



HAL
open science

Ilots de chaleur urbains et stratégies d'atténuation - Du quartier au bâtiment.

Emmanuel Bozonnet

► **To cite this version:**

Emmanuel Bozonnet. Ilots de chaleur urbains et stratégies d'atténuation - Du quartier au bâtiment.. Génie civil. Université de la Rochelle, 2016. tel-01704856

HAL Id: tel-01704856

<https://hal.science/tel-01704856>

Submitted on 8 Feb 2018

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.

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Spécialité : génie civil

Présentée à l'Université de la Rochelle par

Emmanuel Bozonnet

ILOTS DE CHALEUR URBAINS ET STRATÉGIES D'ATTÉNUATION

—

DU QUARTIER AU BÂTIMENT

Soutenue le 7 décembre 2016

Jury

Darren ROBINSON	Professeur, Université de Nottingham	Rapporteur
Christophe MENEZO	Professeur, LOCIE, Polytech'Annecy-Chambéry	Rapporteur
Youssef DIAB	Professeur, Université Paris-Est Marne-La-Vallée	Rapporteur
Thierry DUFORESTEL	Directeur HDR 4EVLab, EDF	Examineur
Francis ALLARD	Professeur, Université de la Rochelle	Examineur
Christian INARD	Professeur, Université de la Rochelle	Examineur
Hubert DESPRETZ	Ingénieur ADEME	Examineur
Julien HANS	Directeur adjoint de la Recherche, CSTB	Examineur

REMERCIEMENTS

Je remercie tout particulièrement mes rapporteurs Darren Robinson, Christophe Ménézo et Youssef Diab pour leur relecture et leur rapport détaillés. Je les remercie aussi avec les autres membres de mon jury Thierry Duforestel, Hubert Despretz, Julien Hans, Francis Allard et Christian Inard pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail et de leurs questions et commentaires précis qui m'ont apporté de nouvelles mises en perspective de notre domaine et qui ont souligné l'importance de certains points.

Les travaux de recherche présentés ici ont été menés et développés à l'Université de la Rochelle au Laboratoire des Sciences de l'ingénieur pour l'Environnement. Je tiens en particulier à remercier Francis Allard pour la dynamique qu'il nous a apportée dans l'équipe de recherche sur la maîtrise de la qualité des ambiances habitables. Avec Christian Inard, j'ai bénéficié de leur soutien pour développer mon domaine de recherche sur l'interaction des microclimats urbains et me permettre de participer à de nombreuses collaborations ; et aussi de leurs encouragements pour la rédaction de ce manuscrit. Je remercie spécialement pour leurs conseils et leur soutien (notamment dans les projets en commun) mes collègues dont Patrick Salagnac, Marc Abadie, Rafik Belarbi, Olivier Martin et Jérôme Le Dréau. Ces travaux n'ont été possibles que grâce aux développements expérimentaux et numériques importants de ces doctorants avec qui j'ai eu aussi plaisir à travailler pendant et au-delà de la thèse : Maxime Doya, Adrien Gros, Rabah Djedjig et Remon Lapisa. La dynamique des projets menés et l'initiative de nouvelles pistes de recherches se sont également maintenues grâce aux travaux menés dans le cadre de stages de master et de post-doctorants que je remercie : Boris Brangeon, Alexandra Tallet, Manon Rendu, Madi Kaboré, Abdelkrim Trabelsi, Lilian Clerjaud, Timea Denes Béjat, Agota Szucs, Katia Abadie Cordeiro, Alain Sempey. Il faut aussi ajouter toute la très sympathique équipe Tipee et nos projets communs avec en particulier Maxime Doya, Cécile Jolas, Adrien Dhalluin et Florian Battezzati.

Ces travaux n'ont pu être développés aussi que grâce aux nombreux échanges et discussions riches dans des projets et des collaborations amicales avec notamment l'IRSTV, le CSTB, EDF, SOPREMA, PROGEMI et d'autres organismes. Sans être exhaustif sur tous les collègues avec qui j'ai pu travailler et développer cette recherche, je peux citer dans le désordre : Rémi Perrin, Marjorie Musy, Fabrice Rodriguez, Isabelle Calmet, Katia Chancibault, Hashem Akbari, Denia Kolokotsa, Afroditi Synnefa, Robert Montecot, Mat Santamouris, Michele Zinzi, Etienne Wurtz, Mathieu Schumann, Patrick Corrales et tous les autres collègues en France ou à l'étranger.

Table des matières

1	PRÉSENTATION DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE	7
1.1	ACTIVITÉS DE RECHERCHE DU MICROCLIMAT URBAIN AU BÂTIMENT	7
1.2	DÉVELOPPEMENT D'OUTILS SUPPORTS EXPÉRIMENTAUX ET NUMÉRIQUES.....	10
1.2.1	<i>Développement de plateformes de modélisation du bâtiment dans son environnement</i>	<i>10</i>
1.2.2	<i>Conception intégrée par des outils de calcul existants et développement de modèles spécifiques</i>	<i>12</i>
1.2.3	<i>Mesures in situ et développement d'outils expérimentaux</i>	<i>12</i>
1.3	EXTENSION DE L'ÉTUDE DU RAFRAICHISSEMENT DES BÂTIMENTS DANS LE CONTEXTE URBAIN DENSE	14
2	SOLLICITATIONS THERMIQUES DU BÂTIMENT ET ILOTS DE CHALEUR EN MILIEU URBAIN	15
2.1	CONCEPTION DES BÂTIMENTS POUR LA QUALITÉ THERMIQUE DES AMBIANCES HABITÉES ET DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN.....	16
2.1.1	<i>Qualité environnementale de l'espace bâti et milieu urbain.....</i>	<i>17</i>
2.1.2	<i>Des enveloppes de bâtiment pour le confort intérieur d'été et la performance énergétique.....</i>	<i>28</i>
2.1.3	<i>Le développement d'approches de conception intégrées.....</i>	<i>35</i>
2.2	INTERACTION DU BÂTIMENT AVEC LA RUE DE TYPE CANYON	37
2.2.1	<i>La rue canyon – un espace confiné et une échelle d'étude intermédiaire entre le bâtiment et le quartier ...</i>	<i>37</i>
2.2.2	<i>Modélisation de l'interaction rue canyon et bâtiments.....</i>	<i>39</i>
2.2.3	<i>Développement d'une plateforme expérimentale à échelle réduite – ClimaBat.....</i>	<i>47</i>
2.3	ILOTS DE CHALEUR ET BÂTIMENTS EN MILIEU URBAIN	56
2.3.1	<i>L'étude des îlots de chaleur à différentes échelles</i>	<i>56</i>
2.3.2	<i>Développement d'une approche intégrant l'environnement urbain dans la conception de l'enveloppe du bâtiment performante énergétiquement – EnviBatE.....</i>	<i>66</i>
3	DISPOSITIFS DE RAFRAICHISSEMENT PASSIF DES BÂTIMENTS ET DES ILOTS URBAINS – TRAITEMENT DES ENVELOPPES.....	73
3.1	TRAITEMENT RADIATIF DES TOITURES ET FAÇADES.....	75
3.1.1	<i>Performance énergétique d'été et rafraichissement passif des bâtiments par traitement radiatif des toitures 77</i>	
3.1.2	<i>Façades froides, des effets à l'échelle de la rue.....</i>	<i>82</i>
3.1.3	<i>Études à l'échelle du quartier</i>	<i>83</i>
3.2	VÉGÉTALISATION DES SURFACES URBAINES.....	86
3.2.1	<i>Composant d'enveloppe végétale dans la simulation thermique dynamique du bâtiment</i>	<i>86</i>
3.2.2	<i>Végétalisation des façades et des toitures à l'échelle d'une rue canyon</i>	<i>89</i>
3.2.3	<i>Végétalisation à l'échelle du quartier</i>	<i>93</i>
4	DES PERSPECTIVES DE RECHERCHE EN DÉVELOPPEMENT ET À VENIR	97
4.1	DE NOUVEAUX DISPOSITIFS DE RAFRAICHISSEMENT ET DE TRAITEMENT DES SURFACES URBAINES À INTÉGRER	97
4.1.1	<i>Des perspectives pour l'intégration de nouveaux traitements radiatifs.....</i>	<i>97</i>
4.1.2	<i>Des perspectives pour diverses techniques de rafraichissement par évaporation</i>	<i>101</i>
4.1.3	<i>Verrous et développements envisageables.....</i>	<i>101</i>
4.2	DES PERSPECTIVES D'EXTENSION DES PLATEFORMES DE SIMULATION	103

4.2.1	<i>Intégration des systèmes, des réseaux énergétiques du quartier et de son environnement</i>	103
4.2.2	<i>Vers la conception multicritère optimisée à l'échelle du quartier – nouvelles méthodologies et développement d'indicateurs agrégés</i>	103
BIBLIOGRAPHIE		107
ANNEXE A - CURRICULUM VITAE		115
A.1.	PARCOURS UNIVERSITAIRE ET PROFESSIONNEL	115
A.2.	PUBLICATIONS ET PRODUCTION SCIENTIFIQUE	115
A.2.1.	<i>Revue internationale à comité de lecture</i>	115
A.2.2.	<i>Chapitres d'ouvrages</i>	117
A.2.3.	<i>Autres revues de diffusion et vulgarisation scientifique</i>	117
A.2.4.	<i>Articles de conférences internationales à comités de lecture</i>	117
A.2.5.	<i>Articles de conférences nationales à comité de lecture</i>	120
A.2.6.	<i>Principaux Workshops et communications dans des conférences sans actes</i>	121
A.2.7.	<i>Conférences et cours invité</i>	122
A.3.	ENCADREMENT DOCTORAL ET SCIENTIFIQUE	122
A.3.1.	<i>Encadrements de thèses de doctorat</i>	122
A.3.2.	<i>Encadrements postdoctoral</i>	123
A.3.3.	<i>Encadrements de stages de master en recherche</i>	124
A.4.	DIFFUSION SCIENTIFIQUE	124
A.4.1.	<i>Expertises pour des instances nationales et étrangères</i>	124
A.4.2.	<i>Participation à des comités de normalisation</i>	125
A.4.3.	<i>Collaborations internationales pour des actions labellisées</i>	125
A.5.	RESPONSABILITÉS SCIENTIFIQUES	125
A.5.1.	<i>Contrats européens</i>	125
A.5.2.	<i>Contrats nationaux</i>	126
A.5.3.	<i>Contrats régionaux et autres</i>	127
A.5.4.	<i>Responsabilités de réseaux thématiques ou de fédérations</i>	129
A.5.5.	<i>Organisations de congrès nationaux / internationaux</i>	129
A.5.6.	<i>Responsabilités dans des sociétés savantes</i>	129
A.6.	ACTIVITÉS PÉDAGOGIQUES	129
A.6.1.	<i>Responsabilités liées à l'enseignement</i>	130
A.6.2.	<i>Charge d'enseignement</i>	130
ANNEXE B - REPRODUCTION D'ARTICLES		131

1 PRÉSENTATION DES ACTIVITÉS DE RECHERCHE

De formation génie civil à l'école normale supérieure de Cachan et agrégé de génie civil en 2000, option B énergétique du bâtiment, mes travaux de recherche ont débuté dès 2000 lors de mon DEA (2000-2001, Figure 1) puis de ma thèse en génie civil à l'université de la Rochelle intitulée « Impacts des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments – cas de la rue canyon », soutenue en juin 2005.

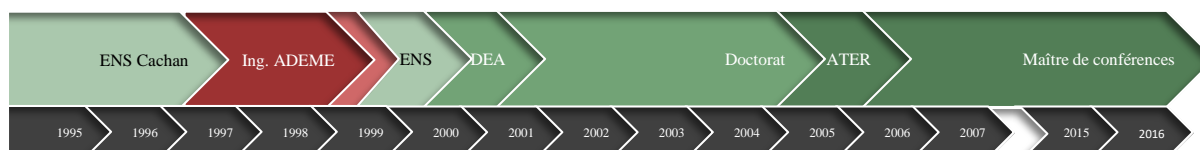


Figure 1 - aperçu du parcours de formation et principales expériences professionnelles

Attaché temporaire de recherche, puis maître de conférences à l'université de la Rochelle en septembre 2006, j'ai été amené à mener des activités de recherche décrites dans cette partie sur la thermique du bâtiment et son interaction avec l'environnement urbain. Parti du développement de modèles et d'outils de simulation, j'ai été amené par la suite à mettre en place des plateformes expérimentales pour la caractérisation et le développement de stratégies de rafraîchissement passif tant intérieures qu'extérieures, par le biais du traitement des enveloppes extérieures de bâtiment. Ces développements numériques et expérimentaux ont fait aussi l'objet des différents projets de recherche présentés ici menés en collaboration avec l'équipe d'étude des ambiances habitable du laboratoire et les doctorants et post-doctorants que j'ai eu à encadrer. L'ensemble des références aux projets et actions de recherche exposées dans cette partie sont référencés dans l'annexe A.

1.1 Activités de recherche du microclimat urbain au bâtiment

Le développement de mes projets de recherche s'inscrit dans un contexte de recherche sur l'impact environnemental et la performance énergétique des bâtiments, qui se traduisent dans les réglementations de la construction mais aussi dans les appels à projets publics ou les collaborations privées. L'évolution réglementaire et la recherche de performance, vers le bâtiment zéro-énergie à l'horizon 2020 ("EPBD Recast Directive 2010/31/EU," 2010), nous oriente vers l'étude de systèmes de conditionnement plus performants, mais également à une meilleure intégration au bâti. L'amélioration de la performance globale fait apparaître de nouveaux défis qui concernent le stress thermique d'été et parfois des critères de choix contradictoires avec les objectifs de performance d'hiver. La Directive européenne sur la Performance Énergétique des Bâtiments EPBD

(2010) insiste également sur les objectifs de rafraîchissement passif qui passent par une bonne compréhension des phénomènes de transfert et d'inertie de l'enveloppe. Le développement de cette conception dite bioclimatique reste très largement centré sur le bâtiment et les systèmes pris isolément. Pourtant, la conception des bâtiments était traditionnellement intégrée au climat et à la ville dans la construction vernaculaire ; mais elle s'est transformée à l'époque contemporaine au profit de conceptions architecturales détachées du contexte environnemental. La prise en compte de l'effet du bâti sur son environnement, en particulier sur le réchauffement climatique global, s'accompagne aussi d'une prise de conscience de la nécessité d'une meilleure prise en compte des effets rétroactifs et de son intégration à l'environnement urbain pour la majorité des populations. Mon domaine d'étude en énergétique du bâtiment et équipements techniques s'est donc étendu aux interactions avec l'environnement urbain, thématique que l'on retrouve dans les programmes de recherche et les collaborations institutionnelles ou industrielles. Le développement de ces projets de recherche a accompagné les programmes de développements cadres et anticipé les objectifs de développement dans le domaine de l'énergétique et de l'environnement tels que représentés à la Figure 2. Mes principaux projets de recherche s'inscrivent dans cette évolution de l'échelle européenne, aux programmes nationaux de recherche « Villes et Bâtiments Durables » de l'ANR et de l'ADEME, et aux acteurs industriels de la construction et de l'énergie.

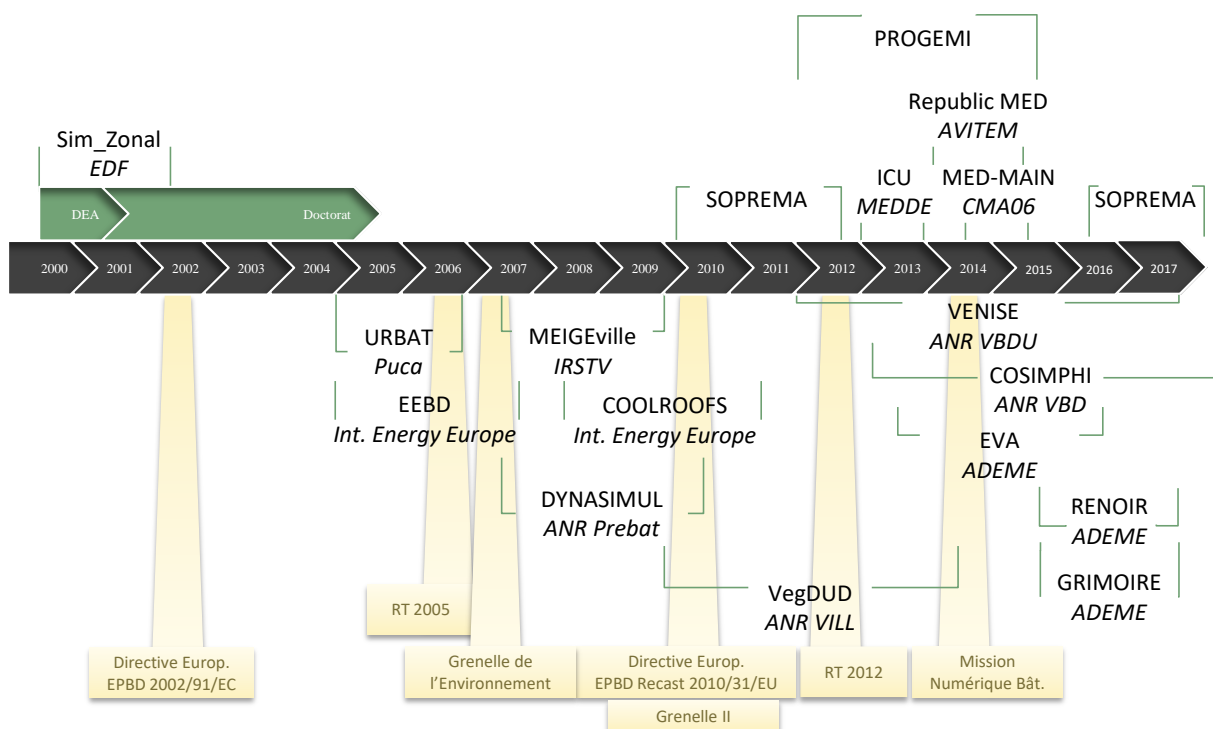


Figure 2 – chronogramme des principaux projets de recherche publics, industriels et autres

Mes participations à des collaborations industrielles et institutionnelles, dont les principales sont représentées ici en partie supérieure de la Figure 2, m'ont permis d'établir des liens sur des problématiques de recherche posées concrètement sur plusieurs années et un transfert des développements vers des outils ou méthodes opérationnels. Une part importante de ces travaux s'est concrétisée par le codage des modèles développés au laboratoire sous forme d'outils de simulation, avec des partenaires tels qu'EDF pour le développement de modèles zonaux dès le début de mes travaux de recherche, jusqu'à plus récemment SOPREMA pour l'étude et la valorisation du composant toiture-terrasse, ou PROGEMI pour le développement d'outils de simulation interopérables. Au-delà de ces partenariats directs, concrétisés sous forme de contrats, je participe aussi à des collaborations dans des réponses à des appels à projets collaboratifs, type ANR, et à des échanges non contractuels dans des réseaux ou actions communes, comme par exemple dans le cadre du comité européen CoolRoofs ou de séminaires en partenariat. La publication et la diffusion des travaux de recherche effectués m'ont également amené à répondre à des sollicitations pour des contrats de valorisation et diffusion de la recherche, sur les outils et les résultats de nos recherches avec des partenaires publics ou privés (CTMNC, MEDDE, PPG, AVITEM, CMA06, ...). Les contrats publics, nationaux de type ANR ou européens (agence Intelligent Energy Europe), partie inférieure de la Figure 2, m'ont permis par ailleurs de développer des actions de recherche à moyen terme sur des objectifs définis en collaboration. Certains contrats, tels que URBAT, MEIGEVILLE, CoolRoofs, VegDUD, ont structuré et consolidé des partenariats de recherche sur la ville et le rafraîchissement passif. D'autres comme DYNASIMUL ou VENISE ont permis la même chose sur le développement des plateformes de modélisation pour le bâtiment.

Outre le suivi scientifique, ces contrats et collaborations m'ont amené à assurer aussi le suivi et l'encadrement de doctorants et post-doctorants (cf. Figure 3) qui ont permis de développer les compétences et les outils numériques et expérimentaux valorisés par la suite dans de nouveaux projets. J'ai ainsi été amené à codiriger 4 thèses de doctorat (Figure 3), soutenues avant 2016 (Djedjig, 2013; Doya, 2010; Gros, 2013; Lapisa, 2015), et à travailler avec 10 post-doctorants et de nombreux stagiaires de master. Au-delà des objectifs et des livrables propres à chaque projet, et aux travaux de diffusion scientifique, c'est avant tout le développement de nouveaux outils expérimentaux et de nouvelles méthodes de modélisation qui a motivé et permis l'enchaînement de ces projets.

