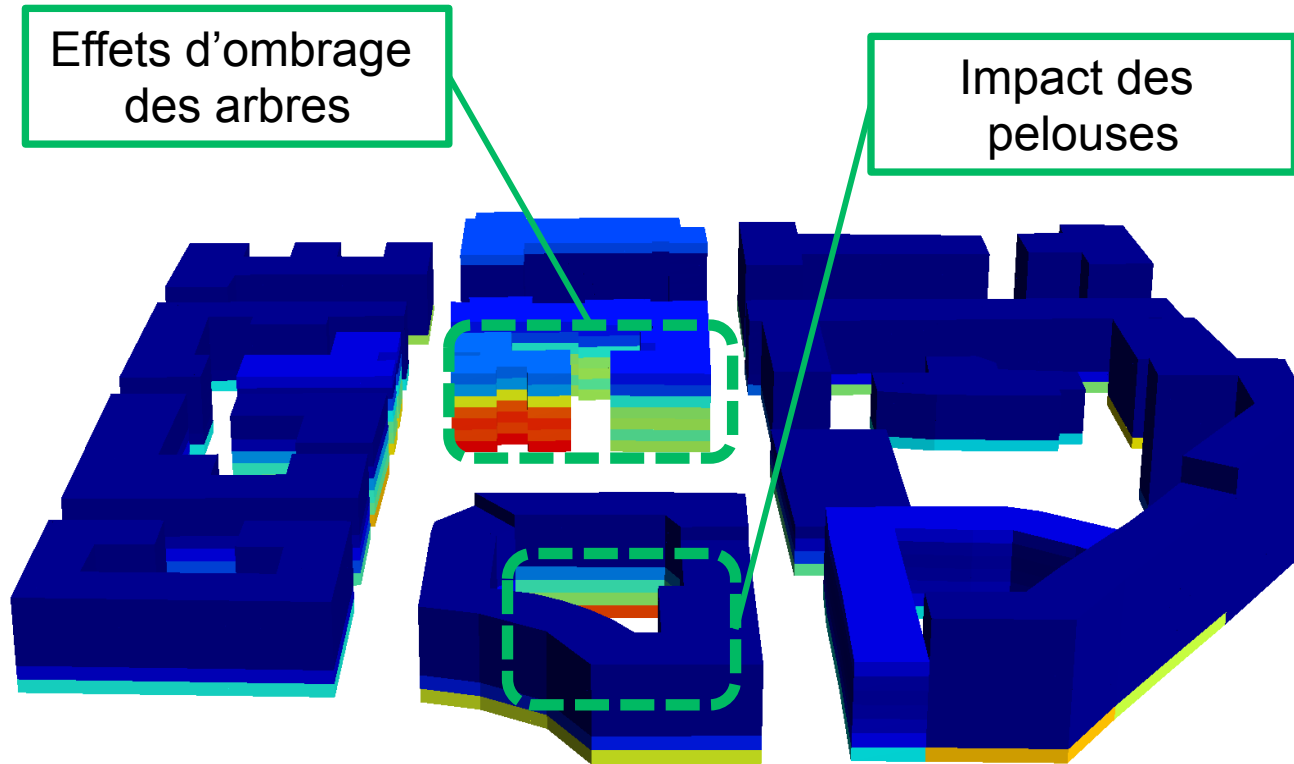


Diminution des besoins en climatisation (%)



- Impact au niveau des rez-de-chaussée
- Max: 3%
- Réduction total quartier: 0.34%

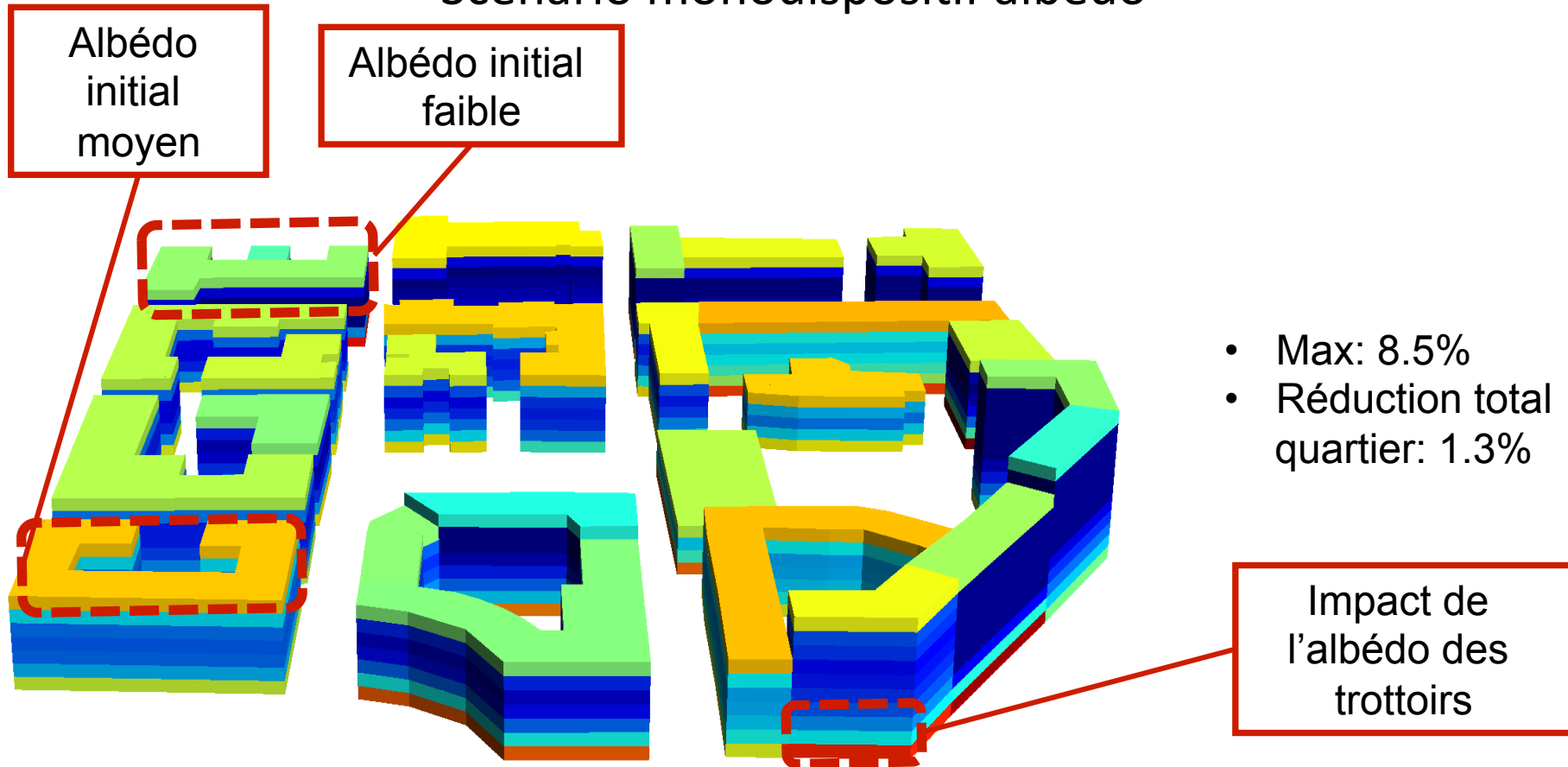
3.2.1. ETUDE DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES - Scénario monodispositif végétation -



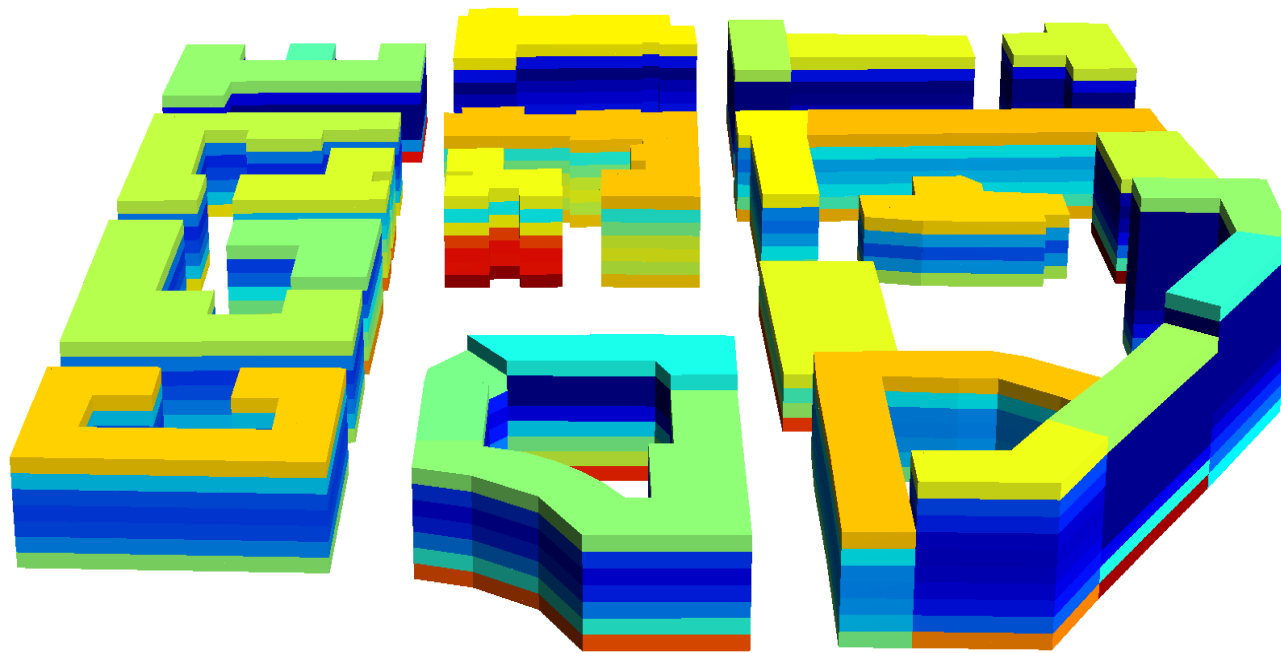
- Max: 6%
- Réduction total quartier: 0.67%

Réduction total quartier:
0.67%

3.2.1. ETUDE DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES -Scénario monodispositif albédo -



3.2.1. ETUDE DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES -Scénario optimisé -



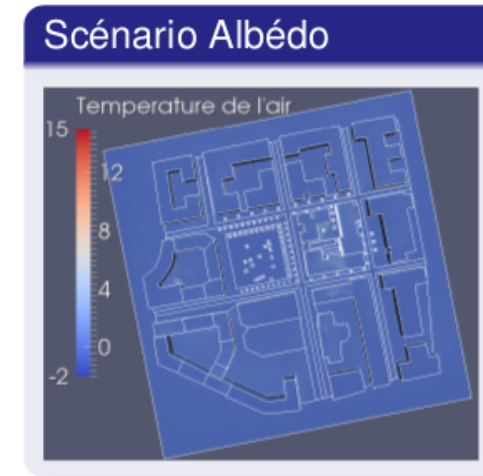
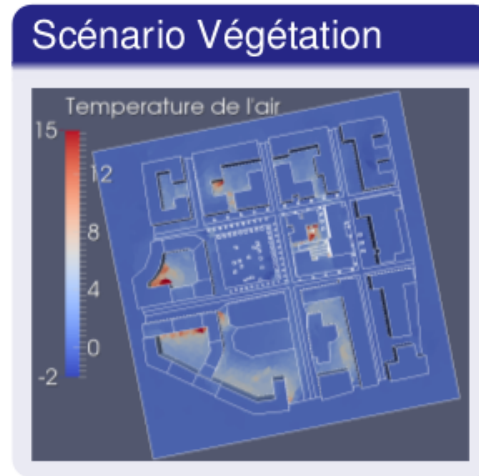
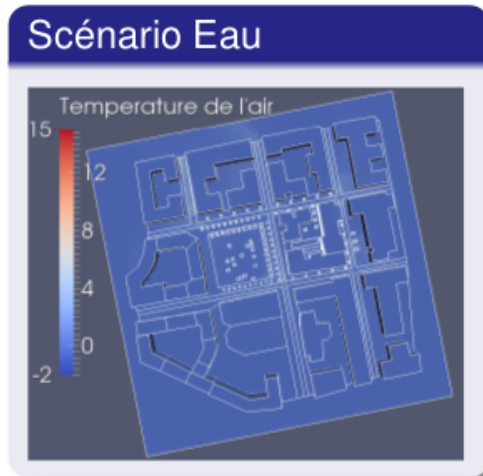
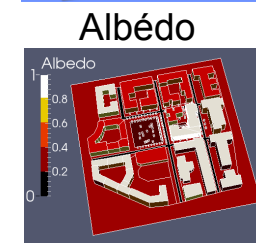
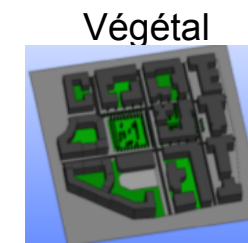
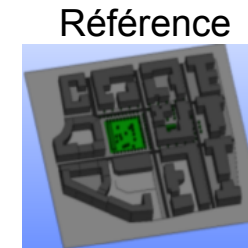
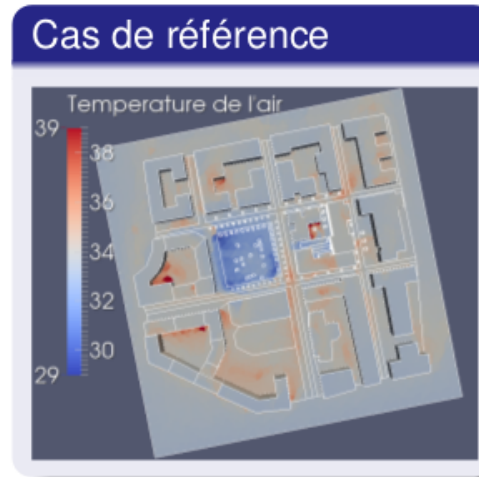
- Max inchangé : 8.5%
- Répartition différente
- Réduction totale quartier: 1.52%

Diminution des besoins en climatisation (%)



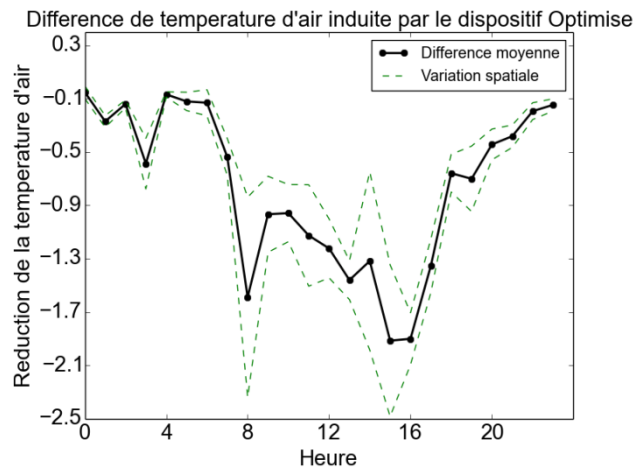
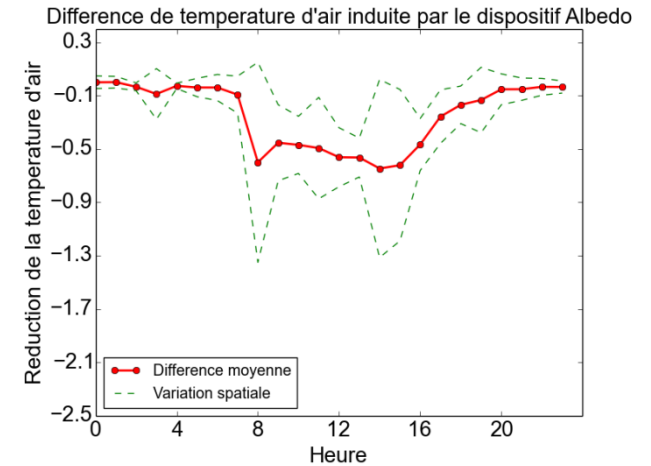
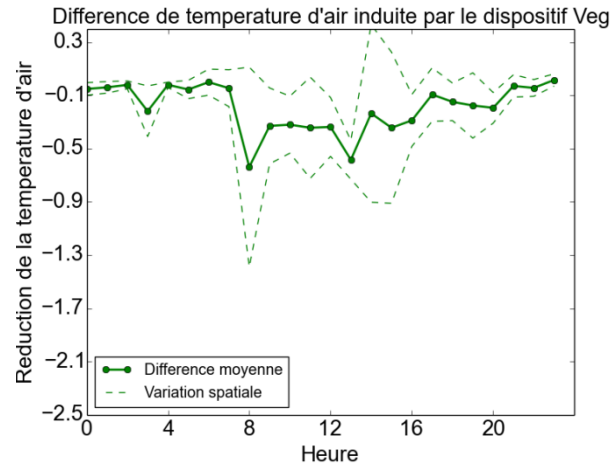
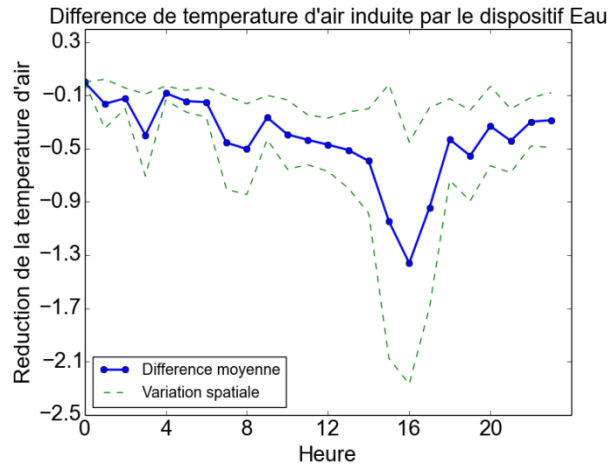
3.2.2. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR MONO-DISPOSITIFS