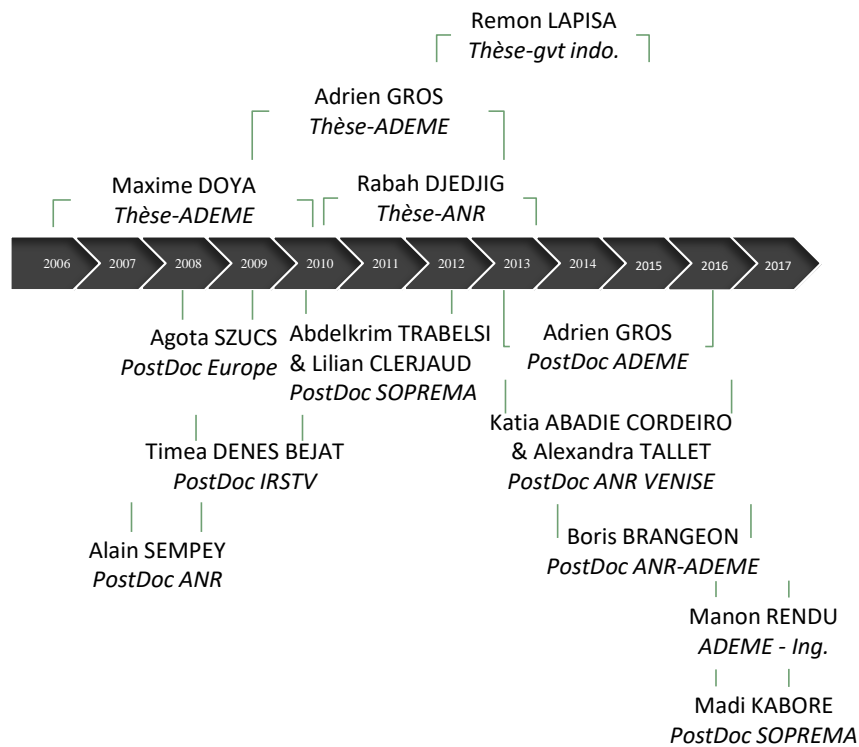


Figure 3 – codirections de thèses et suivis de post-doctorants

1.2 Développement d'outils supports expérimentaux et numériques

1.2.1 Développement de plateformes de modélisation du bâtiment dans son environnement

Les développements d'outils informatiques non disponibles dans les logiciels classiques pour un couplage thermoaéraulique complet par des approches zonales ont porté sur des échelles allant du simple local, à la rue canyon et enfin au quartier. L'échelle de temps simulée est typiquement de quelques mois à une année complète de simulation sur des pas de temps horaires compatibles avec les études demandées pour la performance énergétique des bâtiments ou le confort thermique des occupants. Dès le début de mes travaux de thèse, j'ai abordé le niveau de modélisation intermédiaire avec le développement de modèles zonaux automatisés (Inard et al., 1996; Wurtz et al., 2003) pour la description des ambiances intérieures dans Sim_Zonal (contrat EDF) et l'intégration de modèles empiriques de convecteurs, ventilo-convecteurs, jets, panaches thermiques, ... Ce niveau de modélisation intermédiaire entre l'approche fine de type CFD et l'approche nodale ou multizone plus courante en thermique du bâtiment a été développée et étendue ensuite dans mes différents travaux de modélisation :

- Développement d'un modèle thermoaéraulique zonal complet d'une rue de type canyon et de son interaction avec les bâtiments adjacents dans le cadre de mes travaux de thèse (Bozonnet, 2005), puis des travaux de doctorat de Doya (2010). Cet outil de calcul développé en C++ intègre l'ensemble des phénomènes de transfert intérieur et extérieur du

bâtiment à la rue. Il utilise pour les écoulements d'air un modèle zonal en pression complété par un modèle de vent empirique (Bozonnet et al., 2007), et pour les transferts thermiques, un modèle thermoradiatif de la rue pour lequel a été adaptée la méthode des enceintes fictives (Bozonnet et al., 2005).

- Développement du modèle EnviBatE sur la base d'une approche zonale pour un quartier quelconque (Gros et al., 2014), lors de la thèse de Gros. Ce couplage complet des phénomènes au-delà de l'échelle de la rue et avec l'ensemble des détails des bâtiments a été rendu possible d'une part grâce à la modularité permise par le langage Python pour l'intégration et le prototypage rapide de modèles spécifiques. D'autre part, EnviBatE fait appel à 2 modèles spécifiques pour les données d'entrée qui sont issues de Solene (Groleau et al., 2003), rayonnement solaire uniquement, et, pour les vents dominants, issues du code de calcul QuicUrb (Pardysjak and Brown, 2003) lui aussi de type zonal.

Ces outils ne disposent pas d'interface de saisie ou de post-traitement des résultats et sont globalement peu modulaires. Différentes plateformes de programmation ont permis de capitaliser et développer ces outils de calcul en C++ (difficiles à maintenir et peu modulaires) du local à la rue canyon, puis le langage Python a été utilisé pour les développements et la capitalisation de nouveaux outils de calcul (développements beaucoup plus rapides). Cependant, la maintenance dans le temps et la capitalisation de ces développements de plateformes complètes de simulation est complexe. De plus, la gestion des données, leur traitement et l'intégration de modèles développés sur d'autres outils de calcul demanderaient des ressources en développement trop importantes pour une intégration complète dans ces outils. Différentes stratégies de pérennisation et de développement ont donc été mises en place :

- Utilisation d'outils externes pour les calculs annexes (Solene, QuicUrb, etc...), le traitement des données en entrée et en sortie (bibliothèques Python numpy, scipy, etc...).
- Utilisation de serveurs de version mis en place à l'université pour capitaliser les développements réalisés sur chaque projet.

Au niveau des projets, la partie visible de ces développements, ce sont principalement les résultats des études paramétriques et les méthodologies employées qui sont les plus valorisées et capitalisées. On retrouve ainsi l'intérêt de tels outils de simulation « avancés » dans des projets de recherche (MEIGEVILLE, VegDUD, ...) mais également dans la diffusion et la valorisation des résultats (COOLROOFS, RepublicMED, ...).

1.2.2 Conception intégrée par des outils de calcul existants et développement de modèles spécifiques

Le couplage et l'intégration des modèles développés dans des outils existants de calcul permettent d'évaluer de nouvelles solutions techniques, de quantifier de nouveaux impacts, pour des dispositifs faisant intervenir des interactions complexes (enveloppe végétale, rue canyon, cool roofs, ...). L'intérêt de ces développements dans les projets de recherche proposés est double :

- L'utilisation possible de nombreux modèles interopérables déjà disponibles sur des plateformes de simulation modulaires telles que TRNSYS (projets SOPREMA, VegDUD, CoolRoofs), avec le développement de modèles spécifiques (VegDUD), ou plus récemment DYMOLA (langage Modelica, projet VENISE) avec la librairie open source de modèles Buildings et la librairie BuildSysPro développée par EDF.
- Le développement de méthodes de calcul automatisant les couplages logiciels pour la conception intégrée, l'analyse paramétrique et l'utilisation d'algorithmes d'optimisation, qui passe aussi par le développement de la standardisation des données et des échanges interlogiciels. Ce type d'approche développé dans les couplages thermoaérauliques, fait également l'objet d'un ensemble de nouveaux travaux avec la prise en compte du coût global et en intégrant les développements disponibles par ailleurs sur la maquette numérique (projets PROGEMI, COSIMPHI, ...).

Ces outils et méthodes forment des expérimentations numériques qui permettent d'une part d'analyser et de comprendre les processus ou les phénomènes physiques étudiés, et d'autre part de proposer des prototypes intégrables à moyen ou long terme dans les outils de conception des bureaux d'études, architectes, urbanistes, etc. Dans le cadre des projets de recherche, une forme de valorisation plus directe a été parfois proposée sous forme d'outil de calcul simplifié reprenant quelques points clés développés, tel que l'outil de calcul TRNSED (issu du modèle CONTAM+TRNSYS couplé) pour SOPREMA.

1.2.3 Mesures in situ et développement d'outils expérimentaux

Les projets que j'ai eu à traiter sur l'étude du traitement radiatif des enveloppes extérieures, puis de la végétalisation de façade, m'ont conduit à développer des expérimentations :

- **Des dispositifs de mesure des propriétés radiatives de courtes et grandes longueurs d'onde** en laboratoire et in situ ont été mis en place et développés. Un banc de mesure des propriétés radiatives in situ a été mis en place dans le cadre la thèse de Maxime Doya. Il a été complété et approfondi par la suite dans le cadre du projet COOLROOFS jusqu'au projet

Tipee et la mise en place de mesures de laboratoire d'émissométrie et de spectrophotométrie, validées par notre participation à des inter-comparaisons à l'échelle européenne (Synnefa et al., 2013).

- **Des mesures pour calibrer un modèle numérique, puis analyser des variantes** par modification des paramètres numériquement (expérimentation numérique) ont été menées. Dans le projet COOLROOFS (Bozonnet et al., 2011) des mesures in-situ d'un logement HLM non climatisé et modélisé sous TRNSYS nous ont permis de vérifier l'impact sur le confort et la consommation de climatisation de la mise en place d'une membrane de type cool roof. De même, des mesures in situ ont été mises en place sur le bâtiment SOPREMA (Bozonnet et al., 2012) de Poitiers dans le cadre de notre participation à la définition de la GTB avec un complément de suivi. Cette expérimentation fait partie des travaux du projet SOPREMA sur les bâtiments industriels et tertiaires et est exploitée à la fois pour l'analyse des modèles de bâtiment et l'étude des scénarii de fonctionnement de la ventilation (Lapisa, 2015).
- **Un modèle expérimental de rues de type canyon à échelle réduite ClimaBat** a été développé dans le cadre de la thèse de Doya et exploité dans le cadre des projets COOLROOFS et VegDUD (Djedjig et al., 2015a; Doya et al., 2012a). Ce dispositif de mesure a permis de retrouver les phénomènes d'interaction et de confinement thermoaéraulique du canyon urbain. Mais, au-delà il a permis de quantifier expérimentalement les interactions avec le bâtiment et de tester simultanément le potentiel direct et indirect de différentes stratégies de rafraîchissement telles que les façades cool (traitement radiatif de façade détaillé dans la suite du document) ou végétalisées et les toitures végétalisées.

Ces résultats expérimentaux ont permis d'analyser et de valider des approches de modélisation depuis l'échelle de la surface du matériau, du point de vue radiatif et des transferts couplés sensibles et latents (végétalisation), jusqu'à l'échelle de l'enveloppe bâtie et de son interaction avec le modèle de canyon urbain.

Au-delà de ces résultats expérimentaux directement exploités pour comprendre et quantifier les transferts, ils constituent de fait des bases de données qui doivent permettre de valider et de développer les outils numériques de modélisation. Cette étape dans la valorisation du travail expérimental demande un traitement a posteriori des mesures plus complet, et parfois délicat à gérer dans la chronologie d'un seul projet. Ainsi, dans le projet européen URBVENT (2001-2003) piloté par l'université de la Rochelle, ce sont des mesures in-situ dans des rues canyon réelles, menées par l'université d'Athènes, qui ont été exploitées pour comparer le développement des modèles (Bozonnet, 2005). Par la suite, la plateforme ClimaBat a été conçue de façon à valoriser très tôt les

résultats expérimentaux obtenus. Cette plateforme a également été conçue dans le but de valoriser les résultats pour la validation d'outils de simulation. Les nombreuses données collectées suite aux projets COOLROOFS et VegDUD, devraient encore pouvoir être exploitées pour la calibration ou la validation de modèles développés par ailleurs.

1.3 Extension de l'étude du rafraîchissement des bâtiments dans le contexte urbain dense

Dans la suite du document, la problématique de l'interaction des îlots de chaleur urbains avec le fonctionnement du bâtiment est décrite dans une première partie en remettant en perspective nos développements vis-à-vis de l'état de l'art du phénomène d'îlot de chaleur. Ce domaine d'étude est abordé ici à plusieurs échelles intermédiaires ; à savoir entre les niveaux d'études classiquement considérés en thermique du bâtiment et ceux utilisés pour les études microclimatiques qui considèrent chacun des conditions aux limites très simplifiées sans véritable interaction entre eux. Les échelles considérées ici en terme d'échelle temporelle (d'une saison à une année complète) et spatiale (du bâtiment, au canyon urbain ou au quartier) sont adaptées à l'évaluation des performances énergétiques ou du confort thermique des bâtiments et de la formation locale d'îlot de chaleur ; elles intègrent systématiquement une description suffisamment fine du bâti. Selon cette même variation dans les échelles, nous avons alors focalisé nos études sur les possibilités de rafraîchissement par le traitement des surfaces urbaines, présentées dans une deuxième partie, en considérant l'échelle du composant d'enveloppe à celle du quartier. Le développement d'outils et les principaux résultats publiés sont aussi progressivement diffusés pour des prestations sur des cas d'étude réels et dans des cours d'école doctorale ou de master, l'ensemble des références de publications et d'activités de diffusion scientifique étant récapitulé en annexe de ce document.

2 SOLLICITATIONS THERMIQUES DU BÂTIMENT ET ILOTS DE CHALEUR EN MILIEU URBAIN

Depuis les 1ères études d'Howard sur le microclimat urbain (Howard, 1818) jusqu'aux études plus récentes sur les performances énergétiques des bâtiments en ville (Santamouris et al., 2001), il apparaît que les bâtiments (leur usage et leur architecture) ont une interaction forte avec ce microclimat urbain, en particulier en saison chaude et en zone urbaine dense. Cette problématique environnementale est avant tout ressentie par les citoyens et dans les espaces intérieurs confinés. Le comportement dynamique du bâtiment et l'interaction de son enveloppe avec l'environnement extérieur est abordé dans cette partie, avec les effets du et sur le microclimat urbain. Les interactions sont étudiées à l'échelle du bâtiment et de la rue, jusqu'au quartier, en intégrant les vents dominants et le rayonnement solaire. Le fonctionnement du couplage de l'ensemble système bâti/environnement urbain est ensuite analysé.

2.1 Conception des bâtiments pour la qualité thermique des ambiances habitées et de l'environnement urbain

L'accroissement de la population mondiale s'accompagne de l'augmentation rapide du nombre de mégapoles et par conséquent, le taux de la population urbaine a dépassé celui de la population rurale au tout début du XXI^{ème} siècle (Figure 4).

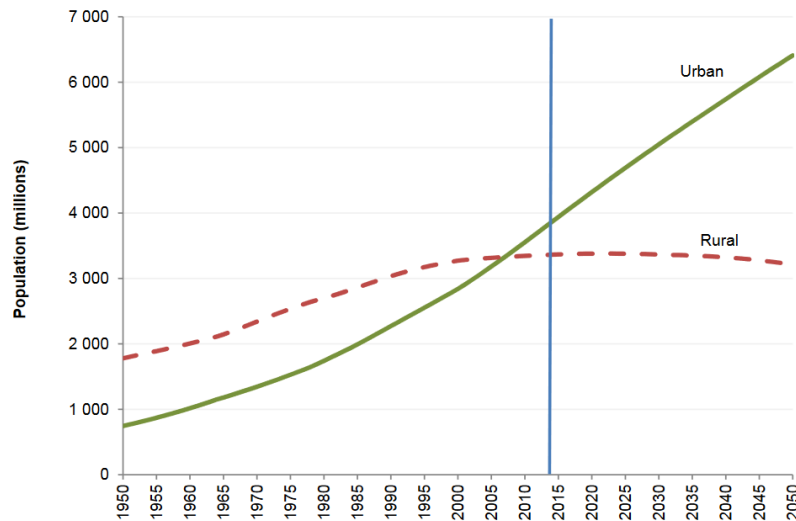


Figure 4 – accroissement la part de population urbaine à l'échelle du globe, d'après (United Nations, 2015)

Cette urbanisation s'accompagnant d'une densification des constructions complexifie l'approche de conception en thermique des bâtiments comme la souligné très tôt Clarke (1972) : « *The urban thermal anomaly can be expected to increase if man continues to expand his cities into giant metropolitan regions. Because of the increasing use of airconditioning, the portion of the population of cities necessarily exposed to thermal stresses will decrease. The heat and moisture removed from the buildings, however, will be dumped into the urban atmosphere and further increase the thermal anomaly of the city. This will also increase thermal stresses on the inhabitants of the central city not fortunate enough to have airconditioning.* »

Au-delà des questions de confort (Clarke and Bach, 1971), le phénomène d'îlot de chaleur en ville accentue les problématiques sanitaires (Buechley et al., 1972; Clarke, 1972; Vaneckova et al., 2010) comme lors de la canicule¹ de l'été 2003 qui a entraîné un surcroît de mortalité estimé à 70 000 morts en Europe dont 20 000 en France (+60% entre le 1^{er} et le 20 août 2003), et dans les grandes villes (Laaidi et al., 2012; Wright et al., 2005). Alors que le GIEC a annoncé en 2007 un réchauffement global de 1,1 à 6,4°C pour la fin du XXI^e siècle, il est impératif de mieux connaître

¹ « La canicule se définit comme un niveau de très fortes chaleurs le jour et la nuit pendant au moins trois jours consécutifs », d'après <http://www.risques.gouv.fr/risques-naturels/canicule>. Les seuils de température caniculaires sont définis en fonction des climats, par exemple par Météo-France et l'Institut de Veille Sanitaire en France.

et prévoir l'impact de l'urbanisation sur ce phénomène. Les enjeux de confort peuvent être aussi sanitaires pour les personnes sensibles à la chaleur. La connaissance et le développement de modèles physiques pour ces phénomènes est nécessaire pour permettre le développement de règles d'urbanisme et de construction. L'établissement de telles règles a fait l'objet d'une étude pour le compte du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie en 2013 (Dhalluin et al., 2013; Dhalluin and Bozonnet, 2014, 2015).

Cette partie aborde d'une part la qualité environnementale en site urbain du point de vue des îlots de chaleur et d'autre part la conception des enveloppes de bâtiment pour le confort thermique intérieur d'été.

2.1.1 Qualité environnementale de l'espace bâti et milieu urbain

La qualité des espaces extérieurs comme des ambiances habitées résulte d'interaction complexes en milieu urbain si on considère les différents modes de transferts tant thermiques, que de polluants ou acoustiques, et doit s'envisager du point de vue central de l'occupant (Bozonnet et al., 2006a, 2008).

Contexte sanitaire de l'environnement urbain

L'urbanisation est depuis longtemps critiquée pour son environnement dévalorisé (pollution, aspects visuels, ...), et plus récemment l'étalement urbain consommateur de surfaces naturelles et agricoles. La densification des constructions peut limiter ces impacts environnementaux négatifs, bien que cette solution nécessite de résoudre les problèmes qui se posent alors vis-à-vis de l'organisation sociale. C'est tout particulièrement la pollution urbaine et ses conséquences visibles sur la santé et la surmortalité qui a été identifiée et a interpellé les pouvoirs publics très tôt, comme ce fut le cas à Londres en 1273 où la combustion du charbon fut interdite (Landsberg, 1981). Avec des villes très industrialisées, l'Angleterre a été pionnière dans la législation sur la qualité de l'air extérieur. Cette pollution a été en partie associée à la formation de smog, mélange de brouillard et de fumée, que Howard a également répertorié dans sa classification des nuages (Howard, 1818). À partir des années 1950 les mesures et le suivi des accidents de pollution urbaine a mené de nombreuses villes européennes à légiférer, comme à Londres où, suite à un surplus de 4 000 morts en 5 jours en 1952 (Figure 5), ont été mises en place des restrictions pour limiter l'émission de fumées en ville (Clean Air Act, 1956).