Distribution de la température de l'air et des différences induites dans les scénarios mono-dispositifs



3.2.2. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR MONO-DISPOSITIFS

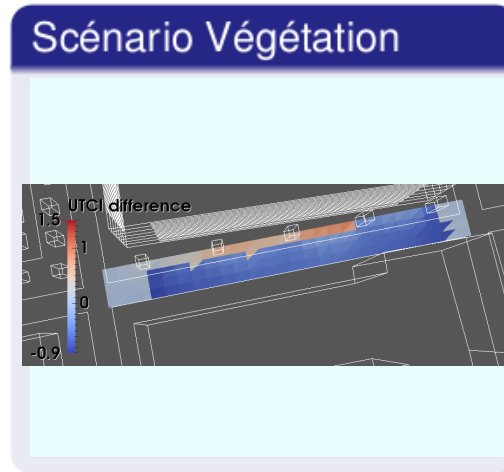
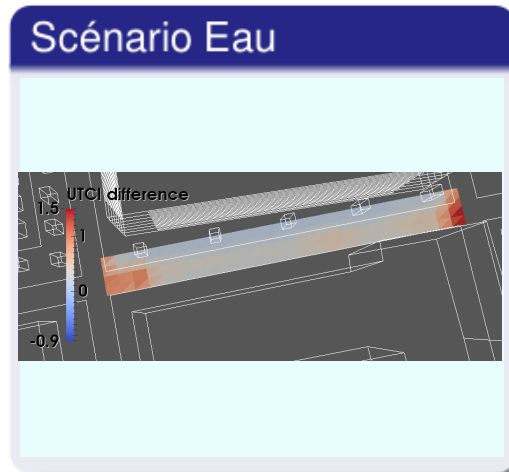
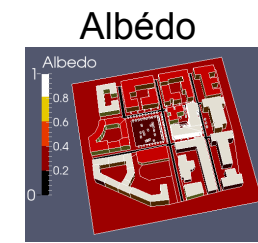
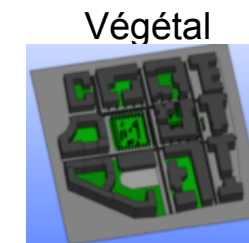
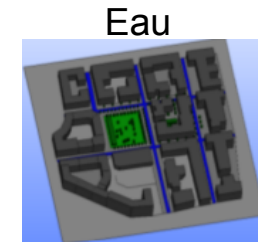
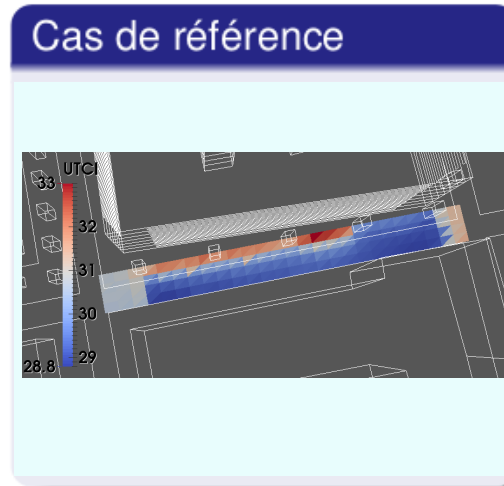
Réduction de la température de l'air induite dans les scénarios mono-dispositifs (Moyenne sur la rue de la Buire)



		Tair			
Buire	Scénario	Eau	Végétal	Albédo	Optimisé
	Moyenne	-0,43	-0,19	-0,25	-0,75
	Écart Type (espace)	0,19	0,1	0,09	0,24
	Écart Type (temps)	0,3	0,21	0,12	0,42

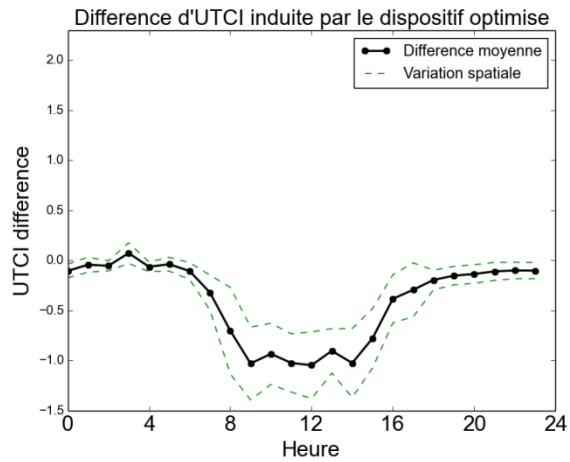
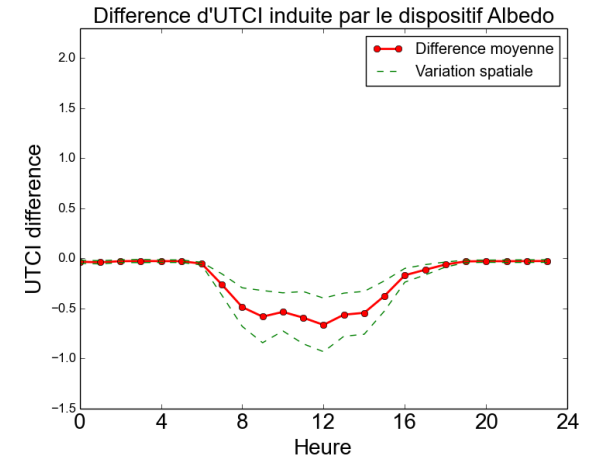
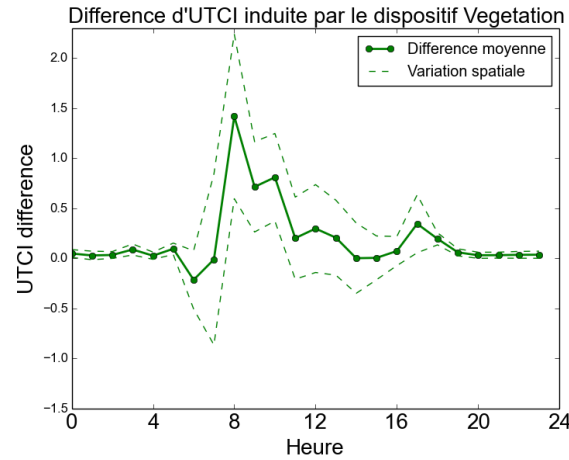
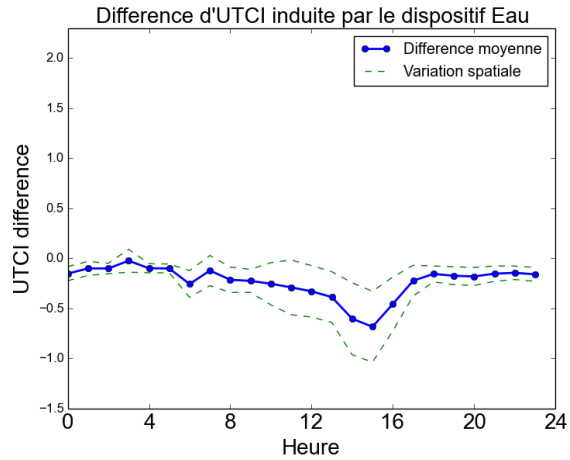
3.2.2. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR MONO-DISPOSITIFS

Distribution de l'UTCI
et des différences
induites dans les
scénarios mono-
dispositifs



3.2.2. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR MONO-DISPOSITIFS

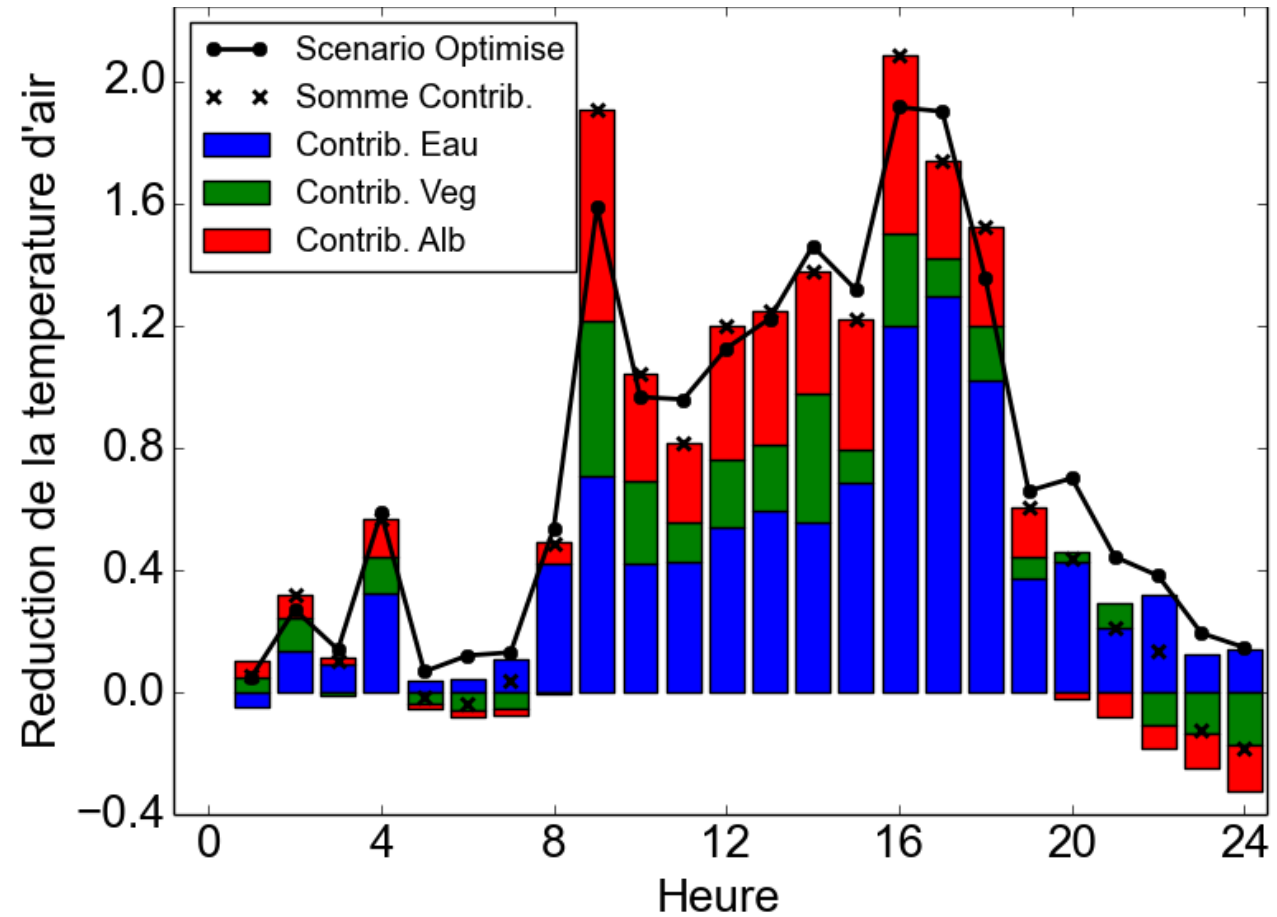
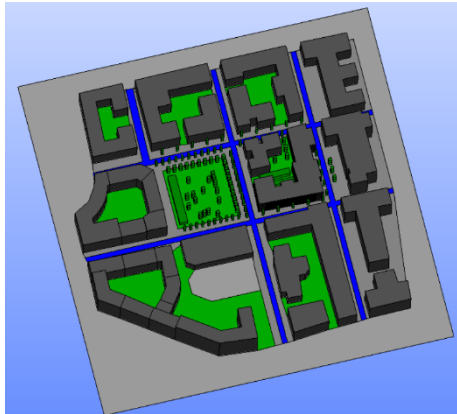
Réduction de l'UTCI induite dans les scénarios mono-dispositifs (Moyenne sur la rue de la Buire)



		Tair				UTCI			
		Eau	Végétal	Albédo	Optimisé	Eau	Végétal	Albédo	Optimisé
Buire	Scénario								
	Moyenne	-0,43	-0,19	-0,25	-0,75	-0,23	0,19	-0,22	-0,27
	Écart Type (espace)	0,19	0,1	0,09	0,24	0,11	0,1	0,08	0,12
	Écart Type (temps)	0,3	0,21	0,12	0,42	0,15	0,23	0,09	0,17

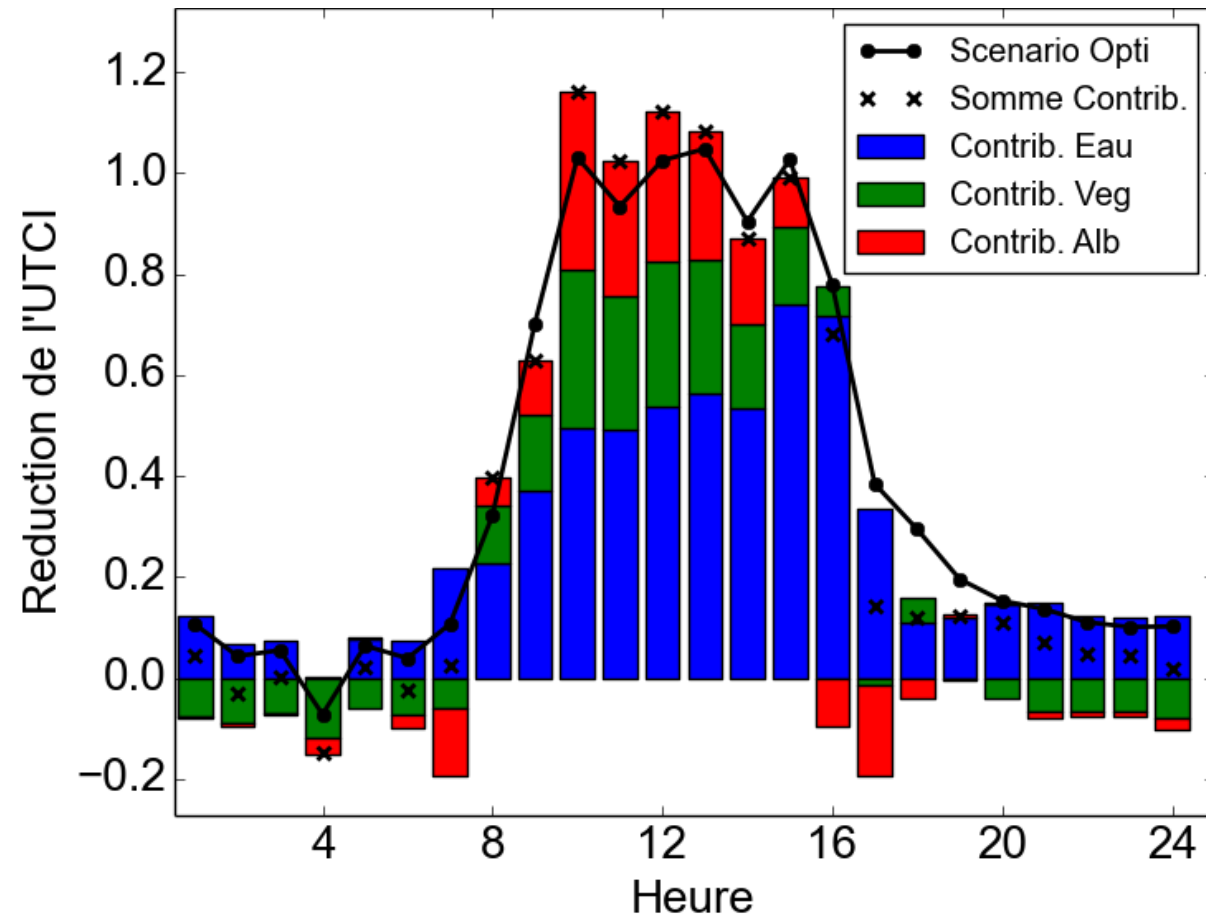
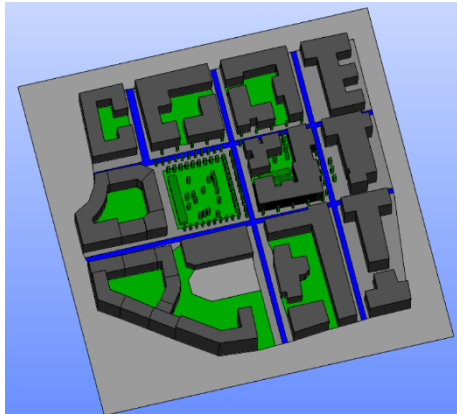
3.2.2. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR OPTIMISÉ