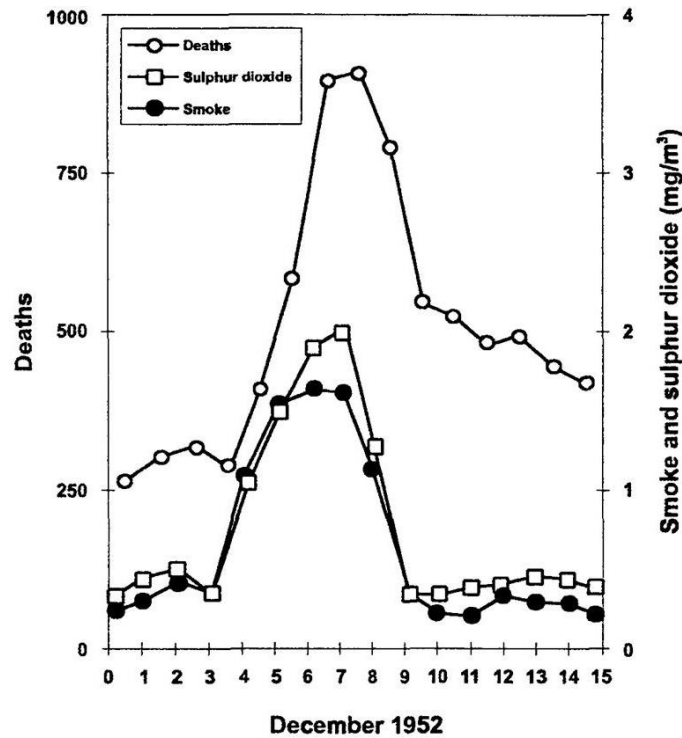


Figure 5 – pic de mortalité et smog à Londres en 1952, lié aux concentrations en dioxyde de soufre et en fumées, d'après Wilkins (1954)

Le pic de mortalité à Londres (Figure 5) est ici très visiblement corrélé avec le pic de dioxyde de soufre et de fumées reporté par Wilkins (1954). Il s'agit d'un smog hivernal produit par les fumées sombres et le dioxyde de soufre issus de l'industrie et du chauffage des bâtiments et concomitant avec le brouillard et les basses températures (Chandler, 1965; Haq, 2002). Il existe aussi un « smog d'été » créé par réaction photochimique entre les émissions de polluants de la circulation et le rayonnement solaire, effet amplifié par les pics de température en milieu urbain. Dans la ville d'Athènes, une surmortalité de 6 personnes par jour serait liée à ce smog (Haq, 2002). Cependant, il est nécessaire, en toute rigueur, de tenir compte de la sensibilité des personnes aux pics de chaleur simultanés.

Ces périodes de canicule, plus fréquentes dans les centres urbains, ont aussi des conséquences directes sur la santé, mais leurs effets ont été étudiés plus tardivement. Par exemple, aux vagues de chaleur observées en juillet 1955 à New-York correspondent des pics de mortalité avec ici un décalage de l'ordre d'une journée (Figure 35).

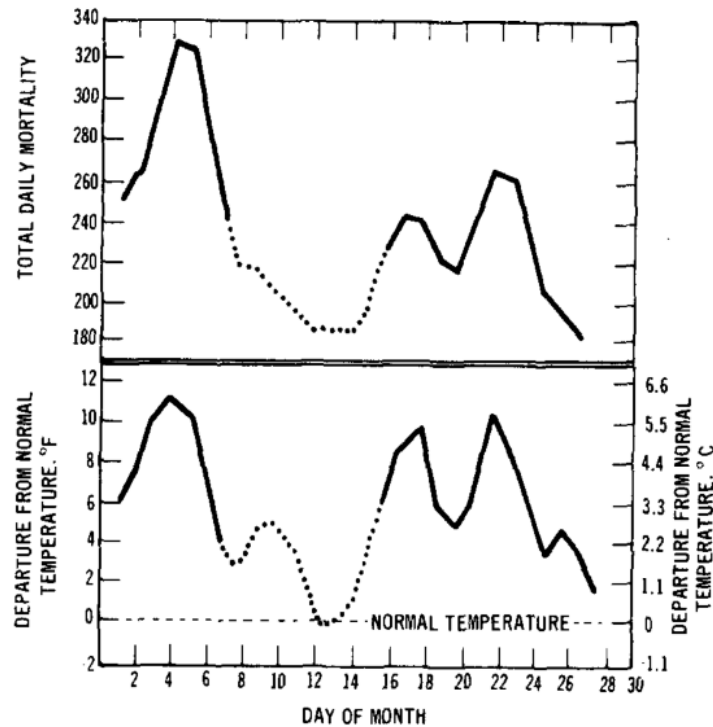


Figure 6 – moyenne glissante sur 3 jours de l'écart de température par rapport à la normale mesurée à New-York (Central Park, États-Unis) et moyenne glissante sur 3 jours de la mortalité pour la ville de New-York, juillet 1955, d'après Clarke (1972)

Cette corrélation entre surmortalité et périodes caniculaires en site urbain a également été observée par Buechley *et al.* (1972) qui ont mené des analyses sur des villes américaines. Lors de cette étude, les données collectées sur 5 ans pour la ville de New York ont montré que les vagues de chaleur comptaient pour 6% du taux de surmortalité et que 2% de ce taux pouvait être associés à l'îlot de chaleur urbain. Buechley *et al.* (1972) ont également montré que le taux de surmortalité s'accroissait de façon exponentielle avec la hausse des températures. Ainsi, pour un 4 juillet particulièrement chaud à New-York, ils ont relevé un surplus de 539 décès dont 178 attribuables à l'îlot de chaleur urbain.

Du point de vue énergétique et environnement urbain, des modèles d'évaluation sont nécessaires pour déterminer les impacts des choix de forme et d'usage des bâtiments ou de la morphologie urbaine. Les villes sont caractérisées par un microclimat spécifique dont la manifestation principale est le phénomène d'îlot de chaleur urbain qui se traduit par des températures plus élevées en ville que dans les alentours. La modification du climat urbain est liée à la forme urbaine, aux matériaux et aux charges anthropiques dissipées dans le tissu urbain. Les dissipations thermiques des bâtiments participent aussi à l'amplification du réchauffement urbain et les systèmes de climatisation peuvent représenter une part significative des charges anthropiques, d'autant plus que leur charge de climatisation augmente avec le réchauffement. Toutefois, la prise en compte des

conditions climatiques aux abords des bâtiments est souvent limitée aux seules données des stations météorologiques de référence pour le site de la construction, ou réglementaires, sans prise en compte du couplage entre le climat et le bâti.

Inconfort d'été dans les bâtiments et urbanisme pour la prise en compte des îlots de chaleur

La prévention des risques sanitaires en ville se retrouve dans de nombreux plans d'action comme en France le Plan National Canicule (PNC), le Plan National Santé Environnement (PNSE, PNSE2, PNSE3), et surtout le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC 2011-2015). En particulier, dans le PNACC, le renforcement de l'exigence de confort d'été dans les bâtiments est une mesure phare qui demande de faire évoluer le simple critère d'exigence réglementaire ("RT2012," 2010) et demande des avancées tant sur le bâti que sur une meilleure prise en compte de la hausse globale des températures et de l'effet d'îlot de chaleur urbain. Ces plans d'action nationaux sont déclinés dans les agglomérations au travers de différents outils de planification locaux (SRCAE², PCET³, SCOT⁴, PLU⁵, PLH⁶, PRSE⁷). Cette problématique devrait donc être intégrée depuis la planification à la construction des bâtiments en milieu urbain (Dhalluin et al., 2013) :

- Dès les phases amont des études préalables de la maîtrise d'ouvrage (programmation, implantation, etc.) et au travers des outils réglementaires (SCOT, PLU, etc.),
- Dans les travaux de maîtrise d'œuvre (de l'avant-projet jusqu'au projet détaillé) à encadrer en particulier par de nouvelles exigences normatives à développer (par exemple réglementation thermique, PLU ou DTU),
- Dans l'exploitation, le suivi, et la réhabilitation par les opérateurs publics ou privés qui peuvent être exigées par des cadres réglementaires sur la garantie de résultats (à la conception) mais également de par les plans locaux (plan canicule, qualité de l'air, etc.).

Notre analyse sur la prise en compte des îlots de chaleur par les décideurs et urbanistes a porté sur une dizaine de villes françaises (Dhalluin et al., 2013; Dhalluin and Bozonnet, 2014, 2015). Quelques études permettent d'estimer la part liée aux intensités des îlots de chaleur (Lambert-Habib et al., 2013; Schwarz and Seppelt, 2009) pour les villes qui nous concernent ici, avec de faibles (Marseille et Saint-Denis de la Réunion) et de fortes amplitudes d'îlot de chaleur (Paris, Lyon, Toulouse, Grenoble). Dans le cadre de cette étude, des entretiens personnalisés ont été me-

² Schéma Régional Climat Air Énergie

³ Plans Climat Énergie Territoriaux

⁴ Schéma de Cohérence Territoriale

⁵ Plan Local d'Urbanisme

⁶ Programme Local de l'Habitat

⁷ Plans Régionaux Santé Environnement

nés auprès de 75 acteurs clés liés à l'implantation de bâtiments pour personnes sensibles à la chaleur en milieu urbain : responsables de plans d'aménagement, élus locaux, architectes, bureaux d'études, urbanistes, etc. Ces acteurs clés ont des rôles à différentes étapes de la construction et vis-à-vis de notre problématique : depuis l'initiateur des travaux jusqu'à l'exploitant du bâtiment ou des systèmes de traitement des ambiances. Le résultat des entretiens à la Figure 7 montre une prise en compte encore trop faible de l'îlot de chaleur urbain et pourtant exigée par les plans cadres nationaux.

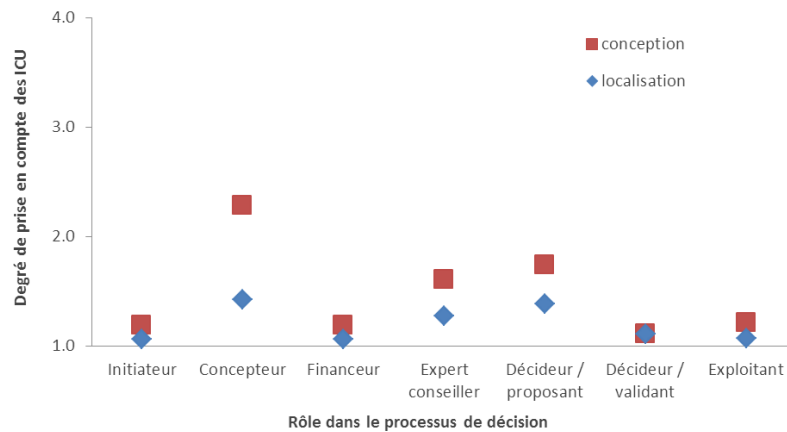


Figure 7 – degré de prise en compte des îlots de chaleur urbains (ICU) dans la conception et la localisation des bâtiments versus le rôle des acteurs dans le processus décisionnel (1 = aucune ; 2 = faible ; 3 = bonne ; 4 = très bonne)

Bien que les phases initiales de programmation et le choix de la localisation soient ici essentiels pour répondre efficacement à la problématique d'îlot de chaleur en été, elles sont systématiquement en retrait par rapport aux décisions relatives à la conception du bâti (Figure 7). C'est donc au niveau de la conception du bâtiment lui-même, et des acteurs clés ayant l'expertise technique, que se pose avant tout la prise de décisions qui pourront pallier l'inconfort d'été et les problèmes de l'environnement urbain. La localisation est beaucoup plus liée à d'autres contraintes comme la disponibilité foncière. Par contre, Il n'a été observé aucune corrélation entre les villes, ou leur climat, et ce niveau de prise en compte des îlots de chaleur, ou le niveau de connaissance des phénomènes. Face à l'inconfort d'été lié à l'environnement urbain, les solutions palliatives mises en avant sont principalement celles liées au bâti, avec 49% des propositions en moyenne, et une répartition similaire pour les différentes villes étudiées d'après la Figure 8. Les systèmes de traitement des ambiances viennent en dernier, avec 21% des suggestions, tandis que les solutions liées à l'environnement urbain, aux chaussées et au traitement des surfaces construites (toitures et façades) représentent un peu plus avec 35% en intégrant la végétalisation qui constitue 18% des propositions. La climatisation d'été est privilégiée dans les villes où le besoin est traditionnellement important (corrélation avec le nombre de degré-heures). Par contre, les solutions de rafraîchissement passif ou de végétalisation sont globalement répandues de façon homogène sans lien

apparent avec l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (regroupement des villes par intensité d'îlot de chaleur). On note cependant que parmi les techniques étudiées (Figure 8) dans le traitement des îlots de chaleur urbains, certaines émergent du fait d'expériences locales, comme l'humidification des chaussées à Lyon par exemple (Nicolas, 2013).

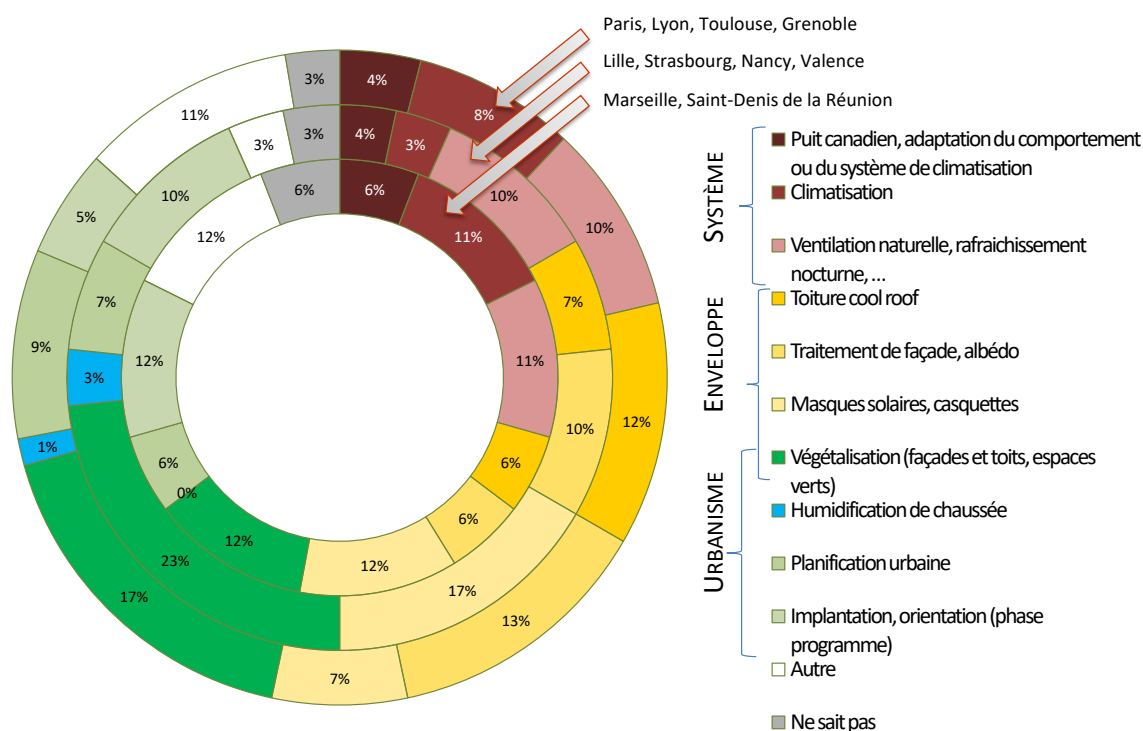


Figure 8 - Répartition des pratiques d'adaptation aux îlots de chaleur selon les agglomérations

On observe ainsi un réel besoin d'outils de conception des enveloppes des bâtiments et de rafraîchissement passif qui puissent intégrer l'effet du microclimat urbain. Il existe également une volonté politique de mieux anticiper et intégrer cette problématique dans les processus de décision d'urbanisme bien qu'il n'apparaisse actuellement aucune prise en considération précise de cette problématique. En effet, aucun cadre réglementaire précis n'est disponible et à terme le développement des outils de calcul et de la compréhension des interactions microclimat urbain bâtiment pourrait amener au développement d'indicateurs ou de méthodologies pour encadrer les processus de construction en milieu urbain et pour tenir compte des îlots de chaleur.

Des outils et des indicateurs d'évaluation de la qualité des ambiances thermiques du quartier

Dans la conception de nouveaux quartiers, la prise en compte de l'environnement urbain se met en pratique au travers de démarches dites d'écoquartiers. Différents critères de développement

durable peuvent être avancés dans ces démarches qui se retrouvent en France dans les lois Grenelles ("Le Grenelle Environnement," 2007) et dans la création d'un référentiel spécifique pour un label écoquartier. Ce type d'approche porte actuellement principalement sur des critères énergétiques et nécessite des outils et des méthodologies d'évaluation pour le calcul de l'efficacité énergétique des bâtiments dans leur ensemble mais également des conditions de confort thermique à l'intérieur comme à l'extérieur. Les outils de simulation développés à l'échelle du bâtiment et ses interactions avec l'environnement extérieur ont donc un intérêt ici, comme l'ont montré nos différentes études (Bozonnet et al., 2015; Doya et al., 2014a, 2014b; Gros et al., 2016a; Musy et al., 2011), pour évaluer les champs de vitesse et de température de l'environnement, l'ensoleillement et l'accès à l'éclairage naturel, la demande énergétique et les conditions intérieures en période d'été, l'effet des solutions de rafraîchissement et de l'isolation thermique, etc. Pour chaque outil, les temps caractéristiques et les échelles spatiales sont variables en fonction du niveau de détail de l'étude comme représenté sur la Figure 9.

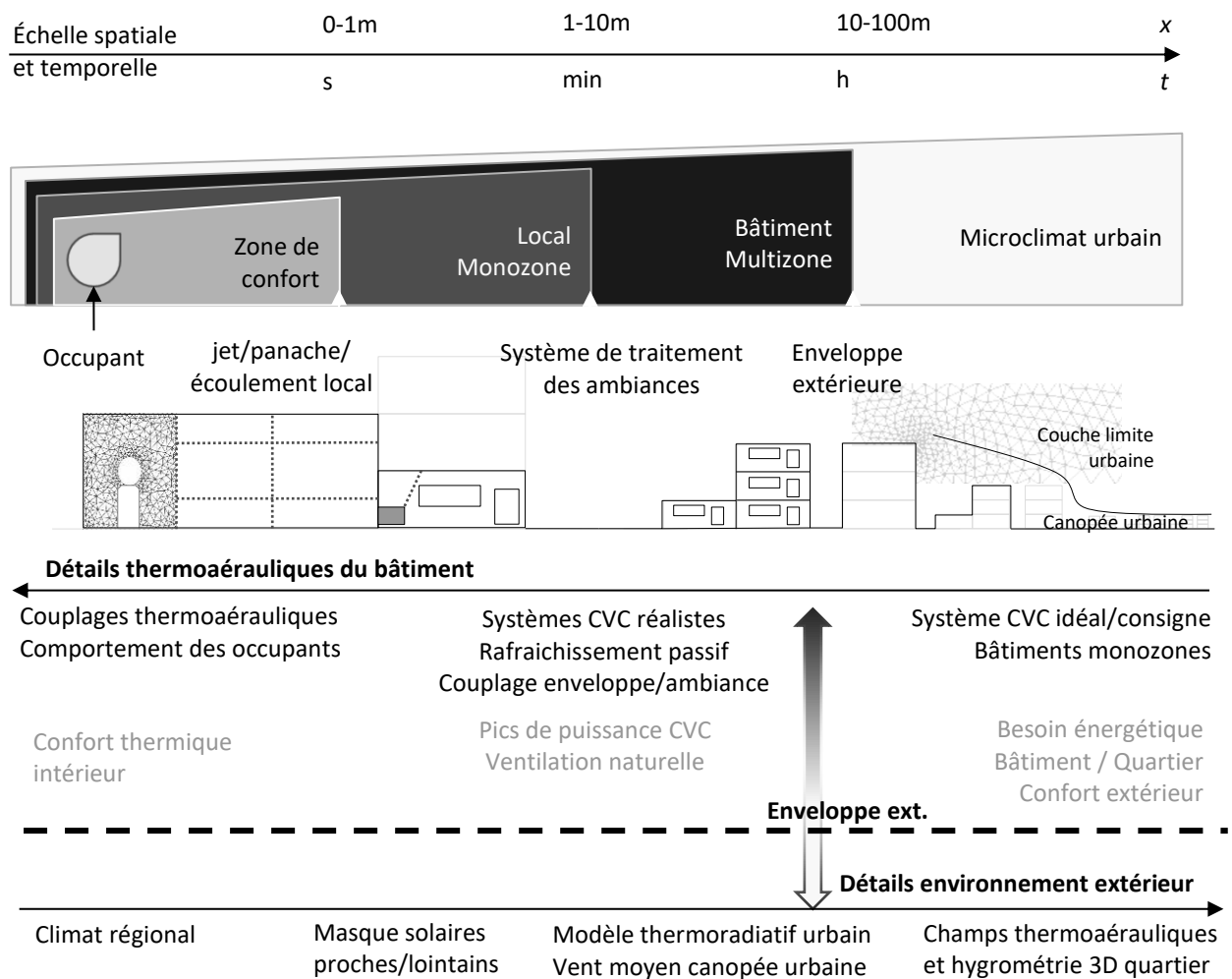


Figure 9 - différentes échelles de simulation du bâtiment et de son environnement proche pour différents indicateurs et objectifs de calcul

Les outils à l'échelle du bâtiment permettent de définir en première approche les besoins énergétiques du bâtiment, et, en affinant le niveau de détail, les paramètres thermophysiques nécessaires pour déterminer les niveaux d'inconfort intérieur, voire jusqu'à intégrer le comportement des usagers. À l'inverse, le niveau de détail de la modélisation de l'environnement extérieur est souvent très faible dans les outils de simulation thermique dynamique du bâtiment, avec les données climatiques régionales et la simple prise en compte des masques solaires proches. Que ce soit au niveau des outils de thermique du bâtiment ou de la modélisation de l'environnement extérieur, les surfaces des parois représentent l'élément central du couplage des phénomènes comme des outils de simulation numérique, ce que nous avons en particulier étudié dans le projet ANR Dynasimul sur les plateformes de modélisation et les problématiques de couplage des outils de simulation du bâtiment (Sempey et al., 2007). À l'interface des modèles thermiques du bâtiment et de l'environnement urbain, l'enveloppe extérieure des bâtiments est en première approche l'élément principal soit à la limite du modèle avec des conditions limites simplifiées du côté environnement extérieur ou intérieur, soit un élément de couplage central par l'établissement d'un bilan d'énergie et de masse à l'interface bâti/extérieur des modèles.