Contribution de chaque dispositif à la réduction de la température de l'air (Moyenne sur la rue de la Buire)



3.2.2. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR OPTIMISÉ

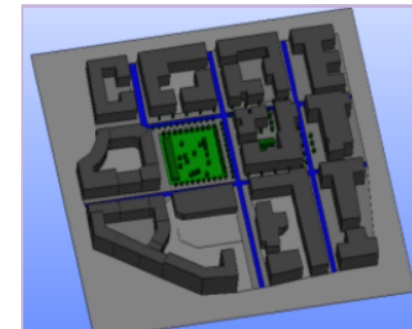
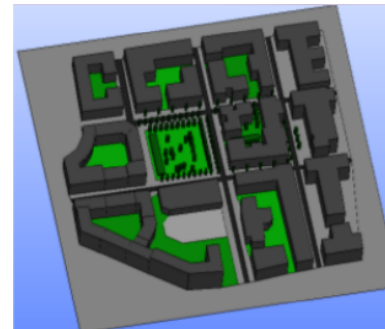
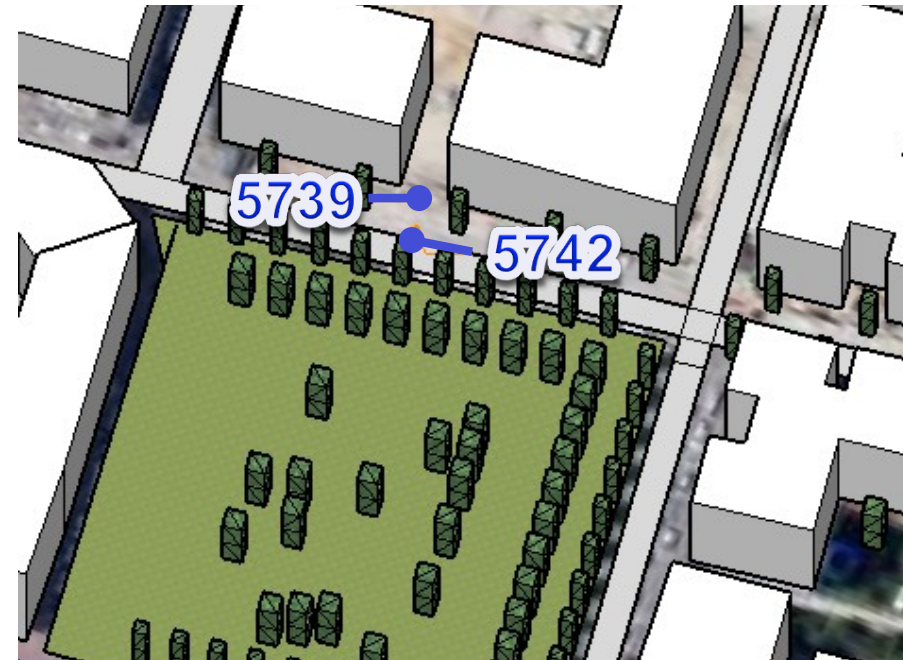
Contribution de chaque dispositif à la réduction de l'UTCI
(Moyenne sur la rue de la Buire)



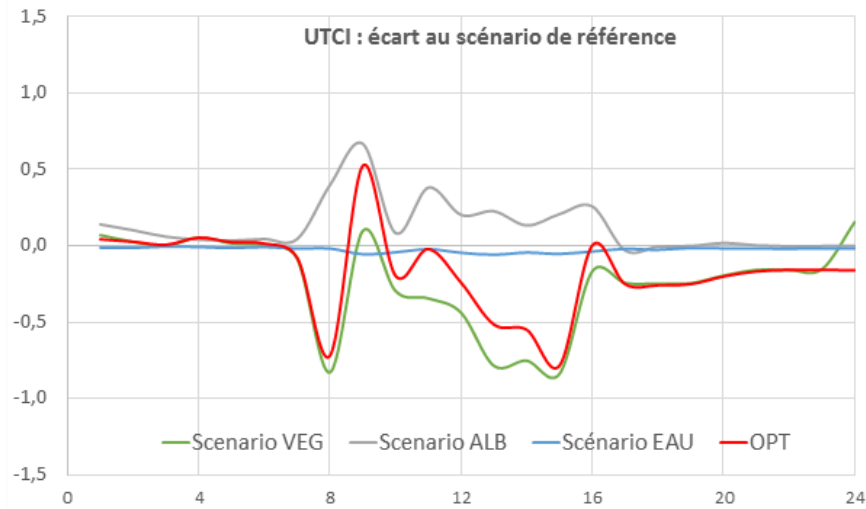
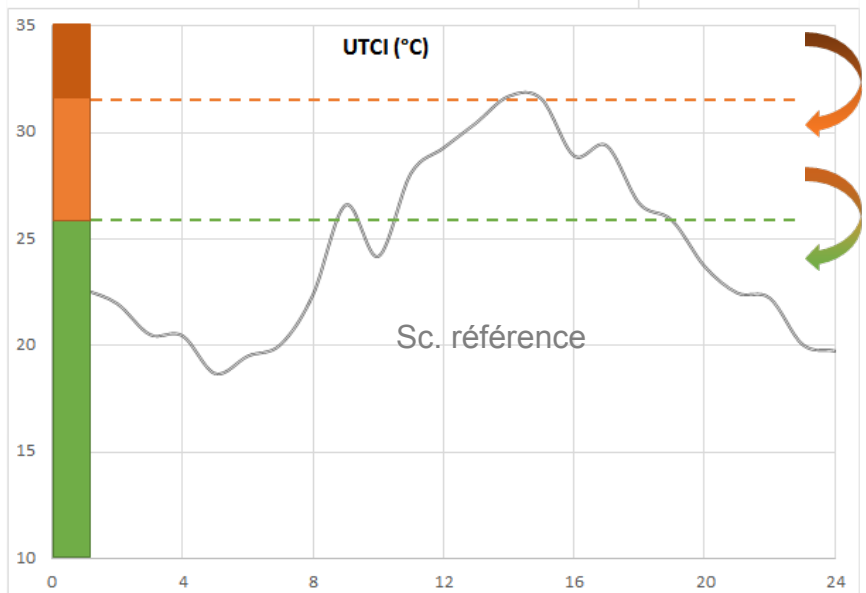
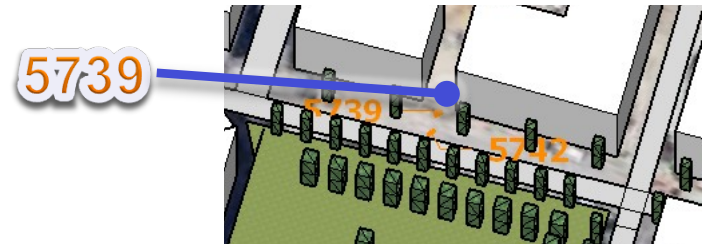
3.2.3. ANALYSE MULTICRITÈRE - ANALYSE DU CONFORT THERMIQUE -

Evaluation locale des UTCI:

- **Point 5739:** lieu exposé plein SUD et minéral. Entre 2 arbres. Loin de la chaussée humidifiée (cas « Eau »).
- **Point 5742:** lieu exposé plein SUD et minéral. Entre 2 arbres. Près de la chaussée humidifiée (cas « Eau »).



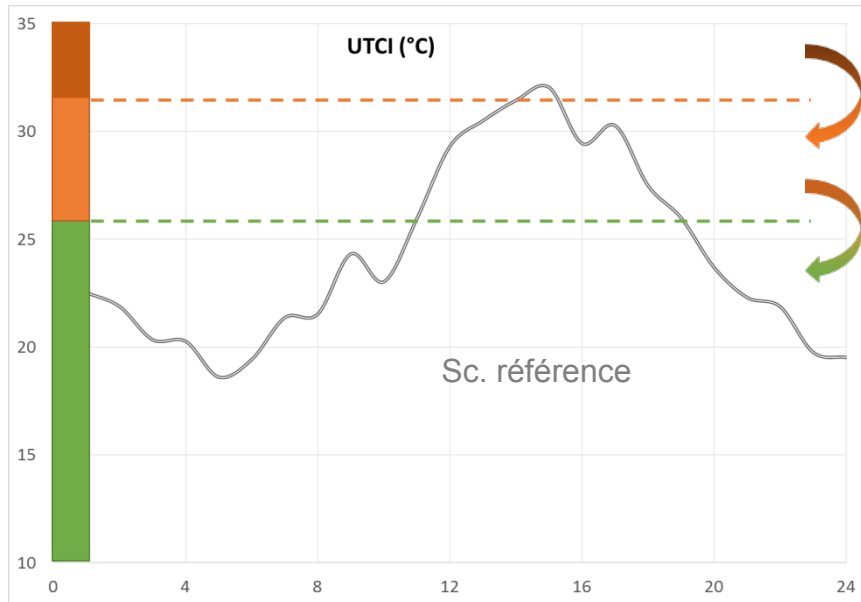
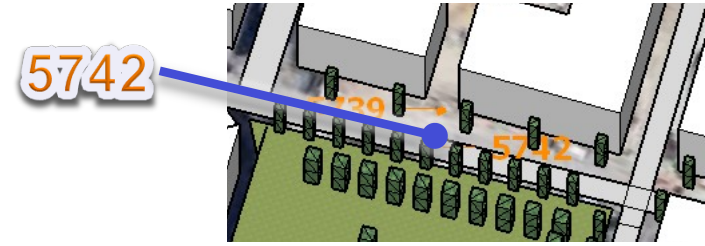
GAIN DE CONFORT BUIRE - BILAN POINT 5739



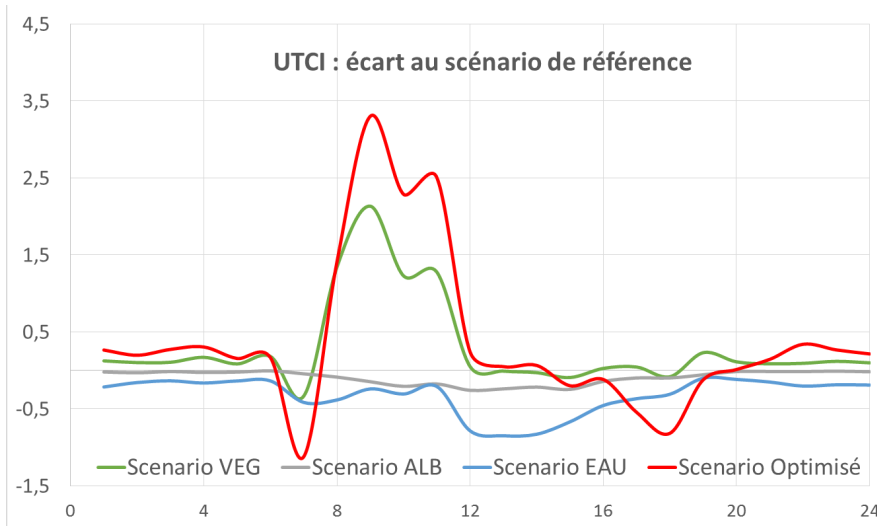
	VEG	ALB	EAU	OPTI
Heures gagnées Stress Fort → Stress Modéré	0	0	0	0
Heures gagnées Stress Modéré → Sans Stress	0	0	0	0
Gain moyen de confort (UTCI) entre 9 et 16h (°C)	-0,40	0,21	-0,04	-0,23

- Pas de réduction du stress thermique sur la journée
- Impact positif ou négatif sur la température en fonction de la solution de rafraîchissement
- La végétation favorise la réduction de l'UTCI de façon significative
- La réflexion accrue par le changement d'albédo entraîne a contrario une augmentation de la température ambiante

GAIN DE CONFORT BUIRE - BILAN POINT 5742



	VEG	ALB	EAU	OPTI
Heures gagnées Stress Fort → Stress Modéré	1	1	1	1
Heures gagnées Stress Modéré → Sans Stress	-3	0	0	-2
Gain moyen de confort (UTCI) entre 9 et 16h (°C)	0,57	-0,20	-0,54	1,02



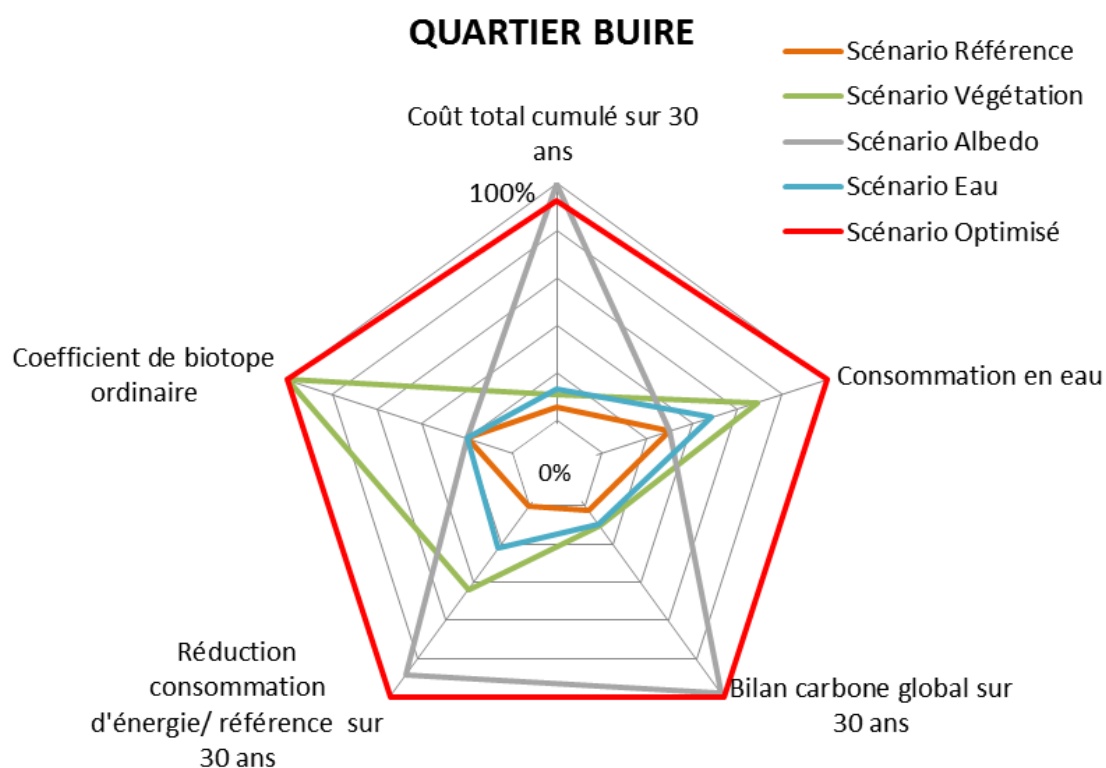
- Les trois solutions de rafraîchissement proposées permettent de réduire de 1h la période de stress thermique forte.
- Impact positif ou négatif sur la température en fonction de la solution de rafraîchissement
- La végétation favorise l'augmentation locale de la valeur d'UTCI liée aux modifications des courants des vents. Cela s'explique en partie par la présence de la strate arborée

3.2.3. ANALYSE MULTICRITÈRE - IMPACTS COMPARÉS DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS-

Critère	Unité	Scénario Référence	Scénario Végétation	Scénario Albédo	Scénario Eau	Scénario Optimisé
Réduction de l'ICU au point 5739	°C		-0,44	0,27	-0,05	-0,22
Réduction de l'ICU au point 5742	°C		0,57	-0,20	-0,54	1,02
Coût total cumulé sur 30 ans	k€ HT	428	848	7 924	1 056	7 343
Consommation eau cumulée annuel	milliers de m ³ /an	10,6	29,2	7,3	12,8	31,2
Bilan carbone global sur 30 ans	Teq	111	433	4 061	414	4 161
Réduction consommation d'énergie (par rapport au scénario de référence)	MWh	-	2 638	5 310	1 340	5 994
Coefficient de biotope ordinaire	-	780	3 906	780	780	3 906