Les outils à l'échelle du microclimat urbain ont souvent été dérivés de modèles atmosphériques méso-échelle adaptés et dits « urbanisés » (Bozonnet et al., 2015; Musy et al., 2011). Ces derniers intègrent une description généralement très simplifiée du fonctionnement du bâtiment, mais permettent de déterminer les flux sensibles et latents à l'échelle de la ville et du quartier entre le sol et les différentes couches atmosphériques de la canopée urbaine vers la sous-couche limite urbaine.

À l'interface ambiance intérieure et microclimat urbain, la définition de la morphologie du quartier par le détail tridimensionnel des enveloppes des bâtiments est essentielle dans la conception architecturale des quartiers. Du point de vue calcul numérique thermophysique, les outils traditionnels de conception se concentrent avant tout sur l'impact de la morphologie sur le calcul radiatif vis-à-vis des apports solaires, au-delà des simples données de climat régional pour le niveau de détail de l'environnement extérieur (Figure 9). Par exemple, l'étude de l'aménagement du quartier Atlantech à la Rochelle a fait l'objet d'une étude, avec le développement d'une maquette numérique tridimensionnelle (Figure 10) développée pour des études paramétriques à partir d'une planification d'urbanisme supposée.

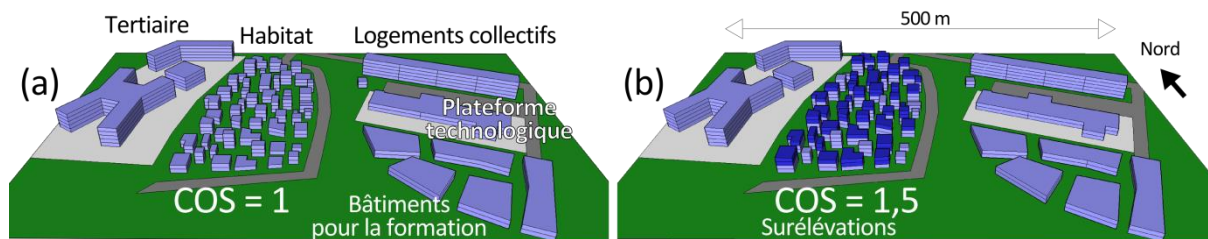


Figure 10 – étude d'un scénario d'aménagement d'un quartier : (a) cas de référence (COS = 1) et (b) densification (COS = 1,5) par surélévation des bâtiments d'habitation pour des variations du coefficient d'occupation des sols COS, d'après (Gros et al., 2016a).

Dans l'évolution du plan d'aménagement du quartier, les bâtiments tertiaires et la plateforme technologique ont été définis très tôt (Figure 10a), tandis que la conception et la disposition des autres bâtiments a fait l'objet de nombreuses études paramétriques, comme ici la variation du coefficient d'occupation des sols (COS) grâce à une simple surélévation d'un ou deux niveaux des bâtiments d'habitation (Figure 10b). La morphologie de référence est issue ici d'une première esquisse de l'urbaniste et donc très floue, les changements s'effectuant au fur et à mesure pour chaque lot et chaque maître d'ouvrage, ce qui ne permet d'étudier que des tendances générales sur l'environnement du quartier et les bâtiments en phase amont. L'analyse de l'ensemble a été réalisée du point de vue thermique ici selon des paramètres morphologiques et de rayonnement (Figure 11).

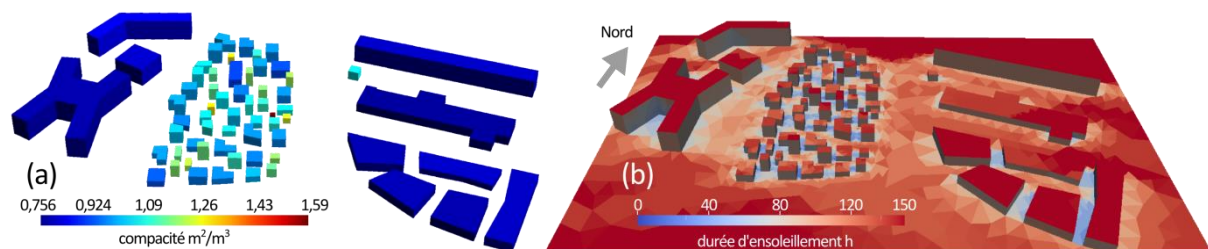


Figure 11 – morphologie de référence du quartier Atlantech : (a) compacité en m^2/m^3 de volume intérieur des bâtiments et (b) durée d'ensoleillement en heures du 21 au 28 juillet (la Rochelle, France), d'après (Gros et al., 2016a).

La localisation et les données géométriques permettent d'obtenir directement des indicateurs morphologiques tels que le facteur de vue du ciel (facteur de forme à la voûte céleste) ou inversement le confinement radiatif (facteur de forme aux surfaces environnantes), la compacité (Figure 11a), utile en première approche pour déterminer le ratio de surface déperditive par rapport au volume intérieur exposé aux charges extérieures. Ces données permettent aussi des calculs d'éclairément de courtes longueurs d'onde avec des indicateurs tels que la durée d'ensoleillement (Figure 11b), utiles pour déterminer le potentiel en énergie solaire ou les besoins en protections solaires par exemple. Au-delà du premier niveau d'analyse morphologique de l'environnement extérieur (Figure 9) le calcul thermoradiatif, i.e. en intégrant les transferts énergétiques dont les grandes longueurs d'onde, permet une approche plus complète du bilan thermique des surfaces

urbaines, comme c'est le cas par exemple dans les développements de l'outil SOLENE intégrant en détail les échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde et des transferts thermiques simplifiés avec l'environnement, les bâtiments et la voûte céleste (Groleau et al., 2003; Miguet and Groleau, 2007). Les propriétés radiatives des surfaces urbaines définies pour les courtes longueurs d'onde (réflectivité solaire notée ρ_s) et grandes longueurs d'onde (émissivité thermique notée ε) sont ici essentielles pour les résultats obtenus bien qu'elles soient attribuées de façon simplifiée dans l'exemple du quartier Atlantech (Figure 12a). Les écarts de température peuvent être très importants d'où la représentation suivant trois échelles de température de 19-25°C au minimum (Figure 12a), jusqu'à 73-76°C au maximum (Figure 12c), et l'échelle intermédiaire 40-60°C (Figure 12d).

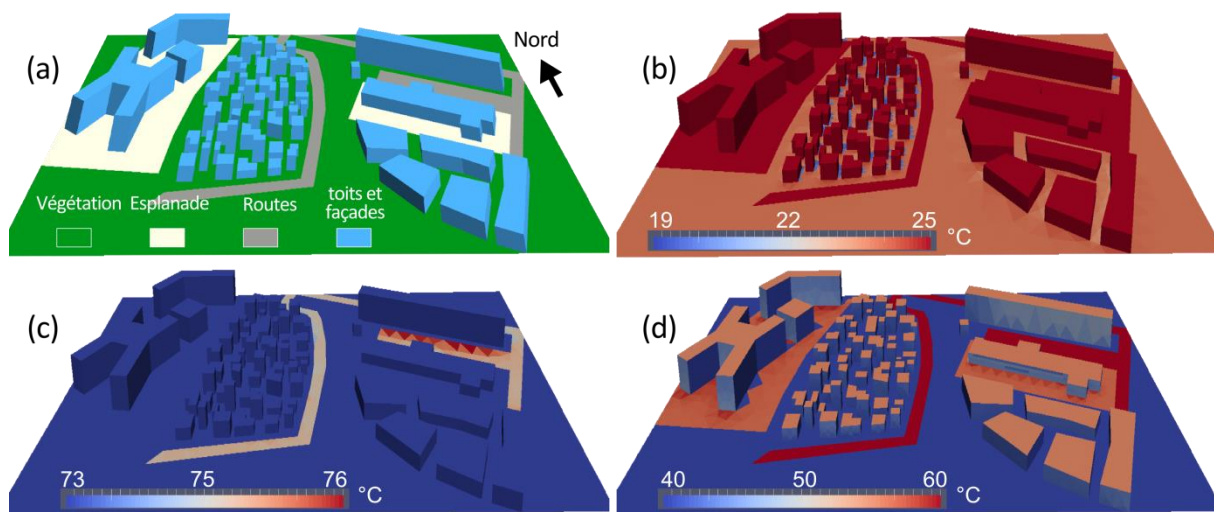


Figure 12 – caractérisation des surfaces urbaines du quartier à partir (a) des propriétés radiatives des matériaux et (b, c et d) des températures calculées ici à 13h (23 juillet) et représentées selon 3 échelles de 19 à 76°C, d'après (Gros et al., 2016a)

Les températures des surfaces sombres telles que les routes ($\rho_s = 0,1$ et $\varepsilon = 0,9$) atteignent les températures les plus élevées, en particulier dans les zones exposées aux inter-réflexions (Figure 12c). Les surfaces horizontales plus claires de toiture ($\rho_s = 0,3$ et $\varepsilon = 0,9$) et d'esplanade ($\rho_s = 0,45$ et $\varepsilon = 0,9$) sont aussi directement exposées au rayonnement solaire et à une température élevée, ici à 13h (heure solaire) en juillet et par ciel clair. L'analyse de la distribution des températures de surface peut permettre d'identifier localement des zones confinées de piégeage radiatif ou au contraire protégée (Figure 12d). Ces calculs thermoradiatifs peuvent permettre une approche plus complète de l'effet du choix des matériaux, caractérisés par leurs propriétés thermiques de conductivité et d'inertie ainsi que leur état de surface et propriétés radiatives, avec en analyse directe les grandeurs physiques de rayonnement absorbé, les champs de température de surface, les flux conduits, etc. En post-traitement, des indicateurs de confort thermique extérieur sont intéressants à analyser comme la distribution des températures radiatives moyennes sur les zones d'occupation.

Du point de vue énergétique ou du confort intérieur des bâtiments, les calculs précédents permettent une première estimation des flux transmis sollicitant les ambiances intérieures en période estivale. Cette possibilité de calcul des charges thermiques des bâtiments climatisés maintenus à une température intérieure donnée est un premier critère d'évaluation de la performance vis-à-vis des espaces intérieurs et de l'énergie. Ainsi il est possible de tenir compte du couplage des bâtiments avec leur environnement pour les besoins de climatisation (Figure 13a), avec des paramètres influents comme la compacité des bâtiments ici (Figure 13b).

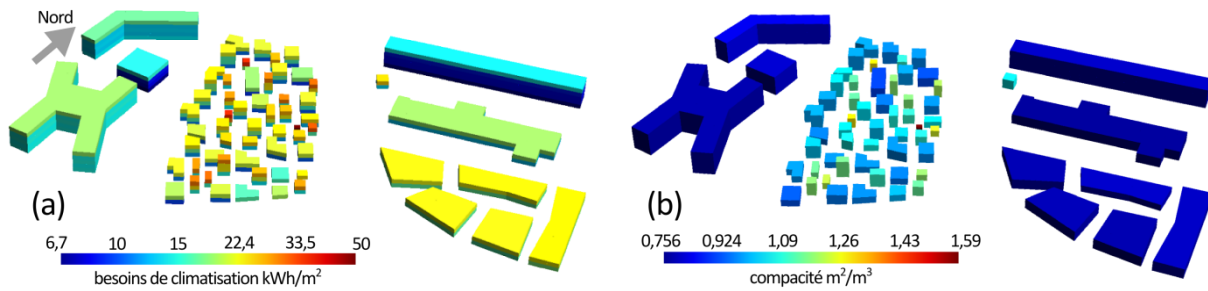


Figure 13 – analyse pour le quartier Atlantech (a) du besoin de climatisation (kWh/m²) du 1^{er} mai au 30 septembre, et (b) de la compacité des enveloppes de bâtiment (m²/m³), d'après (Gros et al., 2016a).

La consigne de température de climatisation est ici de 26°C (Figure 13a) avec des besoins plus élevés dans la partie la plus dense, zone d'habitation, qui se trouve être aussi la zone de plus faible facteur de compacité (Figure 13b). Les vitrages par façade et par étage sont modélisés par une surface équivalente calculée sur la base d'un taux de vitrage donné, et intégrant une protection solaire par défaut. L'approche multizone (Figure 9) des bâtiments, par étage, montre la distribution des charges, plus fortes sous toiture ce qui est cohérent vis-à-vis des résultats de calculs thermoradiatifs (Figure 11 et Figure 12).

Enfin, la conception pour la qualité environnementale du quartier doit être étudiée du point de vue des vents dominants et de leur distribution, ceux-ci ayant un impact direct et indirect sur la qualité de l'air mais aussi sur le confinement thermique des rues et indirectement sur les ambiances intérieures et le potentiel de rafraîchissement passif par ventilation naturelle. La morphologie du quartier a donc aussi un impact sur ces écoulements dus aux vents dominants autour des bâtiments, pour lesquels on dispose généralement de données régionales, représentées par la rose des vents. Pour notre site d'étude (Figure 14a), ils ont été plus finement analysés à l'aide d'un outil de calcul d'écoulements urbains, QUIC-URB (Pardijak et al., 2004) utilisé dans notre étude sur le quartier Atlantech (Figure 14b). L'analyse de la rose des vents (Figure 14a) donne les directions principales, vents d'ouest et de nord, les vitesses sont fortement atténuées pour des directions de nord, avec une atténuation de l'ordre de 80% d'après la Figure 14b pour le bâtiment de la plateforme technologique (Figure 10a). Les zones parkings et esplanades autour sont donc po-

tentiellement des zones de confinement thermique car également soumises à un fort rayonnement de courtes et de grandes longueurs d'onde (Figure 11 et Figure 12). Par contre pour les vents d'ouest plus fréquents (Figure 14b) la zone d'habitat est fortement protégée par les bâtiments tertiaires à l'ouest, avec une réduction d'amplitude moyenne de 80%, tandis que pour la plateforme technologique la réduction n'est plus que de l'ordre de 15%.

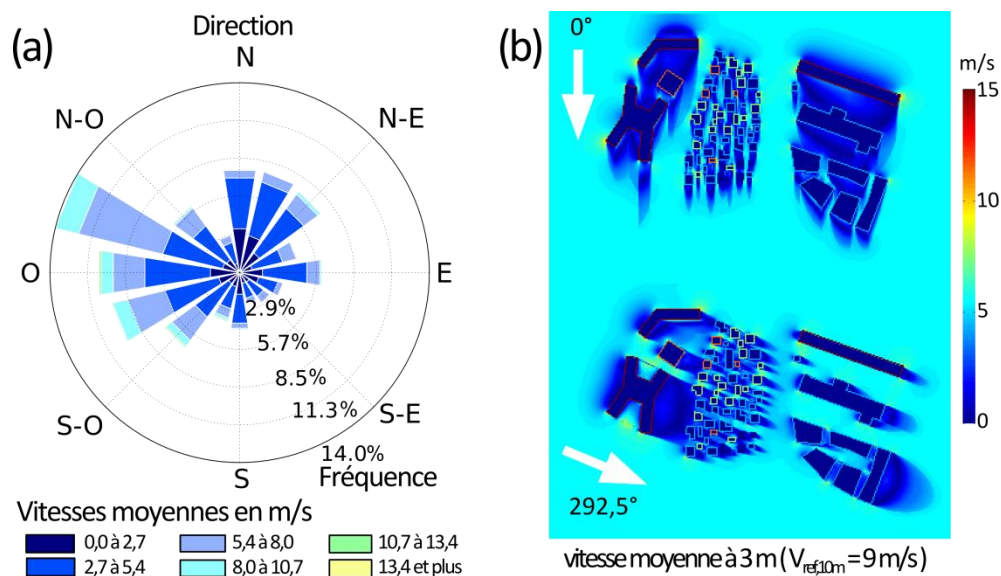


Figure 14 – vitesse moyenne du vent sur le site étudié : (a) rose des vents pour la Rochelle du 1^{er} avril au 30 septembre, et (b) distribution des vitesses du vent à 3m de hauteur pour un vent de référence de 9m/s à 10m et une direction principale de 0° et 292,5°, d'après Gros et al. (2016a).

Au-delà de l'analyse des vitesses de vent calculées, ces outils permettent de déduire des indicateurs de confort thermique qui intègrent la vitesse d'air en plus du calcul thermoradiatif (Figure 11 et Figure 12) et la température radiante moyenne dans la conception du quartier vis-à-vis de la qualité des espaces extérieurs. Bien que les indices de confort thermique intérieur PMV et PPD (vote prévisible moyen et pourcentage d'insatisfaits) soient parfois utilisés, ils sont éloignés des observations et comme le montrent de nombreuses études, d'après Rupp et al. (2015), des indicateurs tels que le PET (Température Physiologique Équivalente) ou des indicateurs de confort adaptatif sont plus adaptés.

2.1.2 Des enveloppes de bâtiment pour le confort intérieur d'été et la performance énergétique

Du point de vue du confort thermique intérieur, les systèmes de traitement des ambiances représentent une part importante de la demande énergétique liée aux bâtiments et est directement liée à la performance de l'enveloppe bâtie. Cette consommation d'énergie représente en France 43,9% de l'énergie finale consommée (*Chiffres clés de l'énergie*, 2012). L'exigence performantielle pour le bâtiment s'est renforcée au fil de l'évolution des réglementations thermiques, qui tendent vers

une amélioration globale tant des systèmes de chauffage que de l'enveloppe et en particulier du niveau d'isolation thermique des bâtiments. Ces réglementations de plus en plus contraignantes sont encore très spécifiques aux situations hivernales bien qu'elles visent aussi à limiter le recours à la climatisation ; mais parallèlement le marché de la climatisation d'été se développe dans l'existant en dehors des contraintes réglementaires. La conception de l'enveloppe bâtie devient essentielle en période estivale, en particulier pour le développement de solutions de rafraîchissement passif. De plus, en milieu urbain dense le risque de canicule étant amplifié, les bâtiments participent aux apports anthropiques liés aux systèmes de climatisation. La bonne conception architecturale et les solutions de rafraîchissement passif intégrant les interactions avec l'enveloppe bâtie ont donc un potentiel accru tant au niveau du confort thermique intérieur des occupants que de la demande énergétique des systèmes de climatisation.

Développement d'outils de simulation couplés

Dans mes différents travaux, certains problèmes ont nécessité d'une part de développer entièrement des modèles de thermique du bâtiment, multizones pour l'intérieur comme pour EnviBatE (Gros et al., 2014) et un modèle de canyon (Bozonnet, 2005) voire zonaux comme pour Sim_Zonal (Wurtz et al., 2003), et d'autre part des développements avec l'outil de simulation TRNSYS (Transient System Simulation). Des codes spécifiques et une utilisation avancée de cet outil de simulation thermique dynamique ont été réalisés avec le couplage d'un modèle aéraulique (CONTAM) et l'implémentation d'un modèle zonal de stratification thermique (Lapisa et al., 2014) (Figure 15), le développement de modules complémentaires en langage Python (Djedjig et al., 2015b), ainsi que le couplage avec différents modèles de sol et le développement d'outils d'analyses paramétriques (Lapisa et al., 2013a) ont permis l'utilisation d'algorithmes d'optimisation.