- **Scénario de végétation:** plus consommateur en eau que l'humidification des chaussées: **1,4 m³/m².an contre 1,1 m³/m².an**
- **Scénario « Albédo »:** plus coûteux, garantissant le meilleur rafraîchissement naturel à l'intérieur des logements mais présentant la plus forte empreinte carbone .
- **Scénario « Eau »:** garantit une amélioration du confort thermique en extérieur
- **Scénario optimisé:** scénario le plus impactant sur les différents critères

3.2.3. ANALYSE MULTICRITÈRE - IMPACT COMPARÉ DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS-



VALEURS LOCALES DES UTCI



Point 5739

- Scénario végétation : **-0,4**
- Scénario Albedo: **-0,21**
- Scénario Eau: **-0,04**
- Scénario optimisé: **-0,23**



Point 5742

- Scénario végétation: **0,46**
- Scénario Albedo: **-0,18**
- Scénario Eau: **-0,50**
- Scénario optimisé: **0,68**

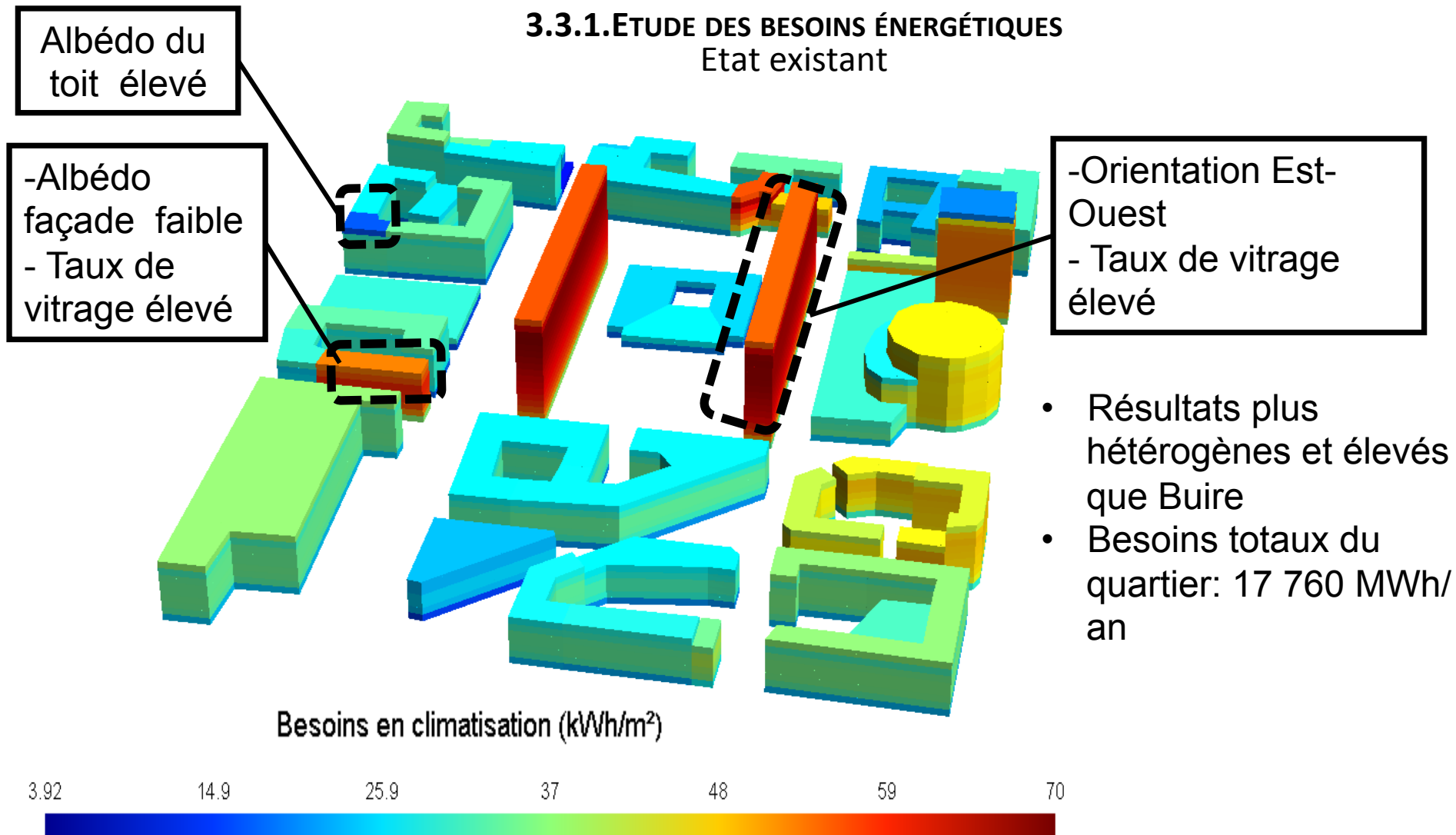
LES CONSEILS À UN AMÉNAGEUR :

- **Objectif d'amélioration du confort thermique dans les espaces extérieurs:** privilégier la solution d'humidification de la chaussée qui permet un abaissement de la valeur d'UTCI localement, indépendamment de la morphologie urbaine du lieu
- **Objectif de réduction des besoins en climatisation:** privilégier la solution de végétalisation qui permet d'obtenir des réductions des besoins en climatisation équivalents dans les logements que le changement d'albédo pour un coût équivalent mais une empreinte carbone divisée par 10.



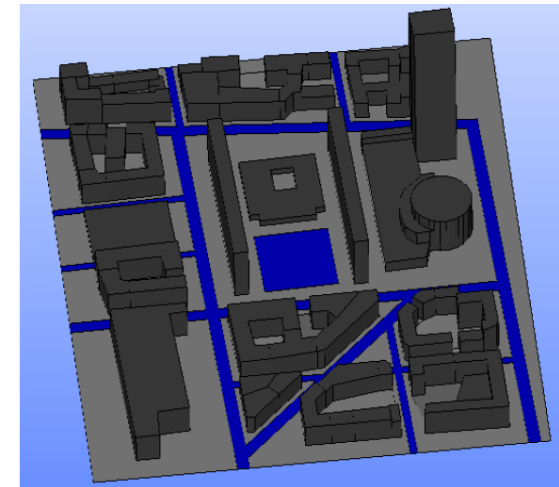
3.3. QUARTIER MONCEY

3.3.1. ETUDE DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES Etat existant



3.3.1. ETUDE DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES

Scénario monodispositif humidification

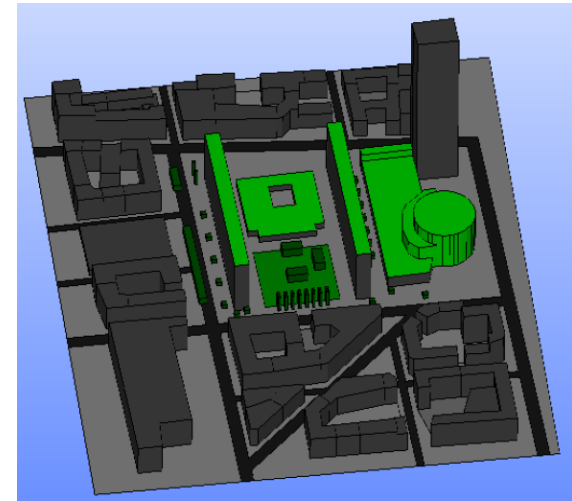
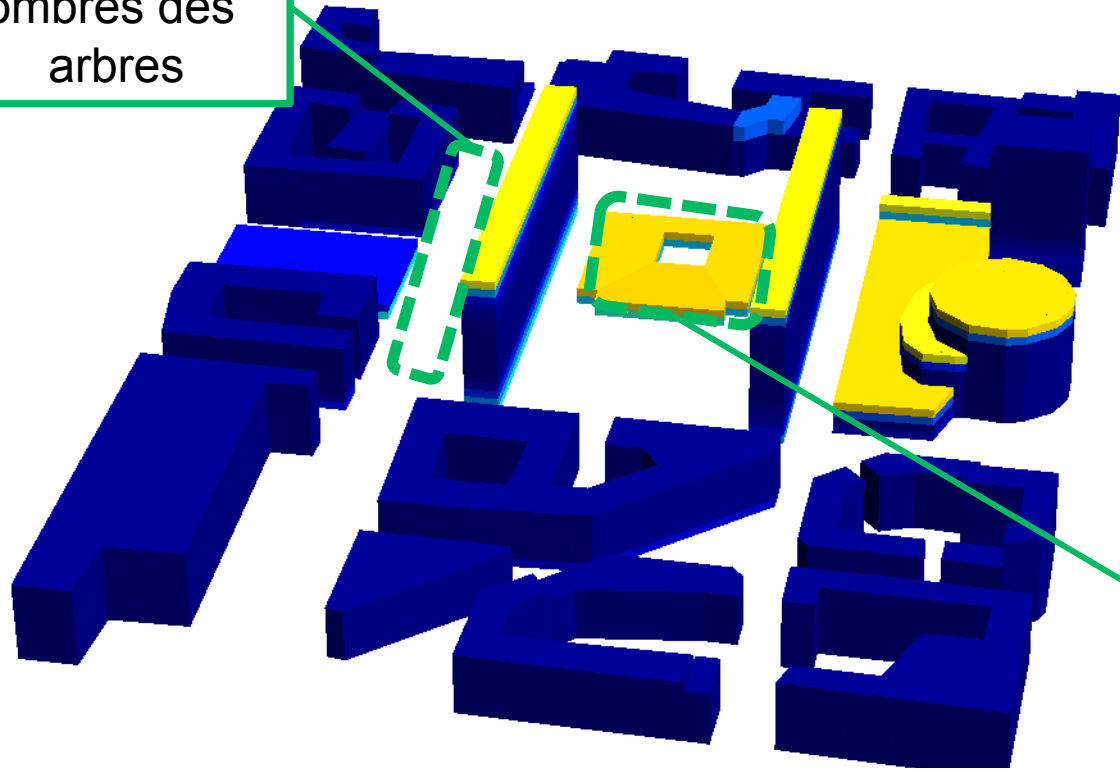


- Impact au niveau des rez-de-chaussée
- Max: 1.5%
- Réduction total quartier: 0.1%

3.3.1. ETUDE DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES

Scénario monodispositif végétation

Impact des ombres des arbres



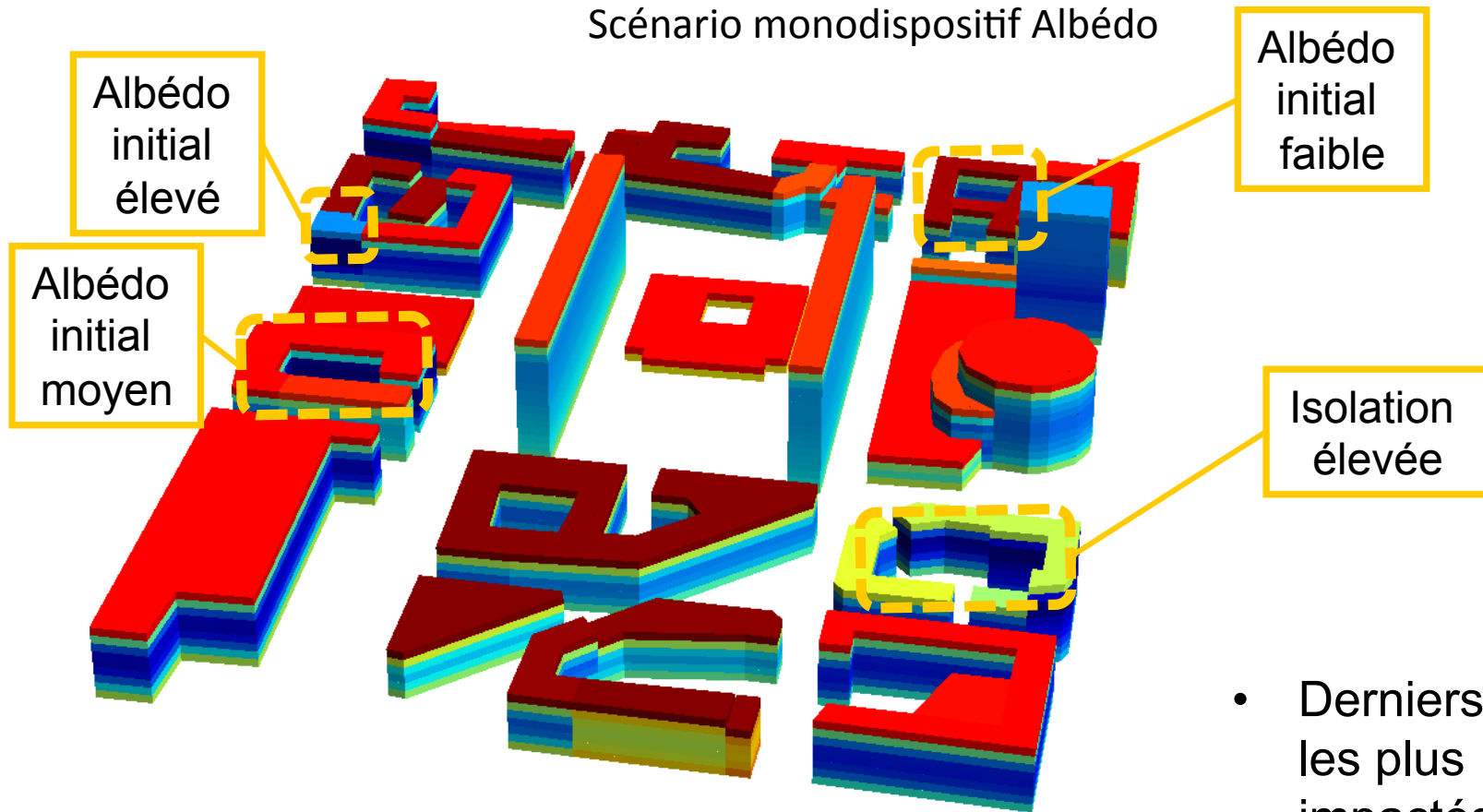
Impact des toitures végétalisées

Diminution des besoins en climatisation (%)



- Max: 10.5%
- Réduction totale quartier: 0.64%

3.3.1. ETUDE DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES Scénario monodispositif Albédo

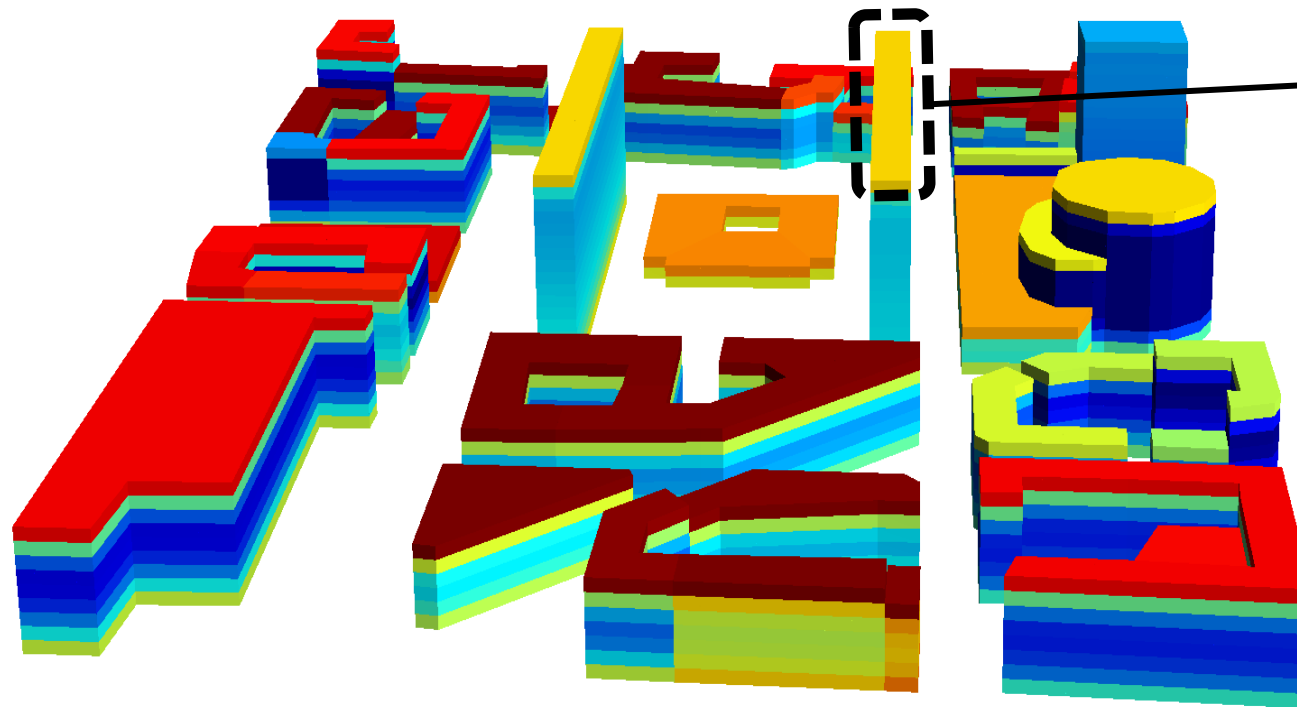


Diminution des besoins en climatisation (%)



- Derniers étages les plus impactés
- Max: 47%
- Réduction totale quartier: 5.6%

3.3.1. ETUDE DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES Scénario optimisé



Végétation moins efficace que albédo

- Max inchangés
- Réduction totale quartier: 5.18%

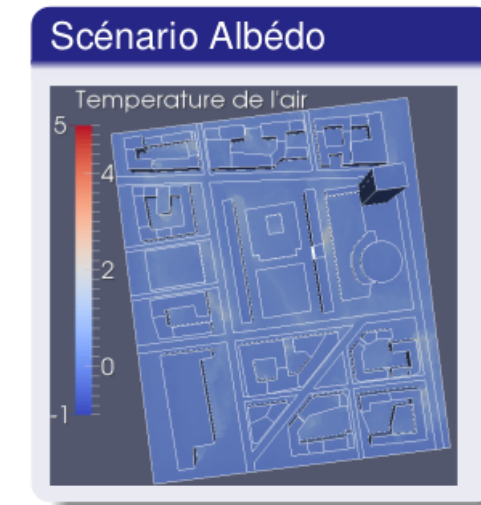
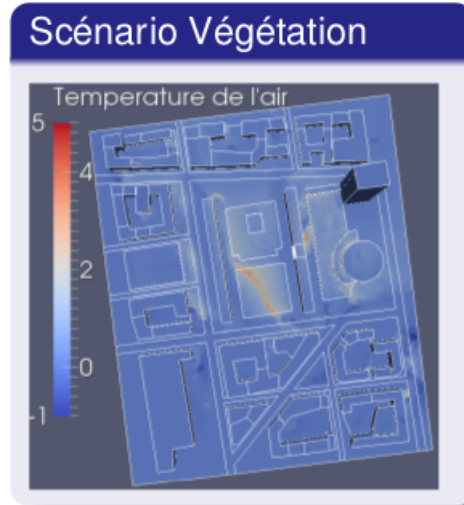
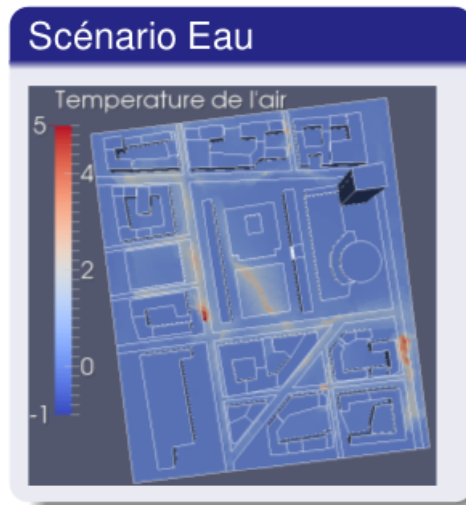
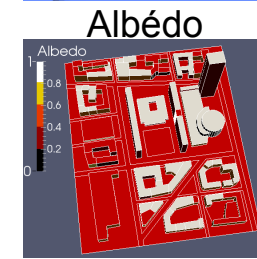
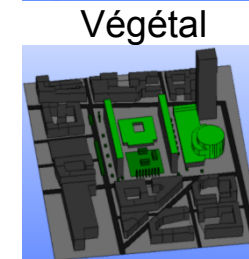
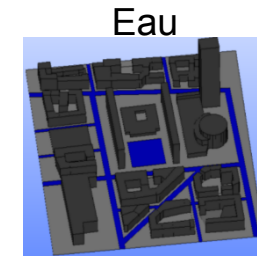
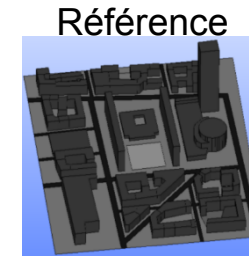
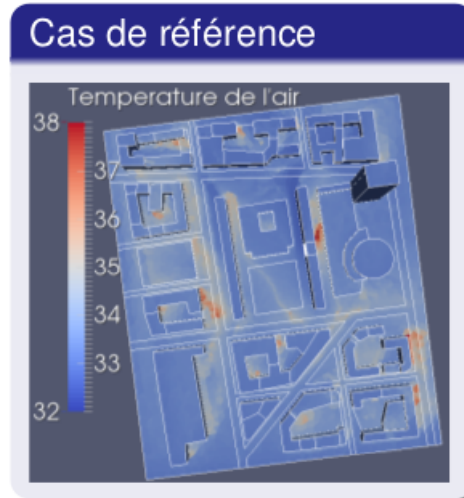
Diminution des besoins en climatisation (%)



3.3.2. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR

MONO-DISPOSITIFS

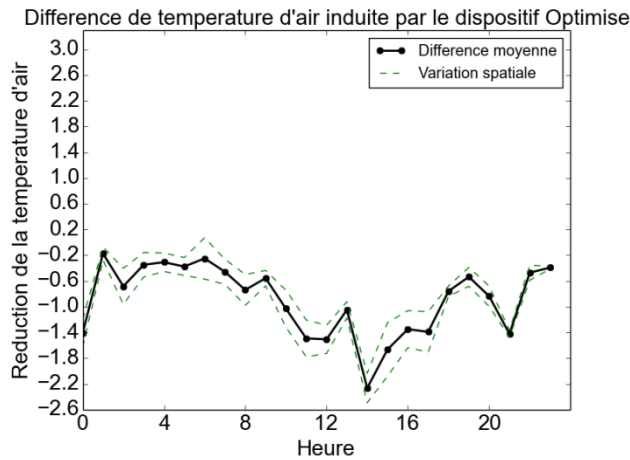
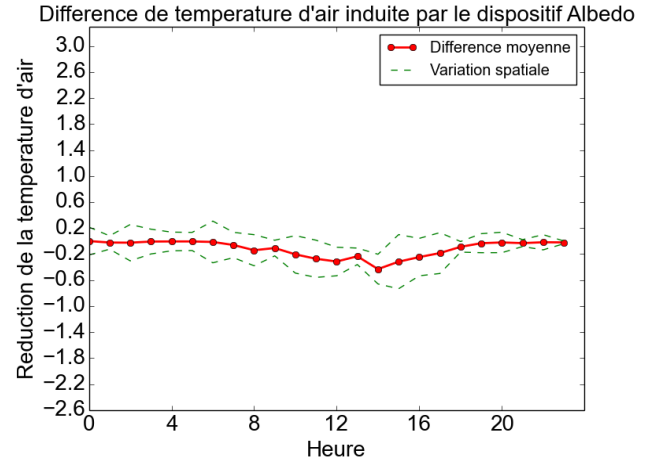
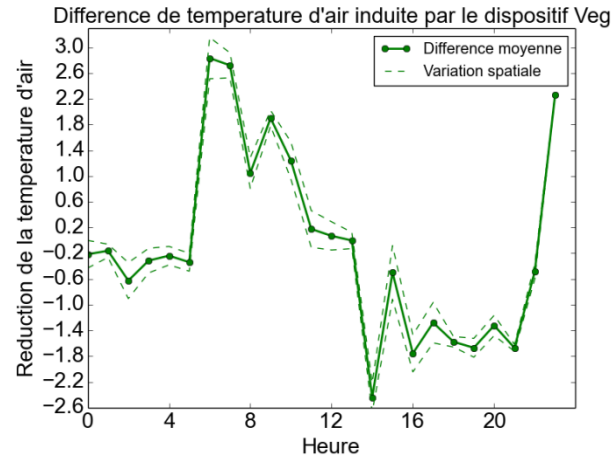
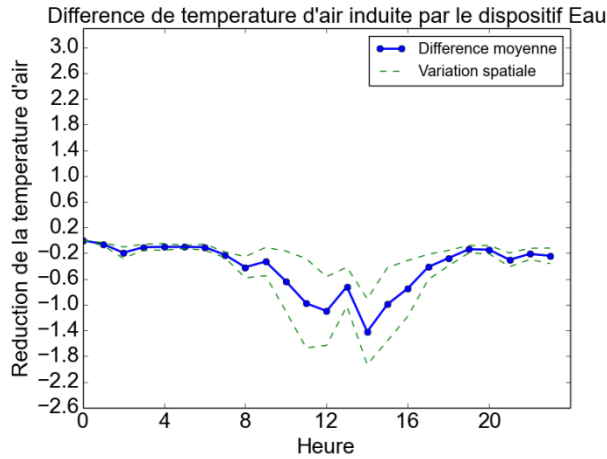
Distribution de la température de l'air et des différences induites dans les scénarios mono-dispositifs



3.3.2. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR

MONO-DISPOSITIFS

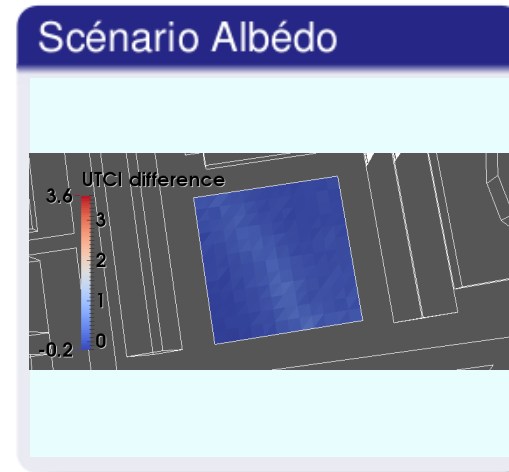
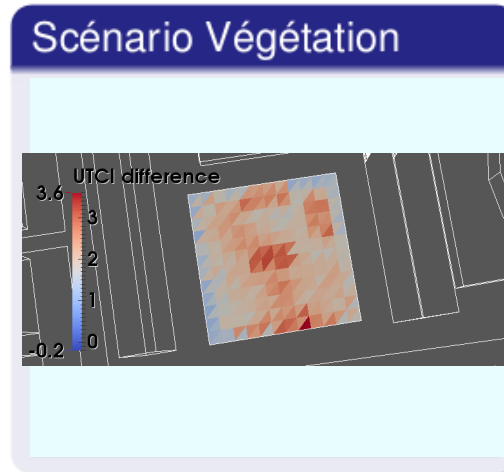
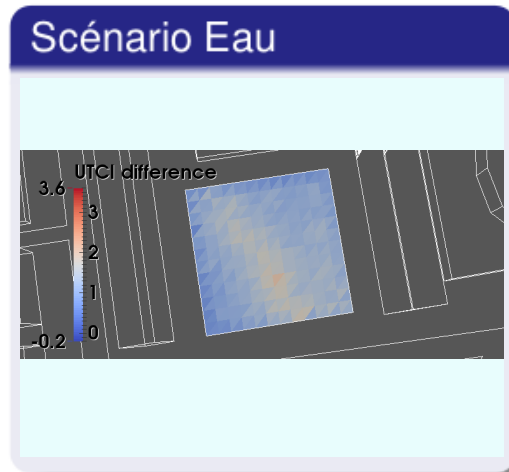
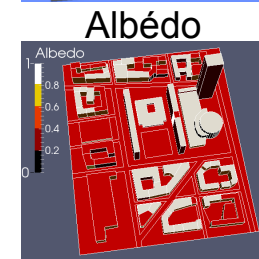
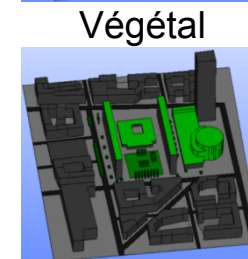
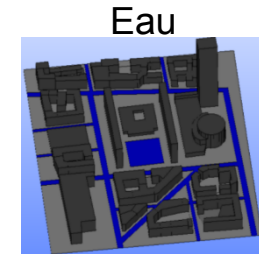
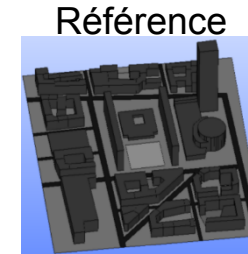
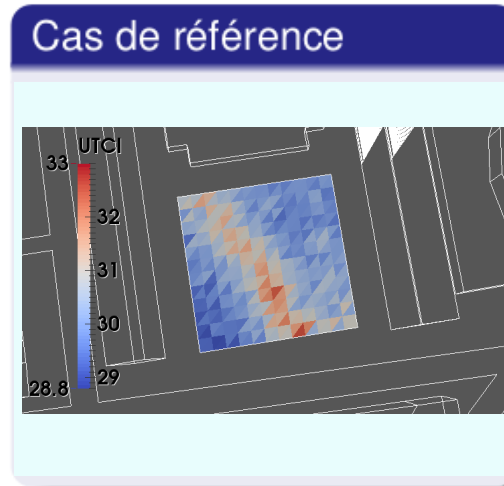
Réduction de la température de l'air induite dans les scénarios mono-dispositifs (Moyenne sur la place entre les barres Moncey)



		Tair			
Moncey	Scénario	Eau	Végétal	Albédo	Optimisé
	Moyenne	-0,42	-0,09	-0,12	-0,90
	Écart Type (espace)	0,13	0,06	0,02	0,24
	Écart Type (temps)	0,21	0,19	0,04	0,38

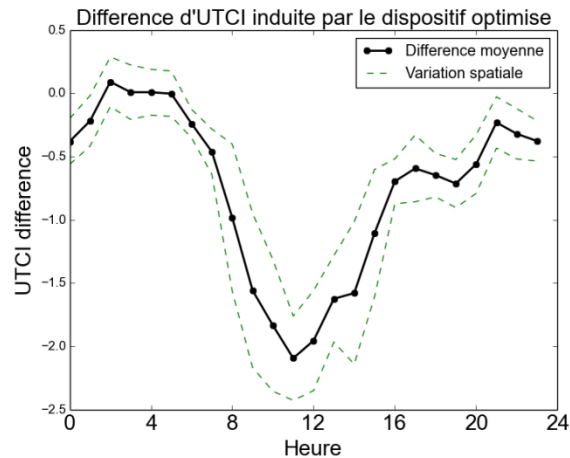
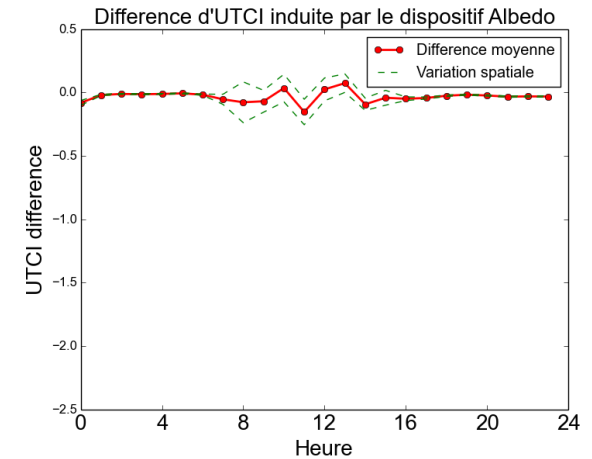
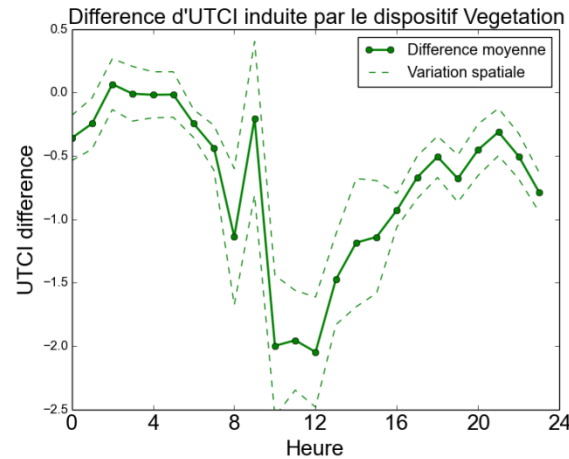
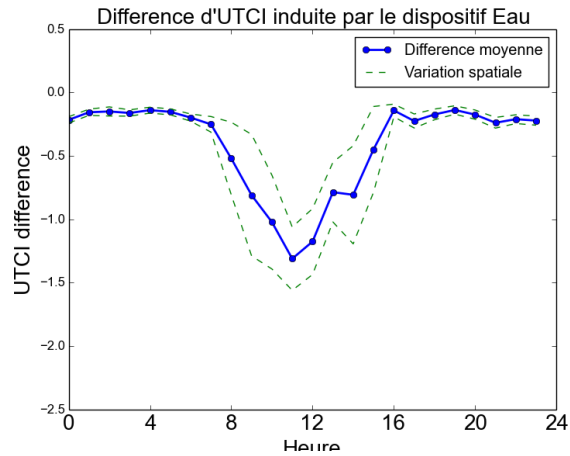
3.3.2. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR MONO-DISPOSITIFS