À l'échelle du bâtiment, les outils d'étude de qualité des ambiances intérieures ont été développés parallèlement pour l'étude des transferts aérauliques d'une part, et thermiques et énergétiques d'autre part. Les modèles dits multizones se sont imposés dans ces outils dont la complémentarité les a fait converger pour des calculs thermo-aérauliques, ce niveau de détail étant bien adapté pour l'intégration du fonctionnement couplé des systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC et systèmes passifs, Figure 9). Dans une partie de mes travaux l'outil de simulation thermique dynamique TRNSYS a été utilisé pour sa modularité et la possibilité d'intégrer de nouveaux modèles. Cet outil, utilisé ici dans sa version 17 (Klein et al., 2010) a été développé dès le début des années 1970 par le laboratoire d'énergie solaire (SEL) de l'université du Wisconsin (Madison, USA) pour la simulation de systèmes solaires puis progressivement de l'ensemble du bâti et des systèmes, avec en particulier un modèle multizone détaillé du bâtiment (Klein, 1988). Son cou-

plage avec CONTAM (McDowell et al., 2003) permet d'étudier les effets thermoaérauliques couplés, ainsi que l'effet du vent sur l'enveloppe extérieure et les ouvrants, nécessaires en particulier pour évaluer le potentiel de ventilation naturelle.

Nous avons abordé ce problème pour une typologie classique de bâtiments industriels et commerciaux de faible hauteur, cas d'étude particulièrement intéressant du fait des besoins énergétiques de chauffage mais aussi du problème de la maîtrise de l'inconfort chaud d'été. Par contre le grand volume et la hauteur sous plafond accentuent l'importance de la stratification thermique à la fois dans l'évaluation du confort mais aussi dans la détermination des charges de chauffage ou de climatisation. Une approche zonale, de type multicouche rendue possible avec TRNSYS17, a été implémentée en comparant l'impact de la discrétisation (Figure 15a) et en intégrant un modèle spécifique de jet pour le système de conditionnement d'air (Figure 15b).

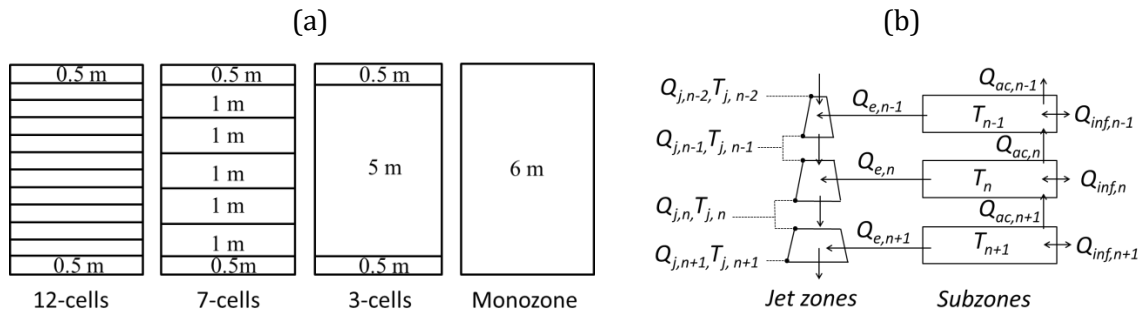


Figure 15 - (a) différents niveaux de discrétisation pour décrire la stratification thermique du volume étudié et (b) modèle de jet, d'entraînement d'air et d'infiltration selon les différentes strates du volume d'air, d'après (Lapisa et al., 2014)

Pour une hauteur sous plafond donnée, par exemple ici de 6m, le découpage monozone et en 3, 7 ou 12 zones horizontales (Figure 15a) a été étudié. Nous avons cependant veillé à conserver un niveau de discrétisation suffisant près du sol et du plafond de façon à mieux prendre en compte les plus forts gradients de température. Les sources de chaleur sont réparties sur la hauteur des occupants (1,80m) et au plafond pour l'éclairage, tandis que le conditionnement d'air par ventilation mécanique produit un mélange selon un modèle de jet isotherme (Musy et al., 2001) dont l'équation de débit massique $Q_{j,n}$ peut s'exprimer par l'équation (2-1).

$$Q_{j,n} = Q_{j,o} \left(1 + \frac{4 C_u^2 K_v}{d_o \ln(2)} X_n \right) \quad (2-1)$$

Ici l'interface est indexée n en partant de $Q_{j,0}$ au niveau du plafond, i.e. du diffuseur conformément à la Figure 15b. C_u et K_v sont des constantes liées au type de jet et d_o le diamètre du diffuseur. Les débits d'infiltration Q_{inf} sont calculés par le modèle empirique d'infiltration de CONTAM tandis que les débits d'entraînement Q_e sont déduits par conservation de la masse. La température du jet est donc liée à l'entraînement d'air, et le bilan thermique du jet peut s'écrire selon l'équation (2-2).

$$T_{j,n} = \frac{T_{j,n-1} + K_e \Delta X_n \left((n-1)T_{j,n-1} + T_n \right)}{1 + K_e X_n} \quad (2-2)$$

Où $T_{j,n}$ est la température du jet selon le même ordre que pour les débits (Figure 15b), X_n est la distance au plafond et ΔX_n est la hauteur de la couche considérée.

Des modèles adaptés pour la ventilation mécanique et naturelle et la prise en compte du confort

Pour cette étude, le bâtiment de référence situé à Marseille et représenté à la Figure 16a, a une surface au sol de 1296m², une hauteur sous plafond de 6m et des vitrages en façade (sud, est et ouest) ainsi qu'en toiture (lanterneaux).

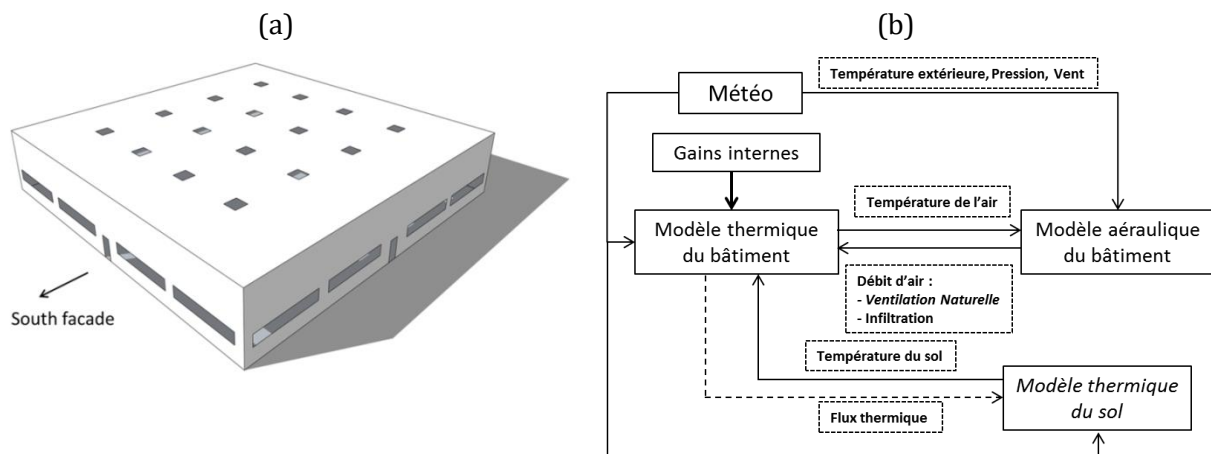


Figure 16 - (a) enveloppe du bâtiment commercial étudié et (b) couplage thermoaéraulique d'après (Bozonnet et al., 2012).

L'enveloppe type pour ces bâtiments est caractérisée par de grandes surfaces au sol, et donc de grandes toitures. Cette enveloppe est très sensible aux flux de chaleur par la toiture et le sol, échanges qui peuvent être bénéfiques aux objectifs de confort et de minimisation de la consommation d'énergie à condition d'optimiser la conception de l'enveloppe, i.e. de la toiture, des lanternes de toiture et de l'isolation du sol. Le couplage thermoaéraulique permet ici en particulier de prendre en compte la ventilation naturelle nocturne par ouverture des lanternes et les infiltrations sur le modèle thermique selon le schéma de couplage (Figure 16b). Nous avons également réalisé des travaux sur des relevés de consommation énergétique pour un bâtiment réel de typologie semblable qui ont donné des résultats très proches de la simulation réalisée avec ces mêmes modèles (Bozonnet et al., 2012). Le sol est lui décrit par un modèle tridimensionnel initialisé après une année complète de simulation. La ventilation mécanique est utilisée en journée sans ventilation naturelle pour garantir les exigences liées à l'occupation selon les caractéristiques données au Tableau 1.

Tableau 1 – caractéristiques du bâtiment commercial de référence

caractéristiques géométriques	parois
<ul style="list-style-type: none"> - Surface au sol de 36m x 36m - Hauteur sous plafond de 6m - 16 lanterneaux ; soit 31,36m² (2,42%) - 30m² de vitrages répartis sur les façades sud, est et ouest 	<ul style="list-style-type: none"> - Murs extérieurs $U = 0,122\text{W/m}^2\text{K}$ - Toiture $U = 0,162\text{W/m}^2\text{K}$ - Dalle non isolée (16cm de béton) - Réflectivité solaire de toiture 0,3 - Émissivité thermique de toiture de 0,9 - Perméabilité 2cm²/m²
Systèmes et occupation	
<ul style="list-style-type: none"> - 11,6 m²/occ de 7h à 22h (lun. à sam.) - Ventilation mécanique air neuf 6,9 l/(s.occ) - Gains par occupant selon ISO7730 - Gains éclairage de 8W/m² 	

Ce bâtiment est fortement isolé (Tableau 1) ce qui permet de limiter les besoins de chauffage. Cependant, favoriser les échanges avec le sol permet de bénéficier de son inertie, et la toiture peut aussi participer au rafraîchissement passif : ventilation naturelle par ouverture des lanterneaux et échanges radiatifs de courtes et grandes longueurs d'onde (solaire et voûte céleste). Dans un premier temps, dans le cas théorique sans aucun système de climatisation et sans ventilation naturelle, la modélisation de la ventilation mécanique par le modèle de jet et différentes options de stratification (Figure 15) est utilisée et montre des différences importantes à la fois sur les températures intérieures (Figure 17a) et sur les débits dus aux infiltrations (Figure 17b).

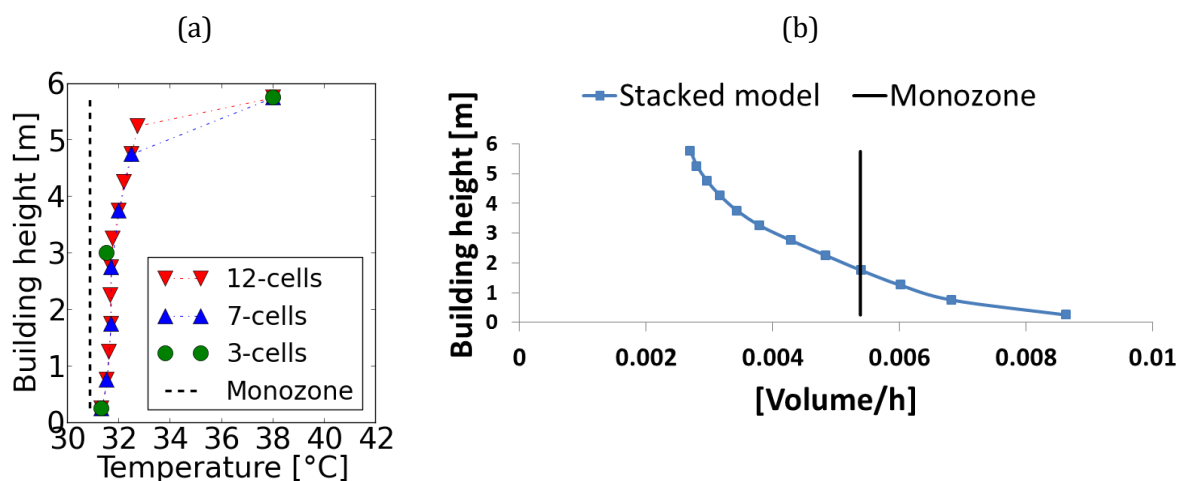


Figure 17 – résultats avec ou sans maillage vertical, jusqu'à 12 couches, sur (a) le profil de température d'air en été avec ventilation mécanique et (b) l'infiltration d'air extérieur sans ventilation mécanique durant la nuit, d'après (Lapisa et al., 2014)

L'effet de stratification sur la hauteur du local est représenté (Figure 17a) pour une moyenne des températures quotidiennes maximales de la période d'été. L'importance d'un découpage zonal est particulièrement visible ici avec des écarts de température importants sous plafond, jusqu'à 7,1°C, et non négligeables dans la zone de confort jusqu'à 1,80m. De plus, le rafraîchissement nocturne

peut se faire en partie grâce à l'infiltration d'air qui est surestimée ici de 15% avec le modèle à un nœud de calcul comparé au modèle plus détaillé à 12 couches(Figure 17b).

Ainsi, la prise en compte du couplage thermoaéroulque permet de représenter les effets de tirage thermique et des interactions de l'enveloppe du bâtiment avec le vent extérieur, mais n'est pas toujours suffisante pour estimer précisément les conditions de température d'air intérieur comme le montre la Figure 18 pour les différents modèles de stratification de la Figure 15a.

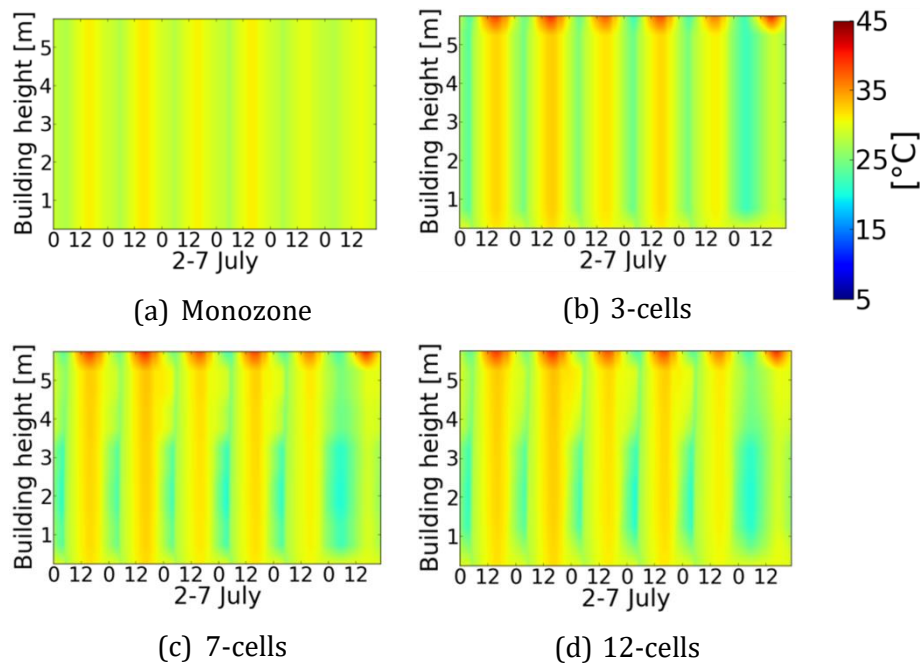


Figure 18 – distribution verticale de température d'air, 0 à 6m, pour une semaine du 2 au 7 juillet et par un modèle (a) monozone, (b) à 3 couches, (c) à 7 couches, et (d) à 12 couches, d'après (Lapisa et al., 2014)

Le gradient thermique observé le plus élevé se produit en journée avec un écart de température plafond/sol de $+6,7^{\circ}\text{C}$; tandis que la nuit la tendance s'inverse avec un écart plafond/sol qui atteint $-4,3^{\circ}\text{C}$ du fait de l'inertie thermique de la dalle et du rafraichissement nocturne de la toiture. Ce phénomène n'est bien sûr pas observable avec le modèle monozone (Figure 18a) qui sous-estime à la fois le potentiel de rafraichissement nocturne par les parois et les infiltrations (Figure 18c-d) et l'effet de surchauffe diurne en l'absence de ventilation naturelle. Enfin, on remarque que le simple découpage zonal en 3 couches horizontales (Figure 18b) permet déjà une bonne approche de l'effet de la ventilation sur la température de l'air intérieur par rapport au modèle monozone (Figure 18a).

L'utilisation de la ventilation naturelle nocturne (Figure 19b) pour le climat de Marseille (Figure 19a) est profitable pour ce bâtiment type dès le début du mois de mai et jusqu'au mois de novembre, soit environ 45% du temps des périodes nocturnes de l'année.

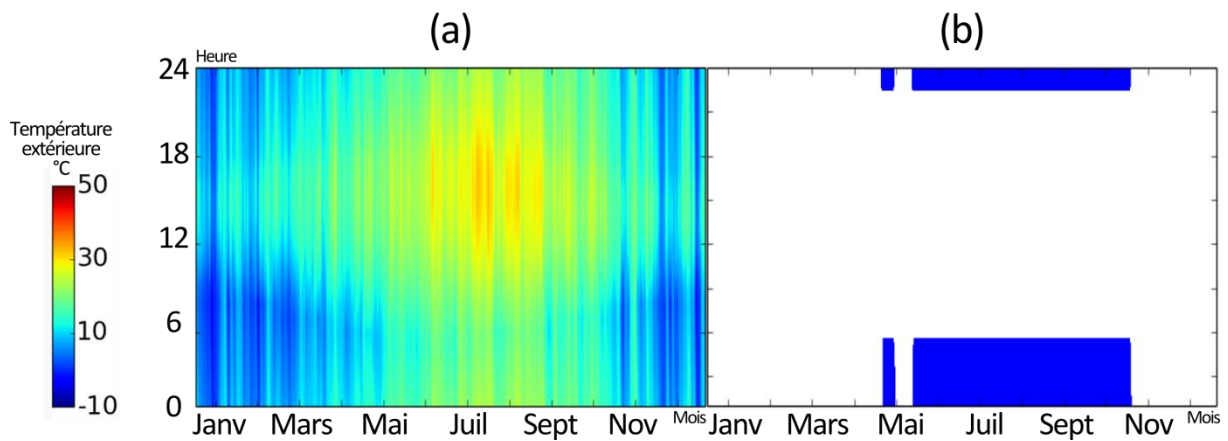


Figure 19 – pour le climat de Marseille, (a) variations quotidiennes de la température extérieure pour une année type, et (b) périodes calculées d’ouverture des lanterneaux de toiture pour la ventilation naturelle (en bleu)

En effet, la décharge thermique nocturne du bâtiment calculée par l’ouverture des lanterneaux, pilotés par les différences de température et la présence ou non de pluie (Figure 19b) permet de conserver des températures dans l’intervalle 19 à 26°C pour la période diurne grâce à l’inertie du sol, tout en limitant les consommations de chauffage supplémentaires en intersaison. Cependant, le niveau de détail du modèle entraîne aussi ici des différences de résultats qui s’observent avec l’effet de la ventilation naturelle nocturne et la distribution des températures diurnes dans la zone de confort (Figure 20).