Distribution de l'UTCI
et des différences
induites dans les
scénarios mono-
dispositifs



3.3.2. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR MONO-DISPOSITIFS

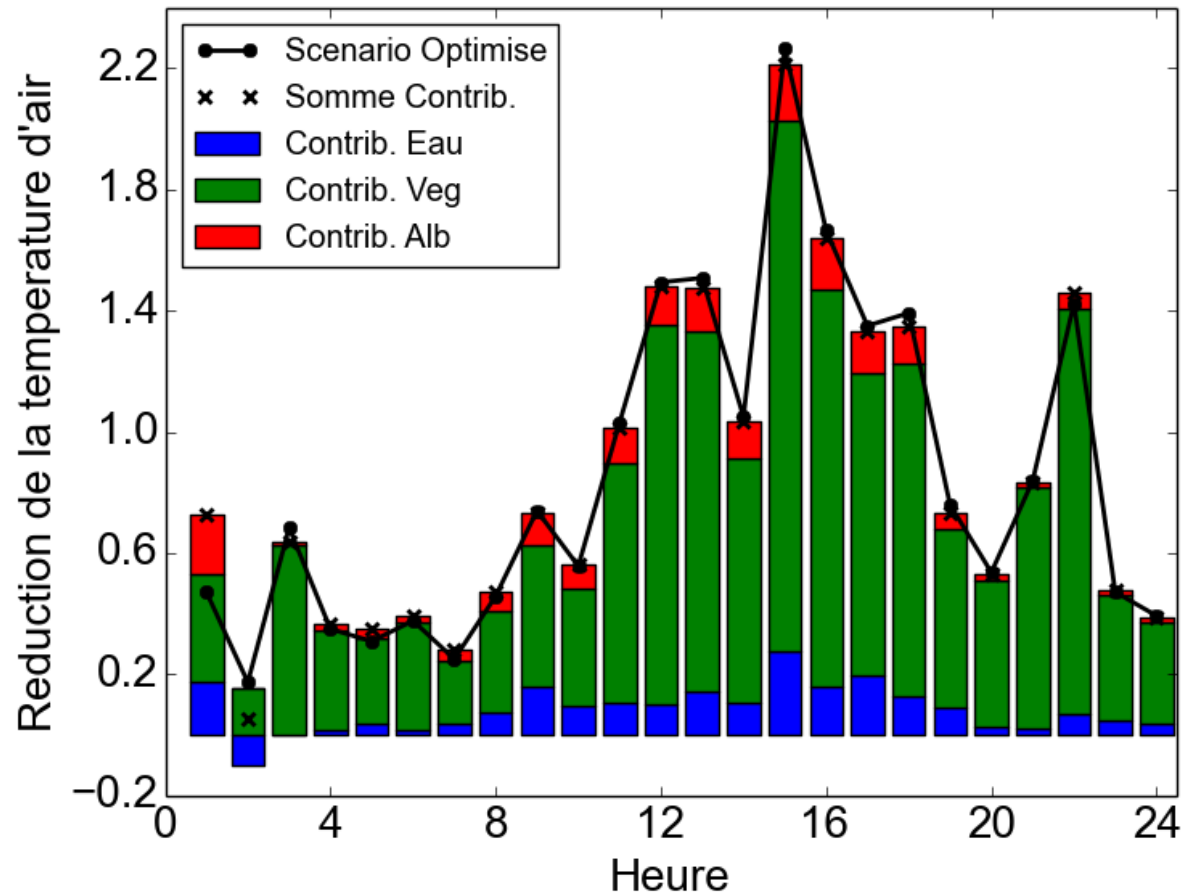
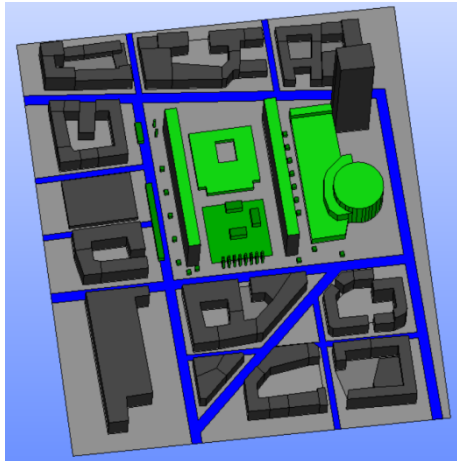
Réduction de l'UTCI induite dans les scénarios mono-dispositifs (Moyenne sur la place entre les barres Moncey)



		Tair				UTCI			
		Eau	Végétal	Albédo	Optimisé	Eau	Végétal	Albédo	Optimisé
Moncey	Scénario	Eau	Végétal	Albédo	Optimisé	Eau	Végétal	Albédo	Optimisé
	Moyenne	-0,42	-0,09	-0,12	-0,90	-0,41	-0,72	-0,03	-0,75
	Écart Type (espace)	0,13	0,06	0,02	0,24	0,08	0,13	0,02	0,13
	Écart Type (temps)	0,21	0,19	0,04	0,38	0,13	0,28	0,04	0,29

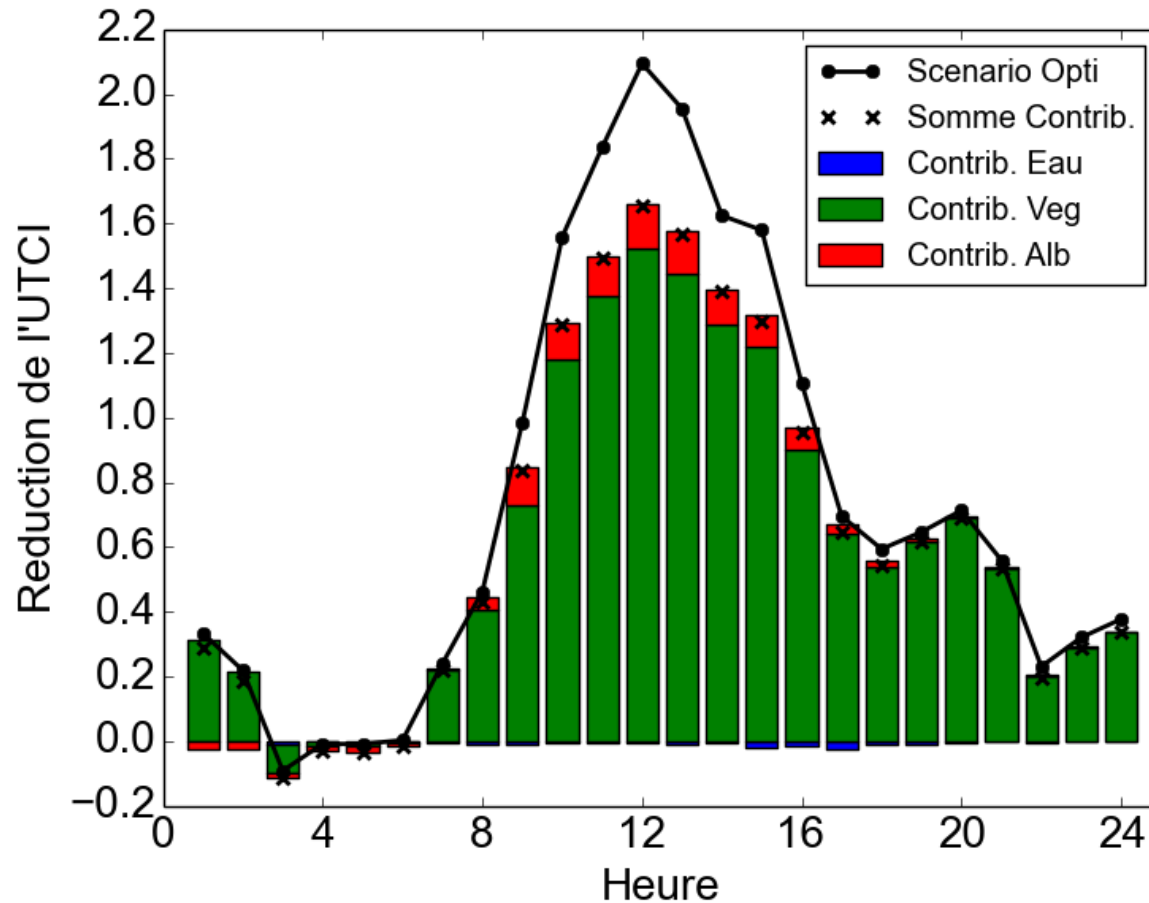
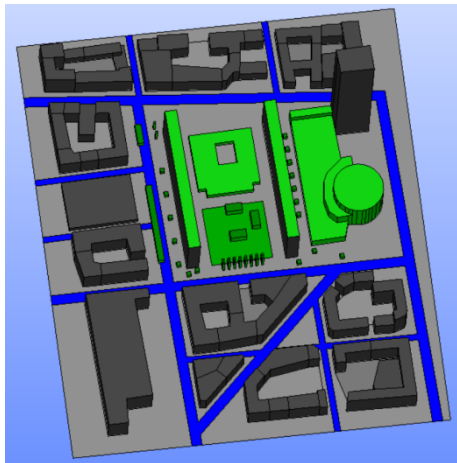
3.3.2. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR OPTIMISÉ

Contribution de chaque dispositif à la réduction de la température de l'air (Moyenne sur la place entre les barres Moncey)



3.3.2. CONFORT THERMIQUE EXTÉRIEUR OPTIMISÉ

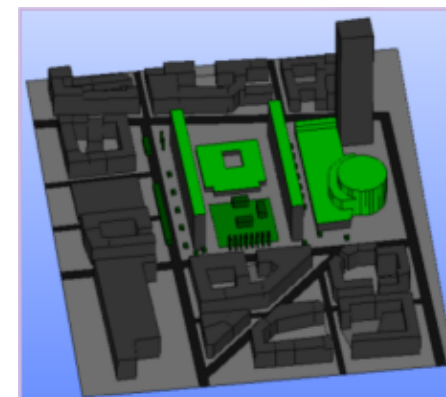
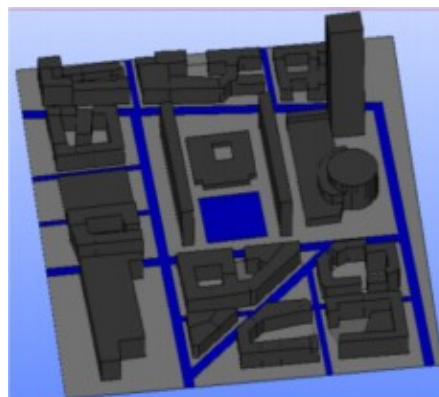
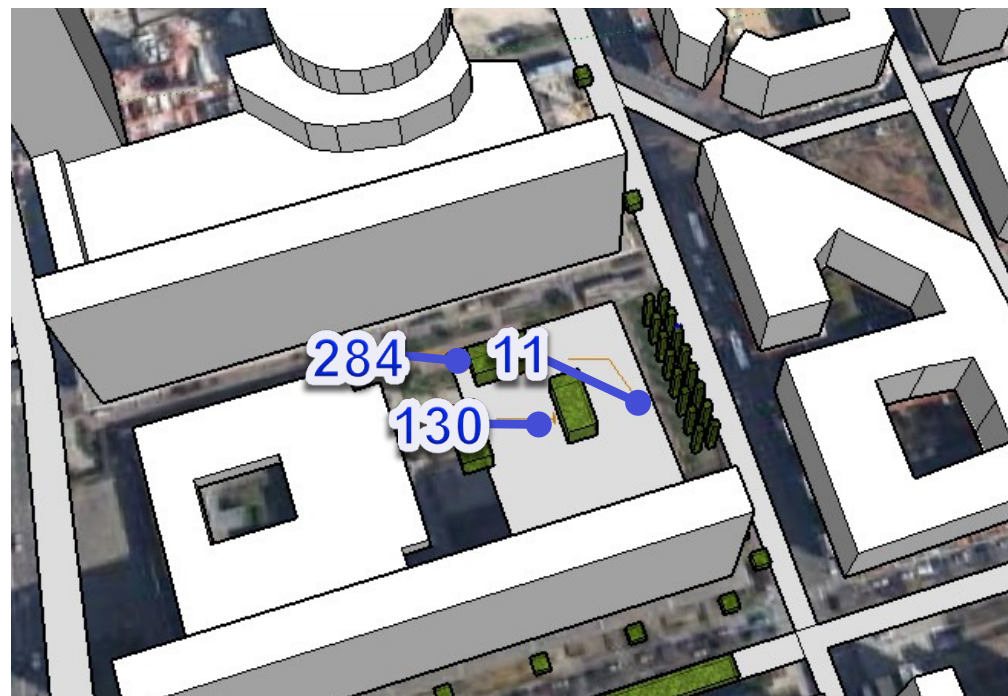
Contribution de chaque dispositif à la réduction de l'UTCI
(Moyenne sur la place entre les barres Moncey)



3.3.3. ANALYSE MULTICRITÈRE - ANALYSE DU CONFORT THERMIQUE -

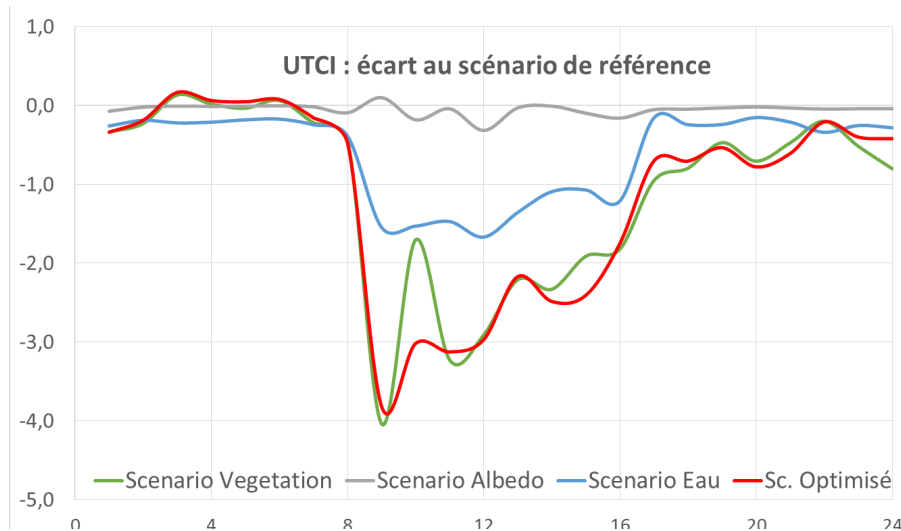
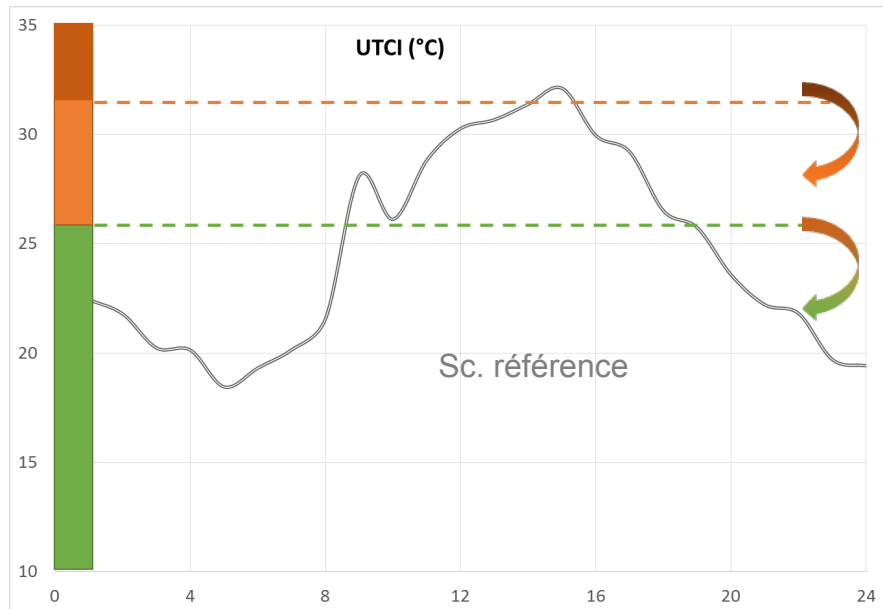
Evaluation locale des UTCI:

- **Point 11:** sur la place centrale, végétalisée pour les scénarios végétation et optimisé en contrebas d'une haie végétale; Espace humidifié (scénario eau)
- **Point 130:** au cœur de la place, zone végétalisée et ombragée (scénario végétation et optimisé); zone humidifiée (scénario eau), zone minérale non humidifiée
- **Point 284:** zone enherbée à proximité d'une voie minéralisée