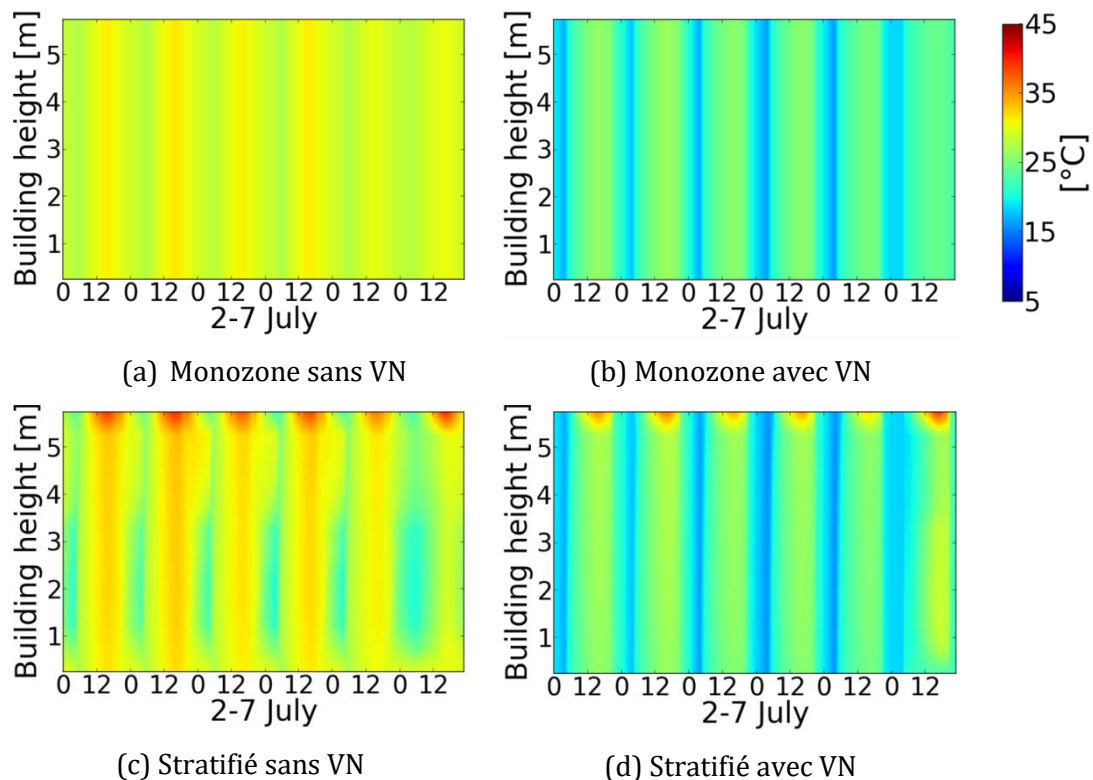


Figure 20 – distribution verticale de température d’air, 0 à 6m pour une semaine du 2 au 7 juillet, sans ventilation naturelle (a et c) ou avec (b et d) ; modèle monozone (a et b) ou stratifié (c et d) à 12 couches, d’après (Lapisa et al., 2014)

Avec les deux approches, monozone (Figure 20a et b) et stratifiée (Figure 20c et d), on constate l'effet important de la ventilation nocturne sur la décharge thermique du bâtiment et le bénéfice en période diurne du fait de l'inertie du bâtiment, au niveau du sol en particulier. La diminution de la température opérative en période d'occupation dans la zone de confort des occupants (jusqu'à 1,80m) est alors de 6,2°C avec le modèle monozone et de 5,9°C avec le modèle stratifié. Pour l'évaluation de la stratégie de ventilation naturelle selon la norme ("NF EN 15251," 2007) les degré-heures d'inconfort sont calculés par rapport à la zone de température de confort adaptatif. Alors que sans ventilation naturelle nocturne ce niveau d'inconfort calculé avec le modèle stratifié est de 9905°Ch, il est réduit de 74,4% avec la ventilation naturelle nocturne. Par contre, le modèle simplifié monozone sous-estime à la fois le niveau d'inconfort sans ventilation naturelle (7232°Ch), et le taux d'inconfort sur la période d'occupation. Ainsi, la ventilation naturelle permet de passer d'un taux de 94,9% de la période d'occupation en inconfort à 44%, calculé avec le volume stratifié, tandis que le calcul monozone estime un taux qui passe de 95,4% à 31,3%.

2.1.3 Le développement d'approches de conception intégrées

Pour la conception des bâtiments performants du point de vue énergétique, il faut également répondre aux objectifs de bien-être des occupants et aux différents usages. Cette conception nécessite de traiter de façon intégrée les différents phénomènes de transfert de l'usager vers l'environnement extérieur en passant par l'étude de l'enveloppe bâtie. Dans mes travaux de recherche, j'ai abordé le développement de nouvelles approches de conception intégrées (projets ANR Cosimphi, ANR VENISE, PROGEMI, et ADEME Renoir) permettant d'envisager des méthodes d'optimisation (Chardon et al., 2014a, 2014b) et l'étude de solutions passives optimisées pour l'été en fonction du climat (Lapisa et al., 2013a, 2013b, 2013c). Cette approche de conception des enveloppes, vue vis-à-vis des sollicitations du climat, doit aussi tenir compte des effets des autres constructions et du microclimat de la ville (Bozonnet, 2005). L'environnement urbain présenté au §2.1.1 a un effet de rétroaction abordé plus précisément dans la suite. De l'ébauche à la construction puis à l'exploitation d'un bâtiment, un phasage bien précis est traditionnellement défini (esquisse, avant-projet, projet, consultation des entreprises, etc...). Avec cette approche traditionnelle, les étapes initiales demandent une grande expertise dans les choix qui vont définir les grandes lignes du projet et avoir un impact important sur la construction finale. Au cours de ce processus, les détails de l'ouvrage s'affinent mais la complexité et donc le coût de toute modification croît tandis qu'au contraire l'impact relatif diminue, comme le montre la Figure 21 proposée par Handler (1970).

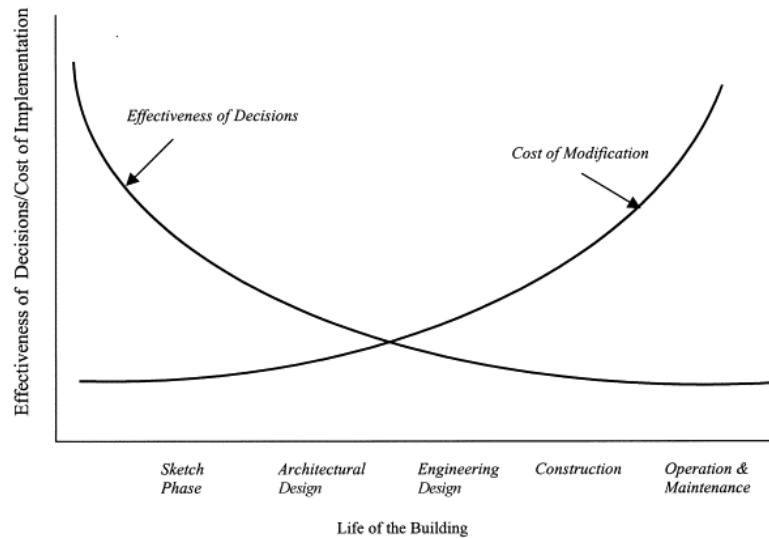


Figure 21 – coût des décisions et leur impact sur la performance du bâtiment en considérant le temps d'un projet de construction depuis son esquisse initiale (Handler, 1970)

L'efficacité des choix dans la conception est généralement maximale dans les phases initiales, ce qui devient problématique du fait du nombre croissant d'objectifs qui sont demandés pour répondre aux exigences de qualité environnementale, de performance énergétique et de minimisation des coûts. L'esquisse traditionnelle fait appel à l'expertise et à l'expérience du maître d'œuvre, mais l'augmentation de la technicité requise et de la diversité des domaines rend complexe cette approche intégrée. Pour ce qui concerne l'efficacité énergétique du bâtiment elle est déjà réglementairement définie par la RT2012 en France pour une approche intégrée, sachant que le critère de performance réglementaire de l'enveloppe, le coefficient B_{bio} , est représentatif des besoins énergétiques du système bâtiment et intègre donc l'ensemble des composants d'enveloppe. Ainsi c'est la performance intégrée sur l'année du système bâti qui est validée, quelles que soient les caractéristiques de chaque composant d'enveloppe pris séparément. Cette nécessité d'une approche intégrée dans la conception des enveloppes apparaît de façon plus nette avec le renforcement des niveaux de performance exigés et de l'apparente contradiction entre certains objectifs de performance. Ainsi, la conception de bâtiments passifs s'est longtemps focalisée sur les performances en termes de demande énergétique de chauffage par d'une part le renforcement toujours plus important de l'isolation thermique des parois et d'autre part l'utilisation des apports solaires l'hiver favorisés par une bonne orientation. Cependant, sans une bonne prise en compte des conditions d'inconfort chaud, cette approche peut mener à des surchauffes d'été ou de mi saison pour les bâtiments non conditionnés, voire des surconsommations de climatisation pour les bâtiments entièrement conditionnés.

2.2 Interaction du bâtiment avec la rue de type canyon

2.2.1 La rue canyon – un espace confiné et une échelle d'étude intermédiaire entre le bâtiment et le quartier

La rue dite de type canyon a été la première échelle d'étude dans les développements de mes travaux de recherche sur l'interaction des bâtiments avec leur environnement urbain proche (Bozonnet, 2005). Cette typologie de rue est principalement définie par son rapport d'aspect des dimensions transversales largeur W et hauteur H relativement petites par rapport à sa longueur L . Elle est pertinente dans le cadre de morphologies urbaines régulières typique des centres urbains traditionnels, mais pas complètement satisfaisante si on considère la diversité des tissus urbains que l'on peut identifier selon des notions soit de tissus urbains liés aux acteurs, soit de morphologies liés aux modèles physiques (Bozonnet et al., 2006a, 2008). Mais de même que pour caractériser les bâtiments, par exemple à l'aide du facteur de compacité ou du coefficient d'occupation des sols (Figure 10 et Figure 11a), la morphologie du quartier peut être caractérisée par le rapport d'aspect moyen des rues W/H représentatif d'un canyon urbain vis-à-vis des différents phénomènes de transferts. D'autres paramètres morphologiques urbains sont aussi utilisés aux différentes échelles et pour les différents phénomènes physiques de transfert dont les plus courants sont récapitulés dans le Tableau 2.

Tableau 2 – paramètres morphologiques courants vs. grandeurs physiques étudiées (Bozonnet et al., 2006a)

Paramètres morphologiques	Grandeurs physiques
Densité	Rayonnement Vent
Rugosité	Vent
Sinuosité	Vent
Ratio d'enveloppe	Rayonnement Vent
Rapport d'aspect de la rue (W/H)	Rayonnement Température Acoustique
Ratio d'espacement (Distance entre bâtiments / largeur bâtiments)	Rayonnement
Orientation	Rayonnement Température
Facteur de vue du ciel (SVF)	Rayonnement
Pourcentage de sol couvert par les bâtiments	Rayonnement
Rose des orientations (Surface des bâtiments pondérée du SVF)	Rayonnement

L'étude de l'interaction entre un bâtiment et son environnement proche à l'échelle de la rue, représentée par un type canyon, permet donc aussi de se conformer précisément à la plupart des paramètres morphologiques urbains (Tableau 2). Le rapport d'aspect transversal des rues (W/H moyen) est l'un des paramètres morphologiques couramment retenu pour définir le degré d'ouverture des rues par de nombreux outils de simulation à l'échelle de la ville. Il se concrétise dans

de nombreux outils de simulation par la représentation simplifiée en première approche du microclimat urbain par une rue canyon représentative de l'environnement urbain du bâtiment. De même que la conception traditionnelle du bâtiment a été souvent orientée par la définition d'une enveloppe performante pour le maintien d'une ambiance intérieure de confort hygrothermique idéal en toute saison (Figure 22a), l'urbanisme et la conception des rues ont souvent été considérées pour répondre aux sollicitations du climat à l'image des villes méditerranéennes vernaculaires (Bozonnet et al., 2006b) conçues selon les conditions d'ensoleillement ou de vents tels que les brises marines. L'urbanisme comme le bâtiment est pourtant maintenant beaucoup moins lié à l'environnement, puisque pour le bâtiment les contraintes thermiques des enveloppes cèdent la place aux critères architecturaux, économiques ou fonctionnels, avec le développement des systèmes de traitement des ambiances intérieures énergivores par ailleurs. De même, les formes, la densité (Figure 22c) ou l'étalement urbain (Figure 22b) se développent selon des traditions ou des tendances sociales éloignées des rapports directs à l'environnement et beaucoup plus par rapport à des infrastructures de transport par exemple (Figure 22d).



Figure 22 - Différentes morphologies urbaines, a) Santorini, Grèce - b) Las Vegas, Nevada - c) Barcelone, Espagne - d) autoroute urbaine.

Cette diversité des formes, parfois très hétérogènes (Figure 22), s'accompagne de besoins en voiries et réseaux, éléments clés dans l'approche globale prenant en compte les nuisances et les consommations liées aux transports, mais qui modifient également l'environnement et les sollicitations thermiques des bâtiments. La diversité des formes et des combinaisons du traitement des surfaces peut s'étudier dans une première approche pour le cas de la rue canyon de façon plus systématique, à plus petite échelle mais avec une paramétrisation généralisable (densité, rugosité, facteur de vue du ciel, etc.) qui permettra de définir les pistes de recherches réalisées aussi par la suite à l'échelle du quartier.

En milieu urbain dense, i.e. de rapport d'aspect de rue W/H faible, les bâtiments peuvent être protégés de l'éclairement solaire direct par effet de masque, mais en contrepartie les inter-réflexions augmentent le facteur d'absorption du tissu urbain en journée et les faibles facteurs de vue du ciel limitent le rafraîchissement nocturne vers la voûte céleste. Ce phénomène de piégeage radiatif est doublé en période de canicule, par conditions de vent faible, d'un confinement thermoaéraulique des rues canyon de par le faible renouvellement sous la canopée urbaine (Oke, 1987). Par la suite, nous nous sommes intéressés à la modélisation et à la validation expérimentale du confinement thermique et de son interaction avec le bâtiment.

2.2.2 Modélisation de l'interaction rue canyon et bâtiments

Mes travaux de modélisation du confinement thermique local dû aux canyons urbains m'ont permis de développer des outils pour :

- la modélisation thermoradiative et zonale de canyons couplés au bâtiment et aux systèmes (Bozonnet, 2005; Bozonnet et al., 2005),
- la modélisation du forçage convectif dû à l'effet des vents dominants à l'échelle d'un canyon (Bozonnet, 2005; Bozonnet et al., 2006)
- la modélisation de la demande énergétique des bâtiments (Bozonnet, 2005; Bozonnet et al., 2007) et l'intégration dans un outil de STD de l'effet de canyon urbain (Djedjig et al., 2013, 2015b)

Modèle zonal de bâtiments et de rue canyon couplés

La modélisation du piégeage radiatif en période de vent faible doit prendre en compte les effets du rayonnement solaire, i.e. de courtes longueurs d'onde, liés à la morphologie de la rue et aux propriétés radiatives des surfaces, mais également les échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde liés aux températures des surfaces et donc au comportement dynamique du bâtiment et aux échanges convectifs avec l'air du le canyon.

Les modèles de rayonnement de grande et courtes longueurs d'onde ont été adaptés selon différentes approches pour l'environnement urbain et la rue canyon (Gros et al., 2011). L'éclairement direct et diffus de courtes longueurs d'onde est généralement résolu avec le modèle de ciel de Perez, l'un des plus précis pour tenir compte de l'anisotropie de la luminance du ciel en fonction des données d'éclairement solaire sur l'horizontale, modèle utilisé par exemple dans l'outil Solene (Groleau et al., 2003). Le problème du couplage thermoradiatif avec les températures des surfaces urbaines pose des problèmes de temps de résolution et de couplage qui ont été abordés par le développement de modèles simplifiés (Gros et al., 2011) comme la méthode des radiosités simplifiée SRA développée pour le milieu urbain par Robinson et Stone (2005). Dans le cas de la rue canyon, j'ai proposé une modélisation des inter-réflexions pour le rayonnement de courtes et grandes longueurs d'onde dans un canyon urbain (Bozonnet et al., 2005) par une adaptation de la méthode des enceintes fictives pour une enceinte fermée (Walton, 1980). L'échange radiatif est calculé en considérant une réflexion diffuse comme pour la méthode des radiosités, mais chaque élément de surface (i) du canyon est considéré en équilibre radiatif avec une surface fictive (Fi) équivalente à l'ensemble des autres surfaces en vis-à-vis, donc sont exclus les éléments de surface du même plan. Cet élément fictif équivalent à la scène est défini par sa surface S_{Fi} somme des surfaces en vis-à-vis, ses réflectivités fictives de courtes et grandes longueurs d'onde équivalentes à la moyenne pondérée des surfaces, ρ_{Fi} et $\rho_{GLO,i}$. Il en est de même pour son émissivité fictive ε_{Fi} . La matrice des facteurs de forme, qui est de grande taille pour une scène urbaine, est problématique en termes informatique, notamment pour la gestion de la dimension des systèmes à résoudre. Le problème de résolution est ici simplifié par la définition simple des facteurs de forme $F_{Fi,i}$ entre chaque élément de surface (i) et la surface fictive associée (Fi), équations (2-2) et (2-3).

$$F_{Fi,i} = \frac{S_i}{S_{Fi}} \quad (2-3)$$

$$F_{Fi,Fi} = 1 - \frac{S_i}{S_{Fi}} \quad (2-4)$$

Pour les courtes longueurs d'onde (CLO), le système couplé à résoudre se résume alors à un système linéaire, équation (2-5), déterminant l'éclairement solaire total après inter-réflexions $E_{CLO,AR,i}$ en W/m^2 . Il s'exprime à partir d'une radiosité initiale avant inter-réflexions pour la surface (i) $J_{0,CLO,i} = \rho_i E_{s,i}$ et l'équivalence au prorata des surfaces pour la surface fictive (Fi) $J_{0,CLO,Fi}$ en W/m^2 , avec $E_{s,i}$ l'éclairement solaire total de la surface (i).

$$E_{CLO,AR,i} = E_{s,i} + F_{Fi,i} \times \frac{\rho_{Fi} J_{0,CLO,i} + \frac{J_{0,CLO,Fi}}{F_{Fi,i}}}{1 - \rho_{Fi}(\rho_i F_{Fi,i} + F_{Fi,Fi})} \quad (2-5)$$

De même pour les grandes longueurs d'onde, l'éclairement $E_{GLO,AR,i}$ s'exprime après inter-réflexions par l'équation (2-6).

$$E_{GLO,AR,i} = F_{Fi,i} \times \frac{\rho_{GLO,Fi} J_{0,GLO,i} + \frac{J_{0,GLO,Fi}}{F_{Fi,i}}}{1 - \rho_{GLO,Fi}(\rho_{GLO,i} F_{Fi,i} + F_{Fi,Fi})} \quad (2-6)$$

Les bilans radiatifs de courtes et grandes longueurs d'onde peuvent alors se calculer de façon directe et indépendante du reste du système couplé avec la redistribution d'un résidu tel que développé dans la méthode zonale à l'échelle du bâtiment et de la rue (Bozonnet et al., 2005; Wurtz et al., 2003).

Ce couplage thermoradiatif a été abordé par contre sans simplification des facteurs de forme dans notre modélisation développée à l'échelle du quartier, à savoir le modèle l'outil EnviBatE (Gros, 2013). Le couplage complet dans la résolution du système thermoradiatif du modèle zonal dans son ensemble, sans méthode itérative, a cette fois nécessité la linéarisation des échanges de grandes longueurs d'onde. Entre cette simplification de la méthode des radiosités et la méthode des enceintes fictives, une approche plus complète, intégrant facteurs de forme et non linéarités, telle que la méthode des radiosités simplifiée SRA (Robinson and Stone, 2005) permettrait d'améliorer la précision dans la prise en compte de ces échanges radiatifs et des impacts des morphologies et des propriétés radiatives des surfaces. Néanmoins, ces approches sur la base de la méthode des radiosités devront être dépassées à terme pour aller plus loin dans la prise en compte et l'exploitation plus fine des propriétés radiatives ; par exemple sur 3 bandes de longueurs d'onde dans le cadre de matériaux colorés cools (séparation du spectre solaire en visible et proche infrarouge), et pour l'exploitation et l'optimisation des propriétés spéculaires de revêtements de type rétro-réfléchissant (Rossi et al., 2014).

Renouvellement d'air dû aux vents dominants

L'étude des champs de vitesse d'air entre les bâtiments en milieu urbain dense montrent de très fortes perturbations en particulier pour les périodes de vent faible pendant lesquelles les effets locaux de turbulence deviennent non négligeables (Allard and Ghiaus, 2004). Nous avons vérifié cette tendance mais aussi les corrélations possibles à partir de mesures dans 5 rues de type canyon pour la ville d'Athènes (Georgakis and Santamouris, 2005). Notre étude (Bozonnet et al., 2006) des champs de vitesse moyen dans les rues mesurées (Figure 23) montre une bonne cohérence des amplitudes comme des directions en fonction du vent de référence (station météorologique) et une atténuation forte sous la canopée urbaine dans les rues canyons des sites urbains denses.

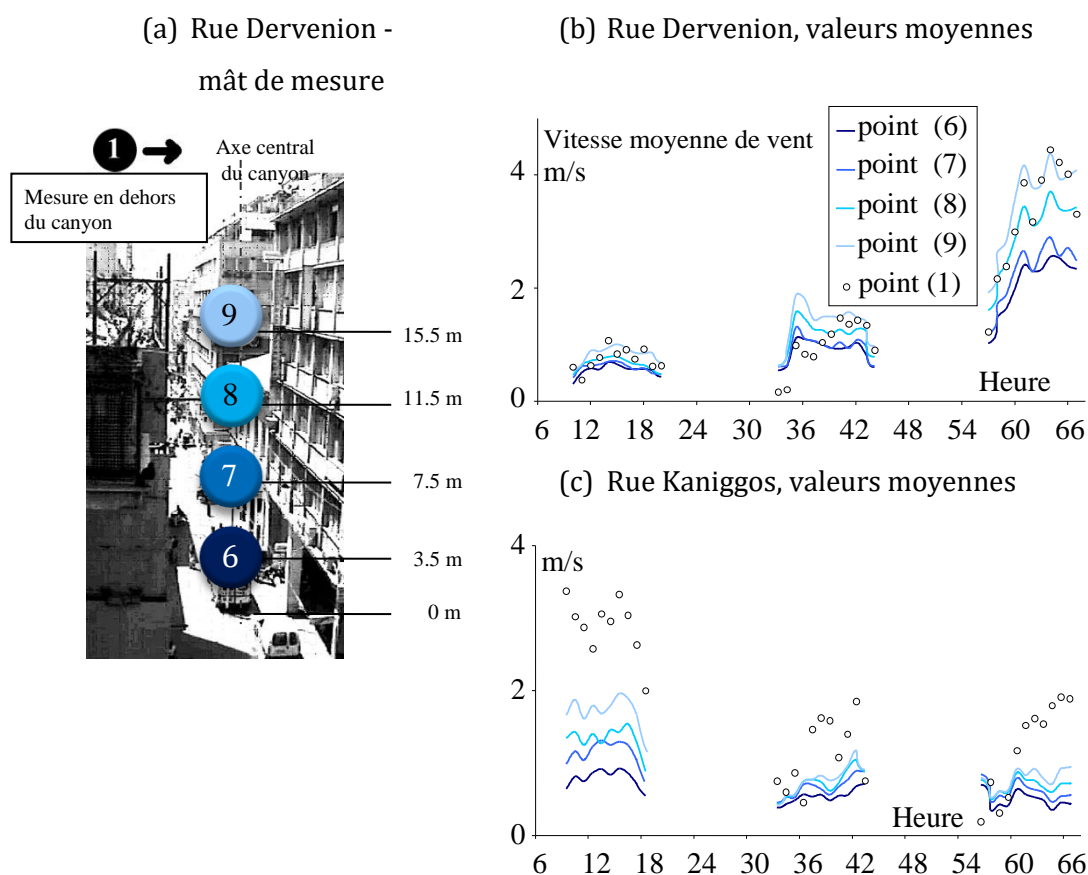


Figure 23 – (a) Points de mesure en dehors et au centre d’une rue à Athènes (Georgakis and Santamouris, 2005) et vitesses moyennes observées pour 3 journées consécutives d’été pour 2 rues canyon (b) et (c).

À l’échelle de la ville, le profil moyen du vent est perturbé formant une couche limite atmosphérique appelée couche limite urbaine. En milieu dense, entre les bâtiments, la vitesse du vent est en moyenne fortement perturbée mais aussi atténuée, et une sous-couche limite est définie comme canopée urbaine. Au-dessus de cette sous couche limite urbaine on retrouve un vent moyen avec un profil de type logarithmique comme en milieu homogène. Cette description empirique des écoulements dus aux vents dominants a été formalisée et développée par de nombreux auteurs sur la base de paramètres de rugosité urbaine et sous la forme de lois exponentielles et logarithmiques (Nicholson, 1975; Plate and Kiefer, 2001). À l’échelle des rues, la formation de vortex pour des écoulements transversaux est également bien identifiée dans de très nombreuses études numériques et expérimentales. Là aussi des approches empiriques sur la base de paramètres morphologiques simples, tels que les rapports d’aspect des canyons urbains, ont été développées très tôt (Hotchkiss and Harlow, 1973; Oke, 1987), permettant ainsi d’estimer le type de recirculation ou d’interférence et le champ de vitesse moyen. L’orientation générale des rues principales d’une ville, formant des canyons urbains, a également une influence à plus grande échelle et en altitude sur la direction des vents moyens par effet de canalisation (Rotach, 1999).

Ce sont donc ces modèles de connaissance empirique des vents dominants moyens qui ont été dans un premier temps intégrés aux modèles zonaux à l'échelle de la rue (Bozonnet et al., 2006). La comparaison des évolutions horaires des amplitudes calculées empiriquement avec les valeurs mesurées montrent que les évolutions sont représentatives, ici dans l'axe central de la rue (Figure 24) pour le mât de mesure dans une des rues canyons mesurée sur 3 journées (Figure 23c).

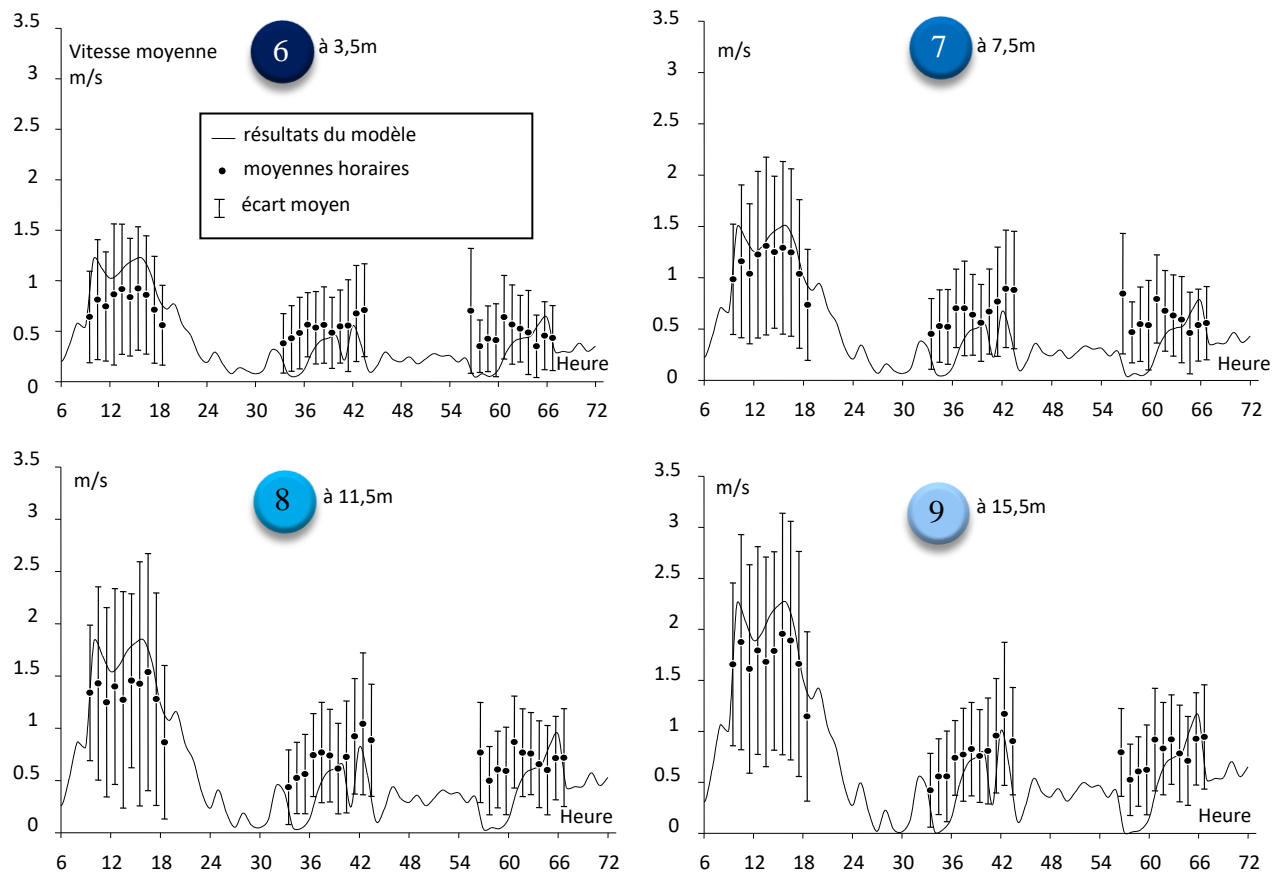


Figure 24 - Amplitudes des vitesses de vent à différentes hauteurs en moyenne horaire la rue Kaniggos (Athènes, Grèce) d'après les mesures de l'UOA (Georgakis and Santamouris, 2005), et dispersion et calage d'un modèle empirique de vent moyen (Bozonnet et al., 2006)

On observe ainsi des différences sur les moyennes des vitesses calculées et mesurées (Figure 24) variant de 12 à 23% pour les points de mesure 6 à 8 avec un maximum de 0,7m/s. Ces différences, qui ne semblent pas être corrélées à la position ni à l'amplitude de la vitesse du vent de référence, peuvent être considérées comme faibles compte tenu des fortes perturbations, en particulier des effets thermiques locaux. Localement, l'effet des vents dominants, liés aux conditions météorologiques à l'échelle de la région et de la ville, se combine aux perturbations thermiques à l'échelle de la rue. Cette modélisation thermoaéroulrique couplée a été testée dans notre approche zonale de la rue canyon (Bozonnet, 2005; Bozonnet et al., 2007).

Dans nos développements du couplage de l'effet de la rue au bâtiment, nous avons également adopté une approche plus simple et plus macroscopique de la rue canyon telle que celle issue de

l'étude de faisabilité d'intégration dans les modèles de climat urbain (Denes et al., 2009), et par la suite de façon opérationnelle comme un module spécifique de canyon urbain dans le logiciel de simulation thermique dynamique TRNSYS (Djedjig et al., 2016). Cette approche consiste à considérer la rue canyon dans son ensemble et les échanges entre les différentes surfaces (chaussées, façades et toitures) et les zones confinées de la rue et au-dessus de la canopée urbaine (Figure 25).

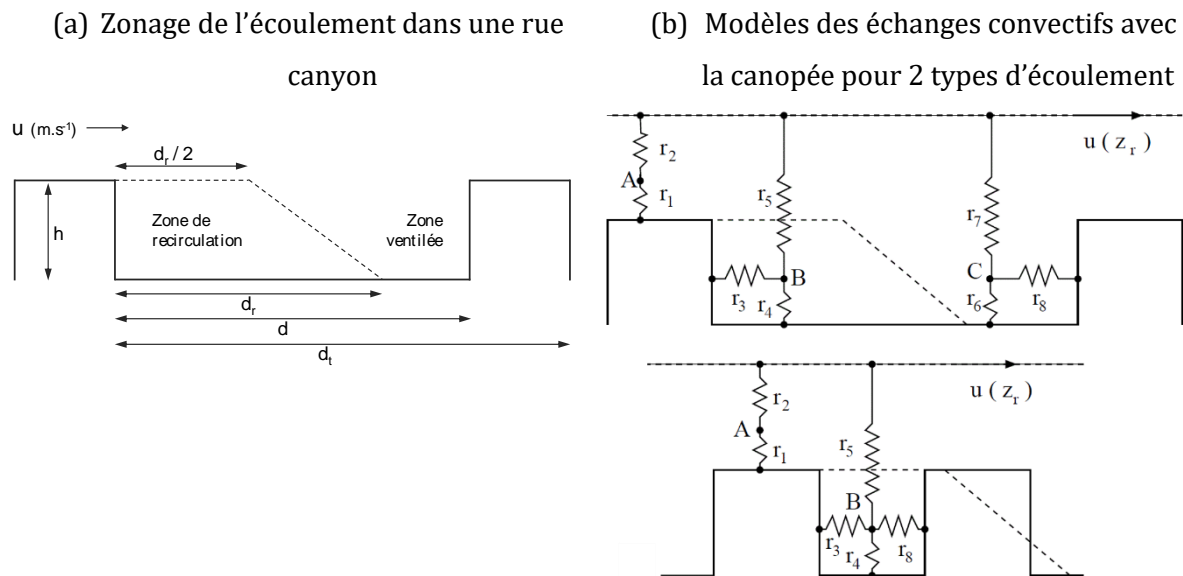


Figure 25 - Définition de la zone de recirculation (a) et modèles d'échange convectifs pour deux régimes d'écoulement (b) d'après (Harman et al., 2004a)

Le régime d'écoulement est bien connu en fonction du rapport d'aspect de la rue (Oke, 1987), et dans cette approche on considère un zonage simplifié avec des résistances d'échange surfacique représentatives des transferts convectifs dans l'espace confiné de la rue (B), en toiture (A) et éventuellement dans la zone ventilée (C) d'une large rue (Figure 25b). Ces résistances surfaciques sont uniquement dépendantes des paramètres géométriques, de rugosité urbaine et des amplitudes de vitesse de référence. C'est ici la description empirique de l'écoulement à l'échelle d'un canyon urbain qui définit de façon macroscopique les échanges convectifs entre les différentes zones d'écoulement.

Performance énergétique du bâtiment couplée au canyon urbain

Ces approches zonales d'écoulements et les modèles thermoradiatifs étudiés nous ont permis de développer et de proposer des modèles thermoaérauliques couplés et adaptés à des approches plus détaillées sur la rue canyon (Bozonnet et al., 2007), ou sur un modèle complet de simulation thermique dynamique du bâtiment (Djedjig et al., 2016). Dans la première approche, le maillage zonal détaillé de la rue permet une description fine des effets de confinement thermoaérauliques et des échanges avec le système bâtiment/équipements techniques représenté Figure 26.

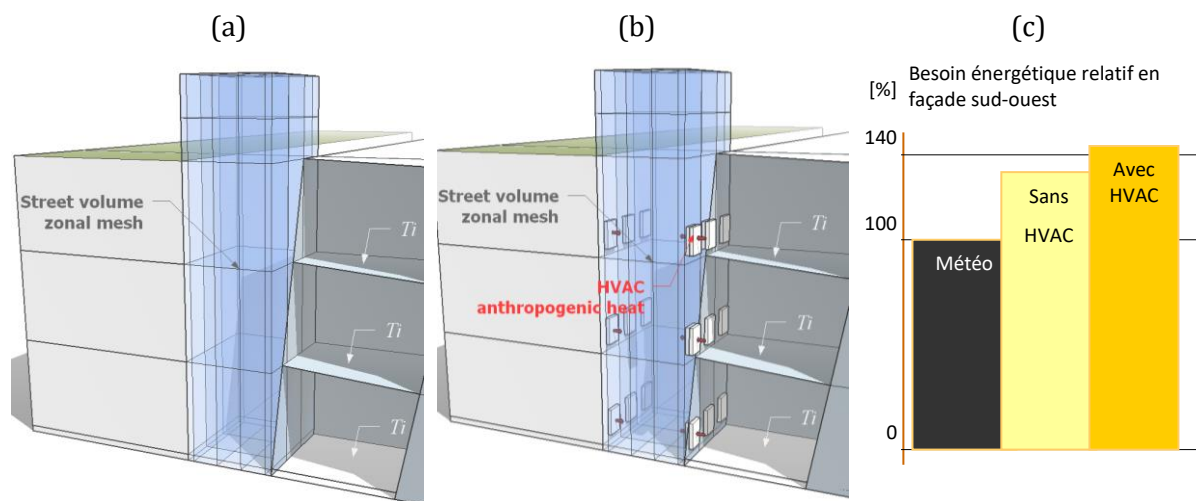


Figure 26 - (a) et (b) : modélisation zonale sans et avec effet rétroactif des systèmes de climatisation sur le volume de la rue (pour un mois d'été, Athènes, Grèce) et (c) comparaison relative du besoin énergétique de climatisation calculé, d'après (Bozonnet et al., 2007)

Le modèle zonal utilisé pour modéliser la rue canyon (Figure 26a), permet le calcul du champ de température dans la rue, au pas de temps horaire et sur une saison complète, ainsi que les besoins de climatisation détaillés des bâtiments suivant un scénario de température intérieure de consigne. L'effet relatif de la prise en compte du confinement thermoaérouliquique sur le besoin en climatisation (Figure 26c) est amplifié si on considère la contribution de climatiseurs de façade dans le modèle zonal (Figure 26b). Le modèle zonal permet ainsi la résolution du système thermoaérouliquique couplé comprenant les bilans de chaleur et de masse par volume d'air, avec les effets de poussée thermique, ainsi que les bilans de surface convectifs, radiatifs et conductifs. Il utilise en entrée les résultats des calculs solaires, issus de SOLENE (Groleau et al., 2003), et de vent dominant issus du modèle empirique précédemment décrit (Hotchkiss and Harlow, 1973; Nicholson, 1975).

Cet effet de confinement thermoaérouliquique a aussi été intégré dans une modélisation plus macroscopique de la rue décrite précédemment grâce à un modèle d'échange convectif global du canyon avec la canopée urbaine proposé par Harman (Harman et al., 2004b) et couplé au modèle multi-zone de bâtiment de TRNSYS (Djedjig et al., 2016), Figure 27. Ce modèle thermique de calcul a été interfacé au niveau des conditions limites des façades pour lesquelles sont calculés les flux transmis en surface couplés aux températures des surfaces de l'enveloppe multizone (module type 56 de TRNSYS). À ce modèle spécifique de microclimat local, les conditions classiques (données climatiques) en toiture et de masque solaire lié au site sont appliquées au modèle. Ici aussi, les effets du couplage du bâtiment à la rue révèlent des effets de confinement avec un accroissement des besoins de climatisation (Figure 28). Le bâtiment type étudié (Figure 28b) est non isolé, avec de faibles besoins de climatisation de 14,42 kWh/m² (la Rochelle, France) qui augmentent jusqu'à 21,6% avec la prise en compte de l'effet du canyon urbain modélisé.

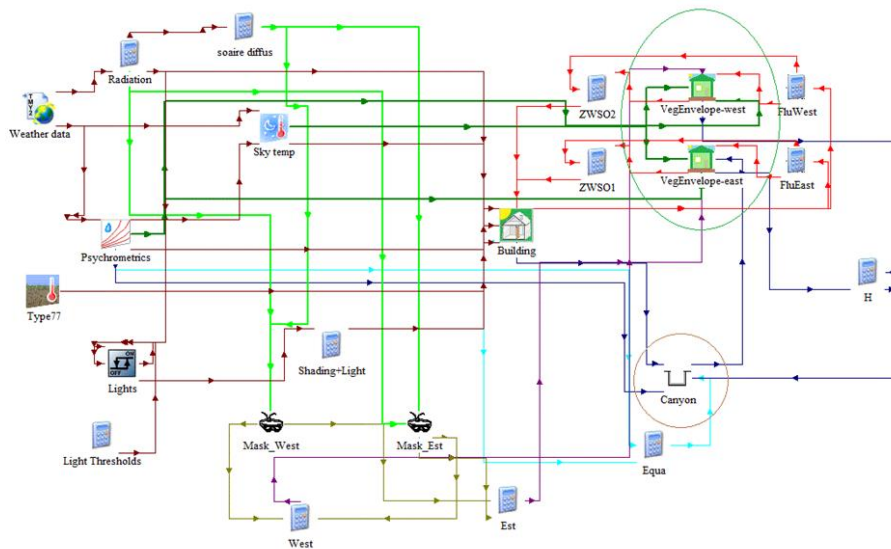


Figure 27 – Couplage du modèle aéralique macroscopique de canyon avec le modèle multizone de bâtiment de TRNSYS d'après (Djedjig et al., 2013)

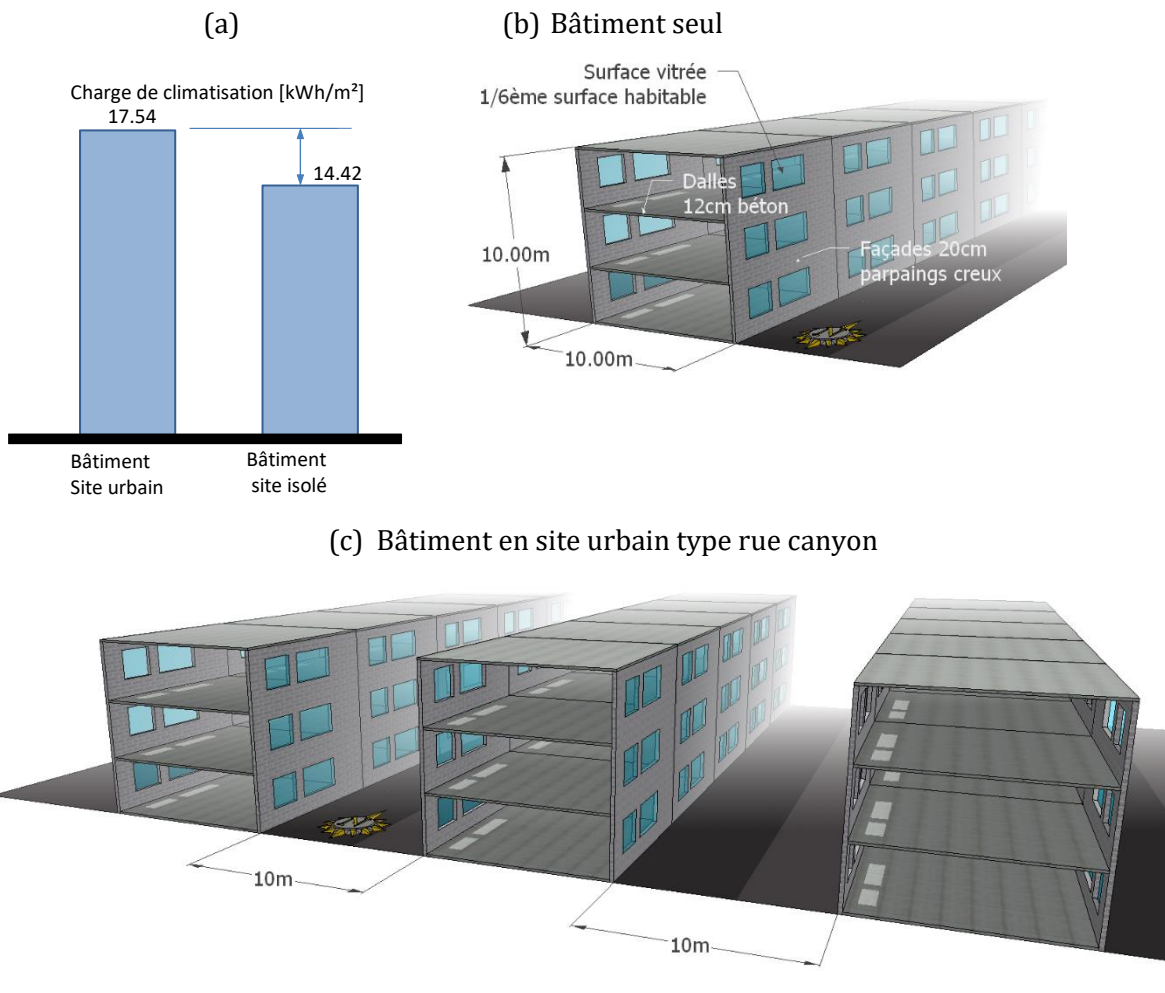


Figure 28 – (a) Comparaison des besoins de climatisation (c) avec et (b) sans effet canyon urbain, d'après (Djedjig, 2013)

Ces effets de confinement urbains modélisés à l'échelle de la rue canyon sont basés sur le couplage de modélisations empiriques et d'équations de bilans vérifiées et validées, mais dont les interactions et les niveaux de simplification peuvent amener à des incertitudes non négligeables. Ce sont donc plutôt des tendances générales et des possibilités de conception par comparaison de solutions qui sont visées dans un premier temps. Le modèle expérimental ClimaBat a été développé pour conforter les résultats de ces modélisations.