GAIN DE CONFORT MONCEY – POINT 11

11

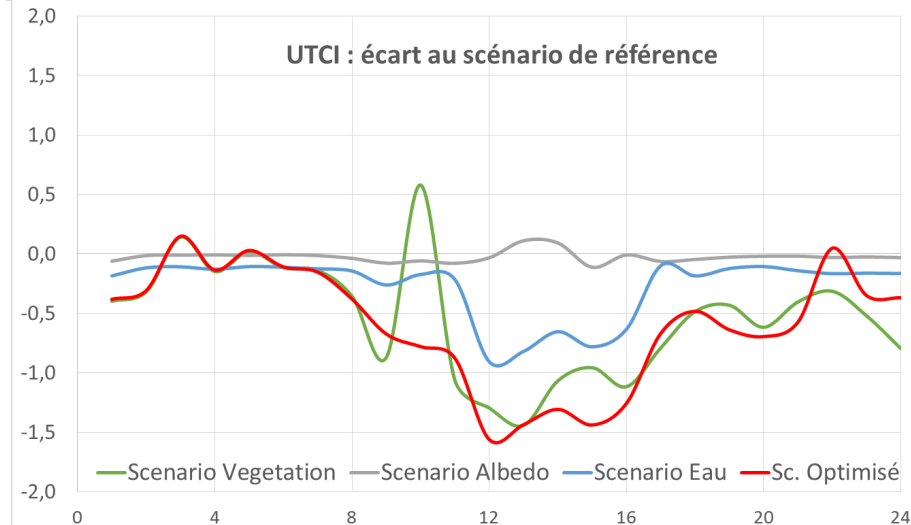
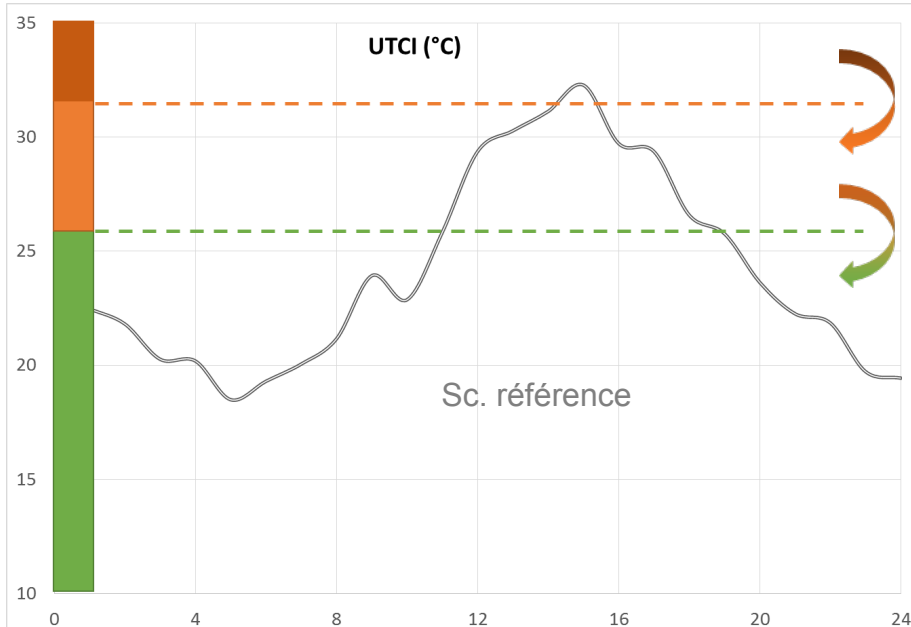


	VEG	ALB	EAU	OPTI
Heures gagnées Stress Fort → Stress Modéré	1	0	1	1
Heures gagnées Stress Modéré → Sans Stress	4	1	1	4
Gain moyen de confort (UTCI) entre 9 et 16h (°C)	-2,52	-0,09	-1,37	-2,72

- Les différentes solutions offrent une réduction des périodes de stress thermique
- Sur les périodes comprise entre 9h et 16h: réduction de la valeur d'UTCI liée à l'évapotranspiration des végétaux ou à l'évaporation du sol.

GAIN DE CONFORT MONCEY – POINT 284

284



	VEG	ALB	EAU	OPTI
Heures gagnées Stress Fort → Stress Modéré	1	0	1	1
Heures gagnées Stress Modéré → Sans Stress	0	0	0	0
Gain moyen de confort (UTCI) entre 9 et 16h (°C)	-0,90	-0,02	-0,56	-1,17

- **L'eau et la végétalisation: réduction des périodes de fort stress thermique sur la journée**
- **Sur les périodes comprises entre 9h et 16h: réduction de la valeur d'UTCI du fait de la végétalisation ou de l'humidification au niveau du point de mesure**

3.3.3. ANALYSE MULTICRITÈRE

- IMPACTS COMPARÉS DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS -

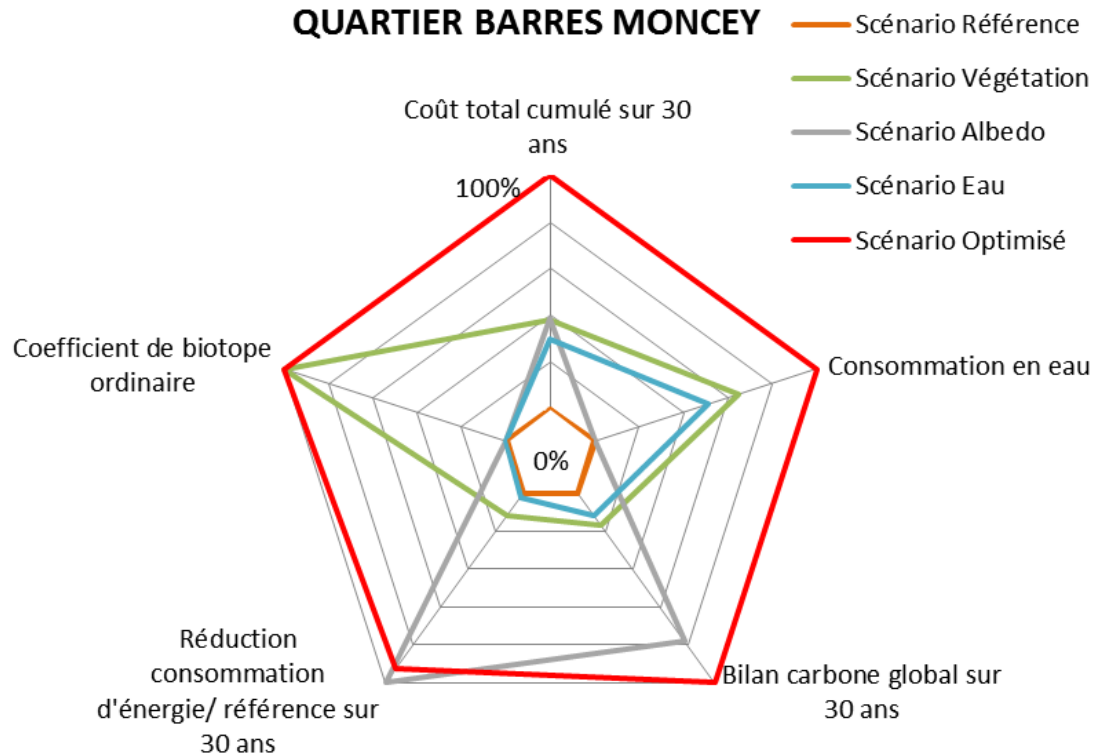
Critère	Unité	Scénario Référence	Scénario Végétation	Scénario Albédo	Scénario Eau	Scénario Optimisé
Gain de confort au point 11	°C		-2,52	-0,09	-1,37	-2,72
Gain de confort au point 284	°C		-0,90	-0,02	-0,56	-1,17
Coût total cumulé sur 30 ans	k€ HT	0	11 619	11 689	8 982	30 319
Consommation eau cumulée annuel	milliers de m ³ /an	-	35,6	-	9,2	39,0
Bilan carbone cumulé sur 30 ans	Teq CO ₂	0	1 610	7 593	1 157	9 787
Réduction consommation en climatisation	MWh	-	3 434	29 841	543	27 615
Coefficient Biotope ordinaire	-	0	1 893,6	0	0	1 893,6

- La végétalisation et l'humidification de chaussées sont les deux solutions offrant le meilleur gain en confort thermique
- La végétalisation est une solution plus consommatrice en eau que l'humidification: **1,34 m³/m².an contre 0,1 m³/m².an**
- Scénario « Albédo »: assure la meilleure réduction de température à l'intérieur des logements mais présente la plus forte empreinte carbone.
- Scénario optimisé: scénario le plus impactant sur les différents critères.

3.3.3. ANALYSE MULTICRITÈRE

- IMPACTS COMPARÉS DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS -

QUARTIER BARRES MONCEY



VALEURS LOCALES DES UTCI



Point 11

- Scénario végétation : -2,19
- Scénario Albédo: -0,08
- Scénario Eau: -1,13
- Scénario optimisé:



Point 384

- Scénario végétation: -0,85
- Scénario Albédo: -0,03
- Scénario Eau: -0,47
- Scénario optimisé:

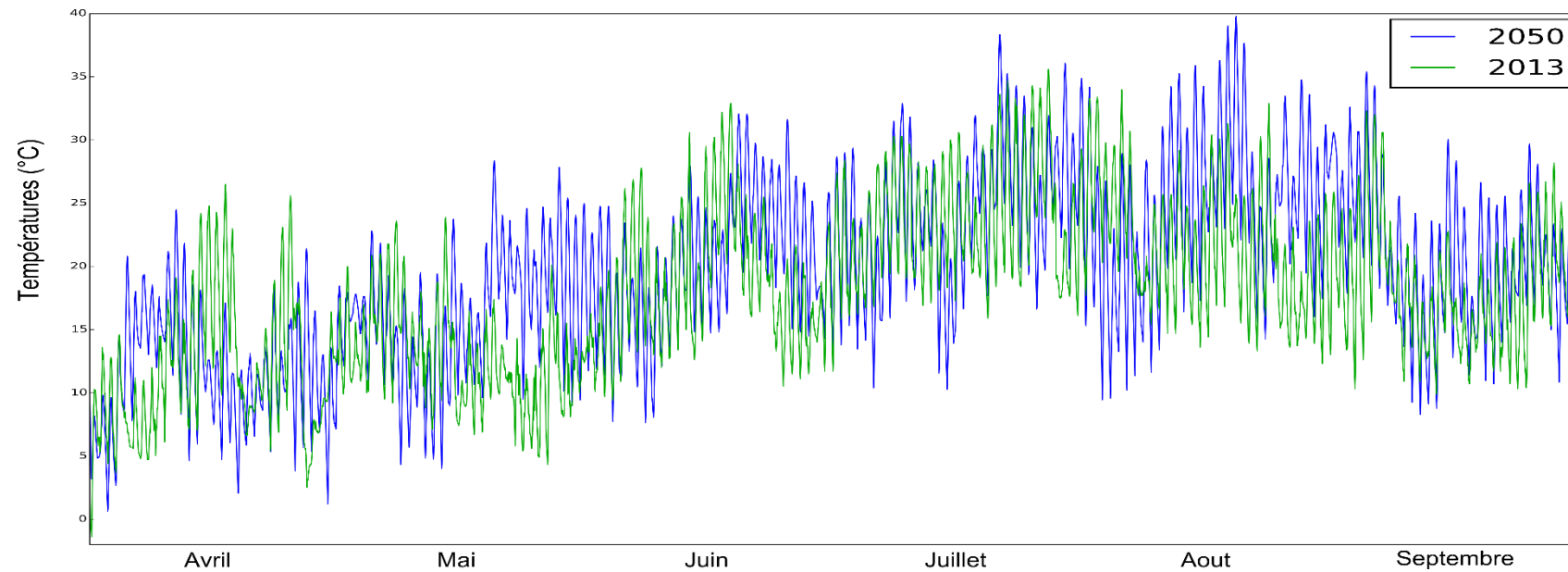
LES CONSEILS À UN AMÉNAGEUR :

- **Objectif d'amélioration du confort thermique dans les espaces extérieurs:** privilégier la solution de végétalisation des espaces sur différentes strates végétales
- **Objectif de réduction des besoins en climatisation:** privilégier la solution de changement d'albédo au niveau des façades et toitures



4. Résultats 2050

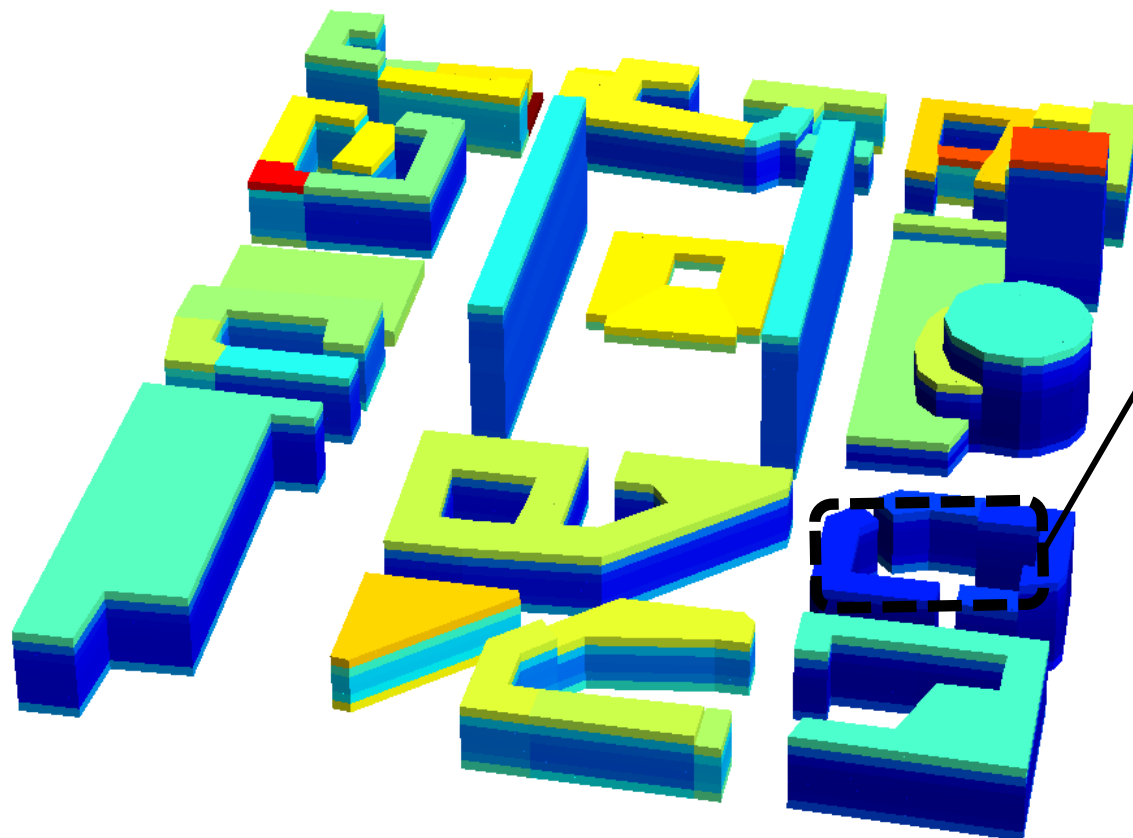
4.1 RÉSULTATS 2050 - SCÉNARIO CLIMATIQUE -



- Utilisation du générateur de climat futur CCWorldWeatherGen (Jentsch et al., 2013)
- Scénario A2 définis par GIEC

	2013	2050	augmentation
Nombre de degrés-heures supérieur à 26°C	1515.7	3047	101%
Température maximale (°C)	35.6	39.8	4.2°C
Irradiation solaire (kWh/m ²)	676	729	8%

4.2 RÉSULTATS 2050 - RÉFÉRENCE 2050 -



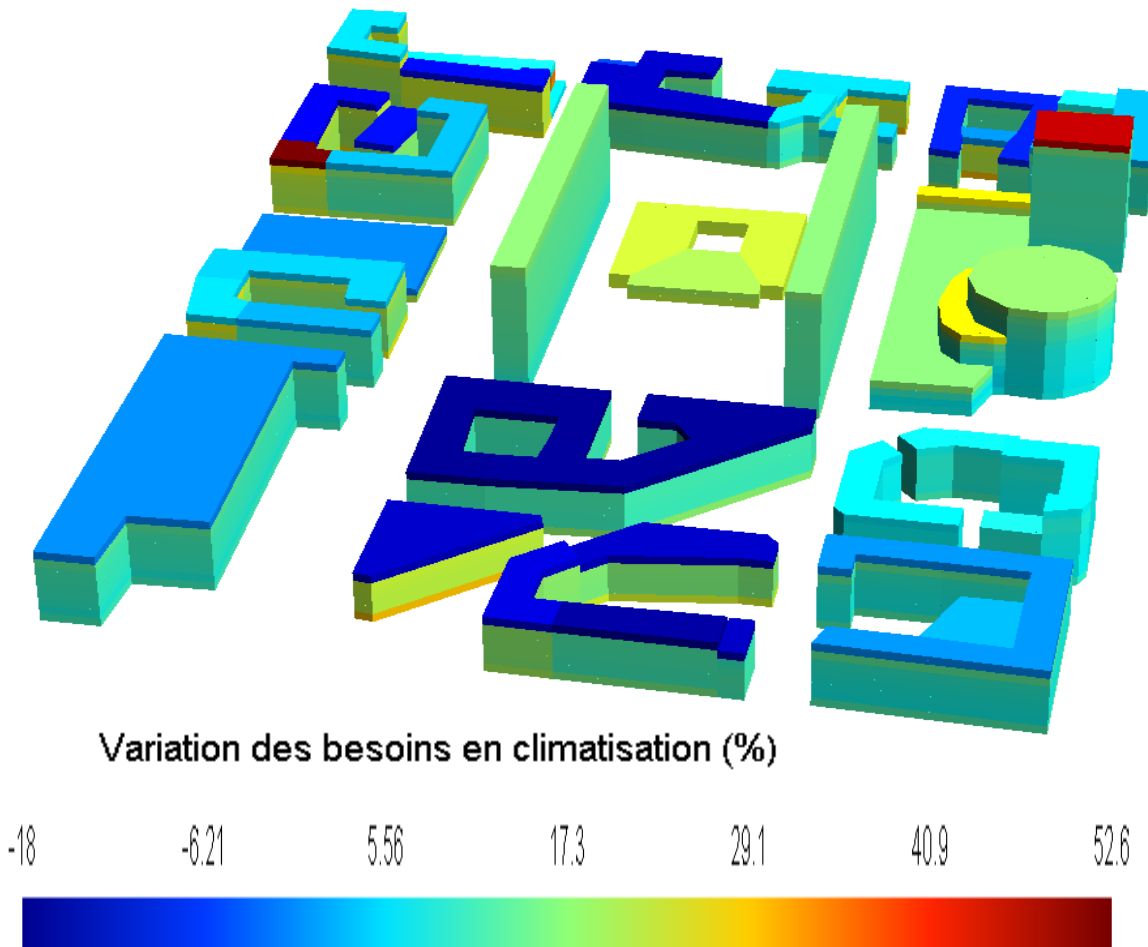
Isolation
élevée

- Derniers étages plus sensibles
- Besoins totaux du quartier: 20 988MWh/an
- Augmentation par rapport à référence 2013 : 18.18%

Variation des besoins en climatisation (%)

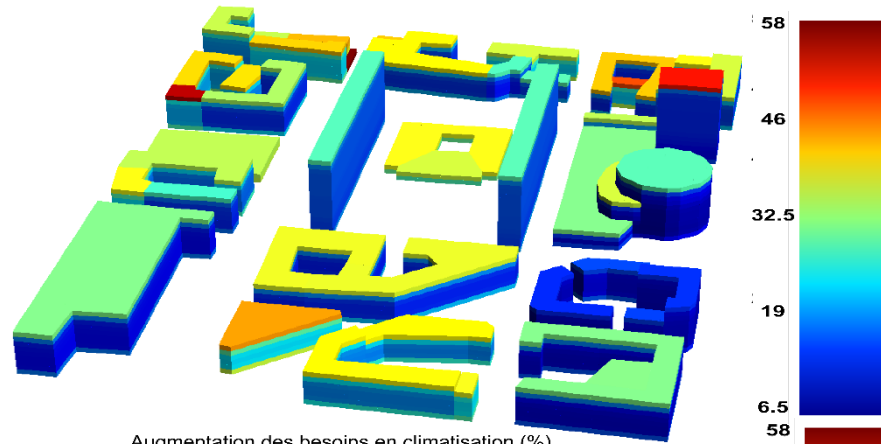
7.09 16 24.9 33.8 42.7 51.6 60.5

4.3 RÉSULTATS 2050 - SCÉNARIO OPTIMISÉ -



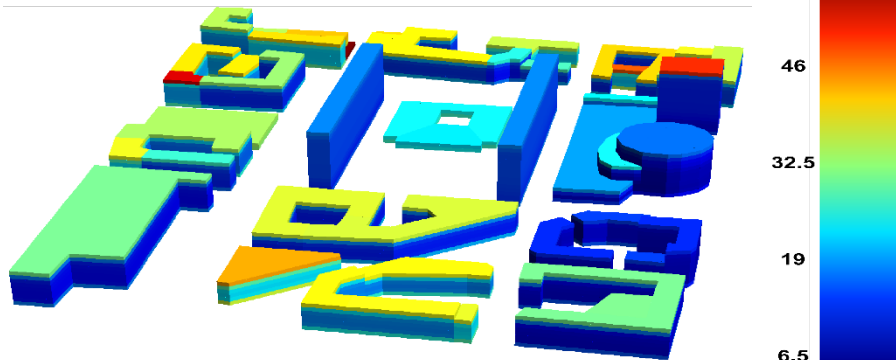
- Besoins en climatisation totaux du quartier: 19 862 MWh/an
- Augmentation par rapport à référence 2013 : 11.84%
- Valeurs négative

4. 4 RÉSULTATS 2050 - SCÉNARIOS MONODISPOSITIFS -



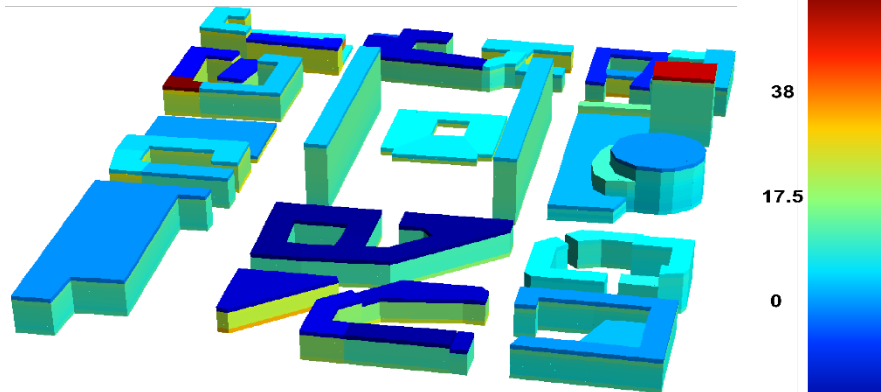
Augmentation des besoins en climatisation (%)

Eau
Augmentation par rapport à
référence 2013 : 17.8%



Augmentation des besoins en climatisation (%)

Végétation
Augmentation par rapport à référence
2013 : 17.1%



Augmentation des besoins en climatisation (%)

Albédo
Augmentation par rapport à référence
2013 : 11.4%



5. SYNTHÈSE

DES RÉSULTATS CONSENSUELS SUR LES TROIS QUARTIERS

A l'échelle du quartier:

- ❖ **Changement d'albédo des façades et toits:** plus importante réduction des consommations énergétiques dans les bâtiments
- ❖ **Changement d'albédo des revêtements y compris des voiries:** empreinte maximale sur la ressource carbone
- ❖ **Végétalisation:** solution plus consommatrice en eau que l'humidification des chaussées
- ❖ **Végétalisation:** solution plus favorable à l'expression de la biodiversité sur un quartier
- ❖ **Combinaison des trois solutions de rafraîchissement:**
 - ✓ Meilleures performances environnementales (énergie et biodiversité),
 - ✓ Impact négatif maximal sur l'empreinte carbone et sur la ressource en eau.
 - ✓ Coût global maximal pouvant représenter de **2 à 10 fois** le coût global lié à la mise en place d'une solution de rafraîchissement unique.

Localement

Quelque soit la morphologie urbaine du quartier, l'humidification des chaussées garantie un abaissement des valeurs d'UTCI et de la température moyenne de l'air ambiant sur la période journalière comprise entre 9h et 16h.

LES SPÉCIFICITÉS LIÉES AUX AMÉNAGEMENTS

A l'échelle du quartier:

- ❖ Le type de solutions de végétalisation proposées impactent différemment le coût global et l'empreinte carbone: **l'implantation et l'entretien de toitures végétalisées est moins avantageux que la végétalisation d'espaces au sol.**
- ❖ Les résultats de l'étude permettent de venir corroborer le fait que: les espaces végétalisés au sol ont des besoins en eau plus importants lorsque ces lieux sont fortement exposés aux rayons du soleil et exposés au vent

Localement

- ❖ La végétalisation des toitures et l'ombrage des arbres permettent d'abaisser localement, au niveau de certains étages, les consommations énergétiques dans le bâtiment.
- ❖ Le changement d'albédo des toitures reste plus intéressant que leur végétalisation pour la réduction des consommations énergétiques
- ❖ L'humidification de la chaussée reste une solution favorable à l'amélioration du confort thermique dans les espaces extérieurs tandis que la végétalisation peut entraîner des modifications locales de courant de vent entraînant une diminution du confort.

DES PROPOSITIONS D'AMÉNAGEMENTS, FONCTION DU QUARTIER

SUR DES QUARTIERS NEUFS COMPRENANT DES LOGEMENTS: mise en place de toitures à fort albédo combinée à la plantation d'une strate herbacée et arbustive au niveau des voiries:

- Optimisation de la réduction de consommations énergétiques dans les bâtiments
- Amélioration du confort extérieur dans les espaces publics du quartier
- Limitation des coûts
- Optimisation de la consommation en eau
- Etablissement de continuités écologiques à l'échelle du quartier

SUR DES QUARTIERS EXISTANTS COMPRENANT UNE IMPORTANTE DENSITÉ D'ESPACES PUBLICS : mise en place de voiries humidifiées couplée à une végétalisation des places, lieux de centralité du quartier:

- Gain en confort thermique dans les espaces extérieurs optimisés
- Création de lieux de vie à l'échelle du quartier
- Renforcement des noyaux de biodiversité
- Empreinte carbone réduite

7.5. Conclusion et réponses aux questions



Projet **EVA** (*Eau, Végétation, Albédo*)

Evaluation quantitative de l'impact sur le microclimat, les consommations énergétiques des bâtiments et le confort intérieur et extérieur de trois principes de rafraîchissement urbain. Application au quartier de la Part-Dieu à Lyon

Conclusions

Marjorie MUSY et Philippe MAILLARD

Pour L'IRSTV

Des avancées sur le modèle de sol de SOLENE-microclimat et la prise d'un apport d'eau et de l'évaporation

Des avancées sur EnviBatE avec la prise en compte de la végétation et des flux latents.

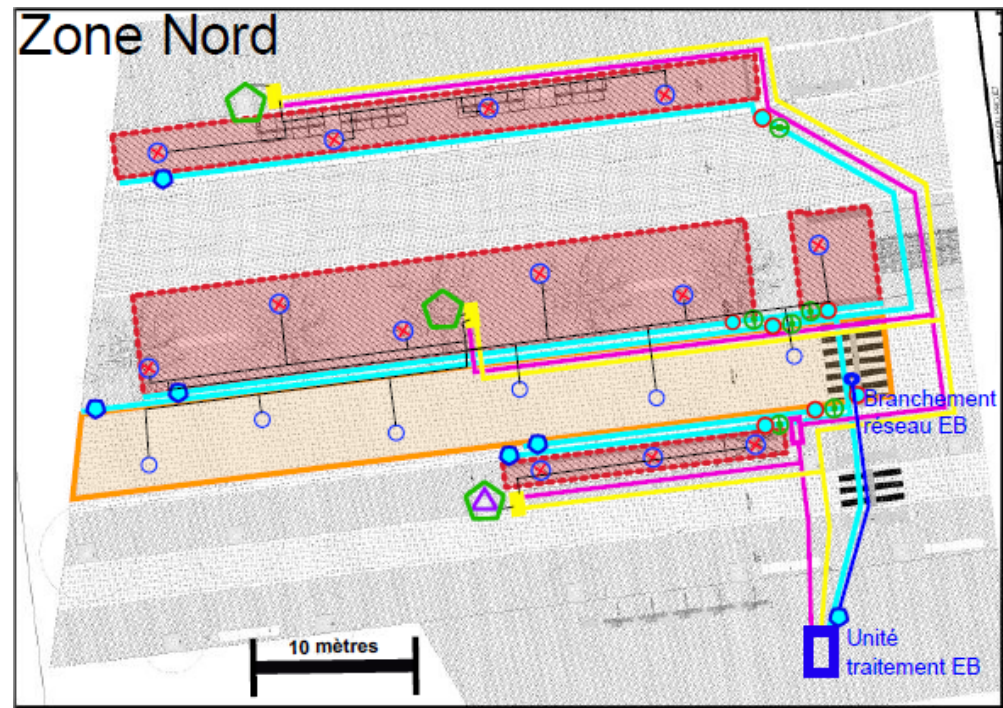
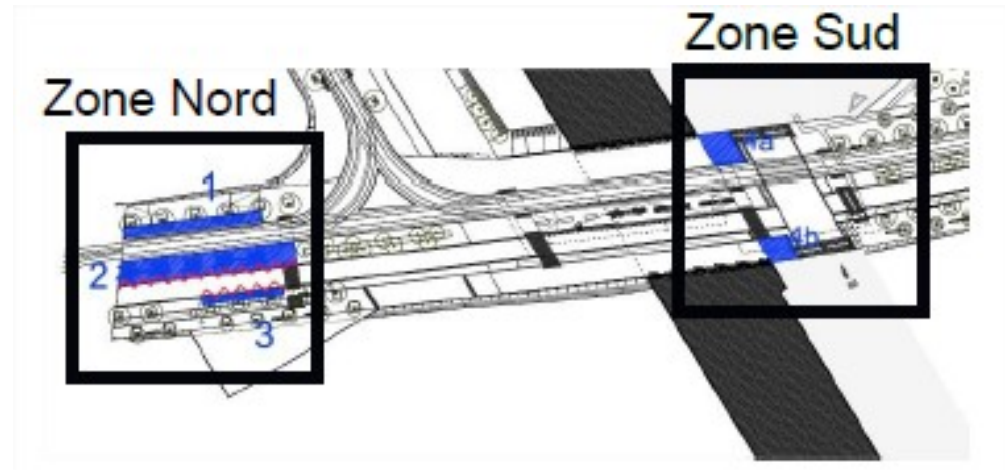
Des connaissances sur les combinaisons des effets des dispositifs

Des applications à des quartiers nouveaux, avec l'intégration des résultats de simulation dans des approches globales d'évaluation

Des projections de changement climatique

Pour VEOLIA

Une meilleure connaissance des solutions d'humidification, désormais mises en œuvre dans des projets réels



Pour VEOLIA

Méthodologie de conception bioclimatique d'un projet urbain :

- ✓ valorisation d'outils de modélisation complexes issus de la recherche vers le domaine de l'aménagement
- ✓ comparaison multicritères de scénarios d'aménagement



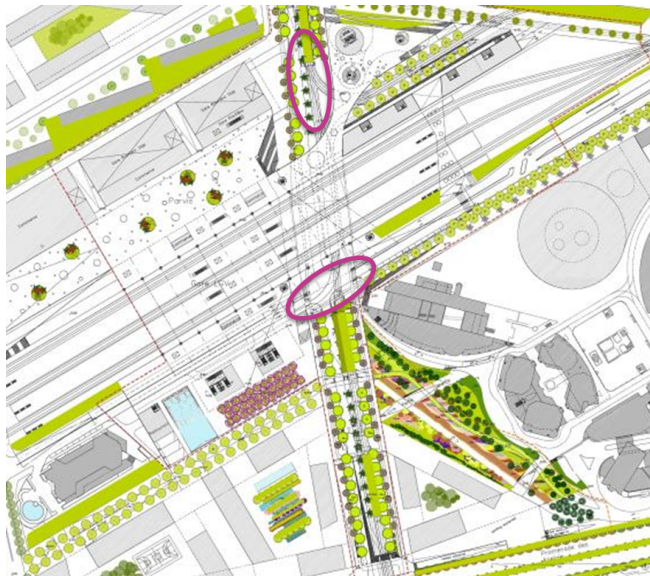
Outil d'aide à la décision destiné aux collectivités et aménageurs



Démarche duplicable à d'autres projets

Pour VEOLIA

Ce mode de conception bioclimatique des projets urbains devrait se généraliser



Questions ?



Sigles et acronymes

ADEME Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr

ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is a public agency under the joint authority of the Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy, and the Ministry for Higher Education and Research. The agency is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development.

ADEME provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work the agency helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

www.ademe.fr.



www.ademe.fr

ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01