2.2.3 Développement d'une plateforme expérimentale à échelle réduite – ClimaBat

ClimaBat développé à l'université de la Rochelle (Djedjig, 2013; Doya, 2010), est une maquette représentative à l'échelle 1/10^{ème} du bâtiment type de la Figure 28b dans la configuration d'un site urbain de type canyon, d'un rapport d'aspect hauteur par largeur presque unitaire, comme pour le cas de la Figure 28c.

Le problème que nous nous sommes posé sur l'étude expérimentale des effets variables du confinement dans une rue de type canyon est lié à leur dépendance aux nombreuses interactions avec d'une part l'environnement urbain plus ou moins proche, et d'autre part les hétérogénéités liées aux usages de la rue et des bâtiments (occupants, systèmes, etc...). Bien que, comme observé dans la partie précédente, des tendances moyennes et des approches empiriques puissent être analysées, les études expérimentales in-situ sont rares car complexes :

- Les incertitudes sur les conditions aux limites sont très nombreuses, de même que la compréhension très partielle de l'effet plus ou moins fort de ces incertitudes sur le domaine d'étude. En fonction des conditions météorologiques et du confinement de la rue, le comportement dynamique des rues environnantes, voire de la ville peut interagir plus ou moins avec celui de la rue étudiée ; i.e. l'importance et la localisation des zones sources (Figure 29) est variable (Mestayer et al., 2011; Voogt and Oke, 2003).
- L'ensemble des paramètres à prendre en compte est difficile à systématiser, et des approches macroscopiques assez simples sont généralement retenues. Typiquement, les analyses (et parfois les modèles associés à l'expérimentation) se basent sur une morphologie idéalisée selon les rapports d'aspect de hauteur, largeur et longueur de la rue, sans prise en compte des particularités de façade complexes (Bourbia and Awbi, 2004; Georgakis and Santamouris, 2005; Niachou et al., 2008).

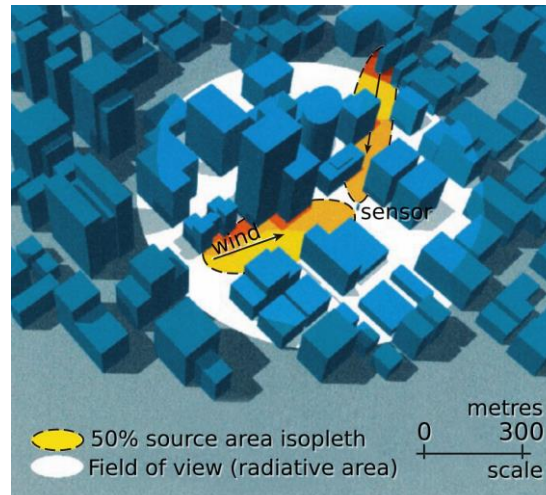


Figure 29 – Schématisation de l’influence des zones sources potentiellement en dehors de la zone de mesure du microclimat local, d’après (Voogt and Oke, 2003).

Aussi, la maquette à échelle réduite ClimaBat (Figure 30), est représentative de 5 rues de type canyon. Au-delà de l’étude en soufflerie de maquettes pour l’effet des vents dominants, ce dispositif expérimental in-situ est donc en interaction avec le climat réel, mais avec des géométries simplifiées représentatives. On s’affranchit ici des problèmes de certaines conditions limites et certains paramètres non maîtrisés à l’intérieur du domaine (tels que l’occupation et l’usage des locaux ou encore la diversité des formes des bâtiments, des ouvertures et des formes de façades) et on se rapproche des simplifications courantes des modèles. Selon les objectifs d’étude, structure des écoulements pour les études de polluants, acoustique urbaine, effets radiatifs, les échelles d’étude et les matériaux des maquettes doivent être adaptés. C’est ici le couplage des échanges thermoaérauliques avec le comportement thermique transitoire des bâtiments, en particulier les cycles jour/nuit, que l’on souhaite représenter au mieux. L’effet de confinement est ici recherché par rapport aux vents dominants d’ouest transversal aux rues orientées sud/nord (Figure 30a), les directions prédominantes étant ouest et nord. La création de rues identiques et représentatives de bâtiments réels en site urbain dense permet ici d’étudier différents dispositifs de traitement de l’enveloppe, tels que les modifications de propriétés radiatives ou de végétalisation (Figure 30b et c). Le suivi simultané présente l’avantage de pouvoir comparer précisément les dispositifs pour des conditions identiques, mais nécessite en toute rigueur une calibration préalable pour vérifier l’analogie du comportement des blocs entre eux (Figure 30d), repérés de A à E d’ouest en est. En effet, bien que le site expérimental soit en site urbain peu dense et relativement homogène, en bord de mer, des zones d’influences extérieures (cf. Figure 29) peuvent être plus ou moins sensibles.

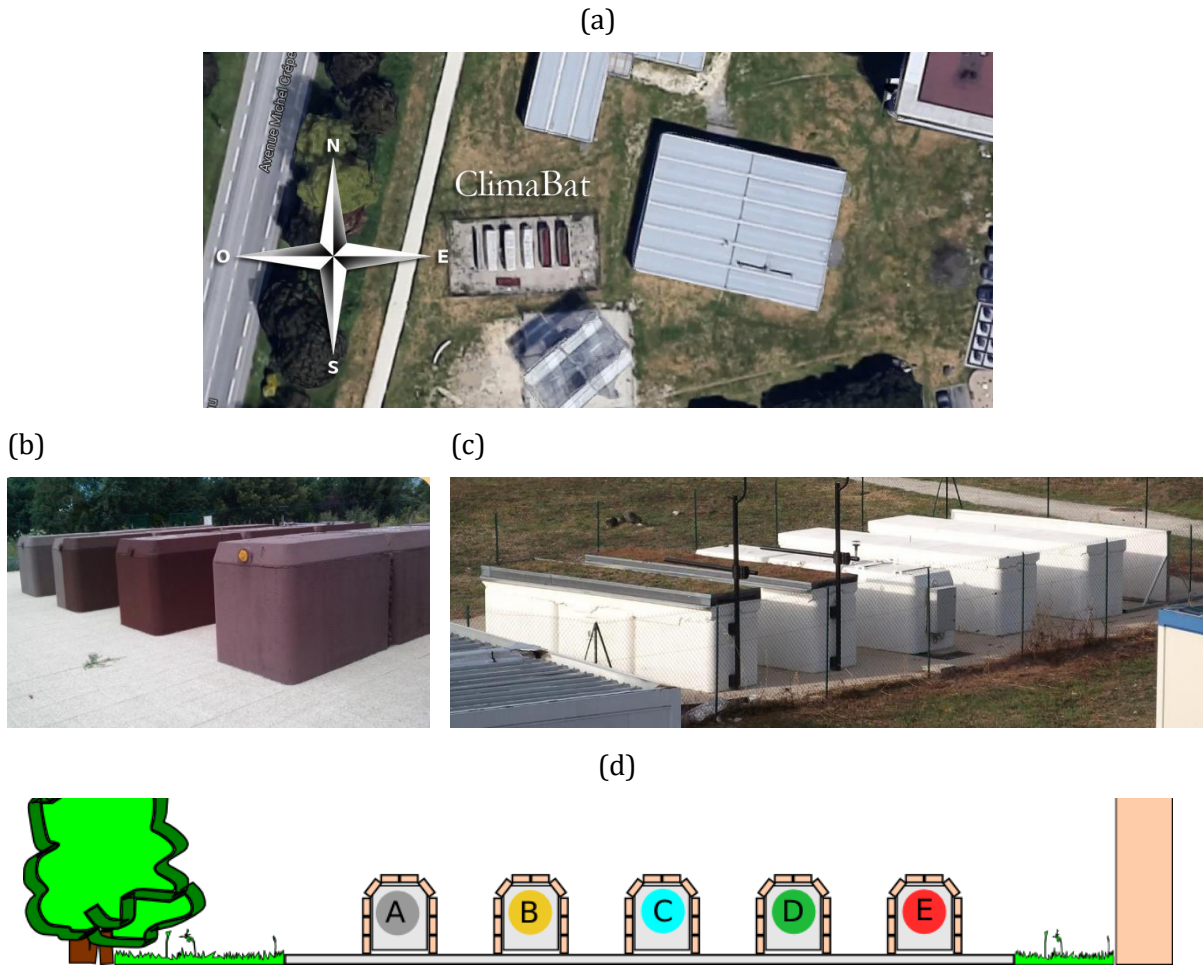


Figure 30 – Plateforme ClimaBat (a) utilisée pour l'étude de revêtements « cool paints » (b) puis végétalisation de toiture et de façade (c), composée de 5 rangées de blocs de béton creux identiques (d)

Analogie du modèle expérimental à échelle réduite

Les blocs représentatifs des bâtiments à échelle 1/10ème sont constitués de parois de béton de 4 à 4,5cm d'épaisseur dont les propriétés sont données dans le Tableau 3. La plateforme a été mise en place sur une large terrasse de 10m × 20m constituée de dalles de béton gravillonné de 4cm d'épaisseur posées sur un lit de sable de 80cm au-dessus du terrain naturel. Comme pour le bâtiment analogue (Figure 28b), on souhaite éviter les effets de bord du canyon avec une longueur relativement plus importante que les dimensions transversales. Ainsi, c'est le bloc central de chaque rue qui est monitoré. L'analogie se retrouve aussi sur les faibles valeurs de résistance et de capacité thermique des parois. L'analogie du comportement thermique dynamique a été comparée sur une semaine type d'été pour les températures de façade est et ouest, de toiture et de plancher, simulées avec TRNSYS pour les modèles à échelle 1 et réduite (Doya, 2010). Les différences n'excèdent pas 1,5°C au maximum et 0,21°C en moyenne. Les différences sont plus marquées pour les températures d'air intérieur, au maximum 2,9°C de plus pour l'échelle 1, du fait de l'importance des surfaces vitrées, dont le taux est ici typique pour un bâtiment d'habitation (valeur réglementaire). Cependant, par rapport à l'objectif de l'étude, à savoir l'effet du traitement

des surfaces urbaines, la bonne représentativité de cette dynamique diurne/nocturne du point de vue des températures et des flux transmis en surface est la priorité ce qui est bien respecté ici.

Tableau 3 – caractéristiques géométriques et matériaux des blocs constitutifs de ClimaBat d’après des mesures en laboratoire (Djedjig, 2013; Doya, 2010)

Bâtiments à échelle réduite	
Nombre	5 (3 cuves par bâtiment)
Hauteur	1260 mm
Largeur	1130 mm
Longueur	5060 mm (3×1680 mm)
Matériau	Béton
Conductivité thermique	2,26 à 2,47 (W.m-1.K-1)
Masse volumique	2150 (kg.m-3)
Capacité thermique	908 à 920 (J.kg-1K-1)
Rues Canyon	
Nombre	4+1 rues
Hauteur	1,30 m
Largeur	1,12 m
Longueur	1,12 m
Rapport d’aspect	Hauteur/Largeur ≈1,2
Réflectivité solaire de la chaussée	0,364
Matériau	Mortier dalles
Conductivité thermique	2,26 à 2,47 (W.m-1.K-1)
Masse volumique	2150 (kg.m-3)
Capacité thermique	908 à 920 (J.kg-1K-1)

Concernant l’analogie d’échelle, s’agissant d’une expérimentation in-situ, la dynamique temporelle liée au climat, en particulier des éclairagements solaires et de la voûte céleste ainsi que des vents dominants, ne permet pas par exemple de respecter les échelles liées aux écoulements turbulents. Cependant, l’organisation des écoulements dominants moyens, de la forme et l’étendue des vortex est fortement dépendante des rapports d’aspect des rues et des bâtiments par rapport aux directions d’incidence comme l’on décrit de nombreux auteurs (Oke, 1987; Pardijak et al., 2004). En condition de vent transversal à la rue, l’effet canyon devrait provoquer un écoulement de type rasant pour un rapport d’aspect $H / W > 0,5$ (Oke, 1987). De même, la distribution des échanges radiatifs de courtes longueurs d’onde sera complètement respectée s’agissant des mêmes rapports d’aspect et propriétés radiatives des surfaces. Concernant les échanges radiatifs de grandes longueurs d’onde, le problème pourrait se poser si la distribution des températures en surface n’était pas respectée. Cette problématique est partiellement levée par une étude préalable effectuée par simulation TRNSYS (Doya, 2010). Plus précisément, pour permettre une distribution similaire des températures de surface, il est nécessaire de rester au plus proche du bilan thermique de surface de l’échelle 1 : éclairement solaire identique, flux convectif proche (coefficient

d'échange convectif et température d'air comparables), flux transmis unidimensionnel (intérieur/extérieur) et inerties thermiques proches (vérification numérique), échanges radiatifs avec le ciel identiques. Les différences sur les échanges convectifs dépendants des vitesses d'air (sachant que la similitude d'échelle aéraulique n'est pas respectée) seront les termes en flux les plus affectés par les différences d'échelle, tout en restant du même ordre de grandeur pour des vitesses de vent et une variation de la vitesse analogue sur la hauteur du canyon en façade des bâtiments.

Calibration et vérification des perturbations dans les différentes rues

L'intérêt de la plateforme en termes de comparaison simultanée de différentes solutions pour différentes rues repose sur la conception identique des rues, dont la quasi-similitude du comportement thermique dynamique a été vérifiée dans une première phase de calibration expérimentale. En première approche, l'analyse des différences inhérentes au dispositif a porté sur les effets de masque solaire dus à l'environnement de la plateforme ClimaBat, avec en particulier le calcul des différences de flux solaire absorbé en façade et sur la hauteur de la rue (Figure 31). Dans cette première étape de calibration (Doya, 2010), les cuves de béton de la plateforme ont été testées avec un revêtement de faible albédo, couleur marron de réflectivité solaire pondérée sur le spectre solaire de 0,145 d'après des mesures réalisées avec un spectrophotomètre UV/VIS/PIR et selon la norme ASTM E903-967. L'albédo des dalles en béton gravillonné, hétérogènes, a été mesuré in situ ; la valeur de 0,36 a été obtenue (Doya et al., 2012b).

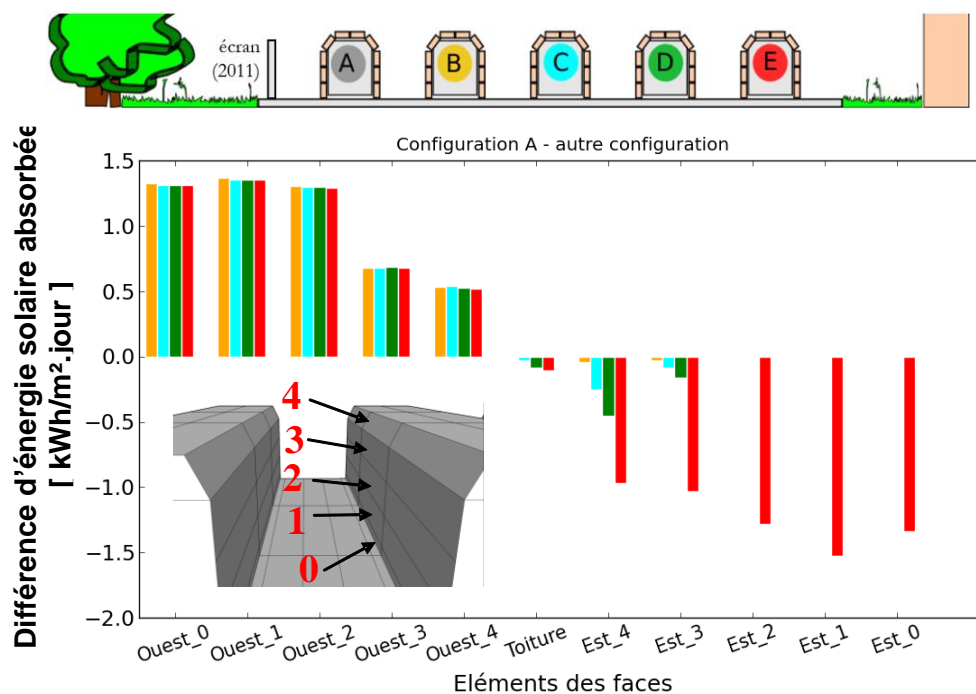


Figure 31 - différence d'énergie solaire absorbée en façade par rapport au bâtiment de référence A, juin 2009, d'après (Doya, 2010)

Les bâtiments A et E étant ici en limite de domaine présentent le plus de différence pour les façades ouest et est respectivement. Cependant les bâtiments B, C et D présentent des valeurs d'éclairements solaires absorbés très proches (Figure 31), de l'ordre de 4 kWh/(m².jour) (Doya, 2010). Dans la suite des travaux sur la plateforme expérimentale (Djedjig, 2013), un écran a été ajouté côté ouest du bâtiment A selon le même rapport d'aspect de rue canyon, permettant ainsi la création d'une 5^{ème} rue et la forte diminution des différences observées ici en façade ouest par rapport au bloc A (Figure 31 et Figure 30c).

Pour les mesures, la plateforme a été équipée dans un premier temps (Doya, 2010) de 80 thermocouples (températures d'air et de surface, Figure 32a et d), de 12 fluxmètres pour les flux de grandes longueurs d'onde de surface (Figure 32b) et d'un anémomètre sonique bidimensionnel (Figure 32c) associé à une station météorologique de toiture située sur le site universitaire. La vérification des différences inhérentes au dispositif a porté sur les températures d'air et de surface dans cette phase de calibration. Ainsi la distribution des températures de surface observées est très similaire pour les façades des rues AB et BC (Figure 33). Les valeurs maximales en période diurne (Figure 33a), sont trouvées en façade ouest et égales à 60,0°C, 59,6°C et 56,4°C pour les rues BC, CD et AB. En façade est on mesure des valeurs maximales de 50,2°C, 47,7°C et 51,0°C pour les rues AB, BC et CD. Pour les valeurs médianes et moyennes les différences entre les façades est des rues AB et BC sont inférieures à 0,5°C. Au niveau des chaussées la différence est en moyenne de 0,5°C.

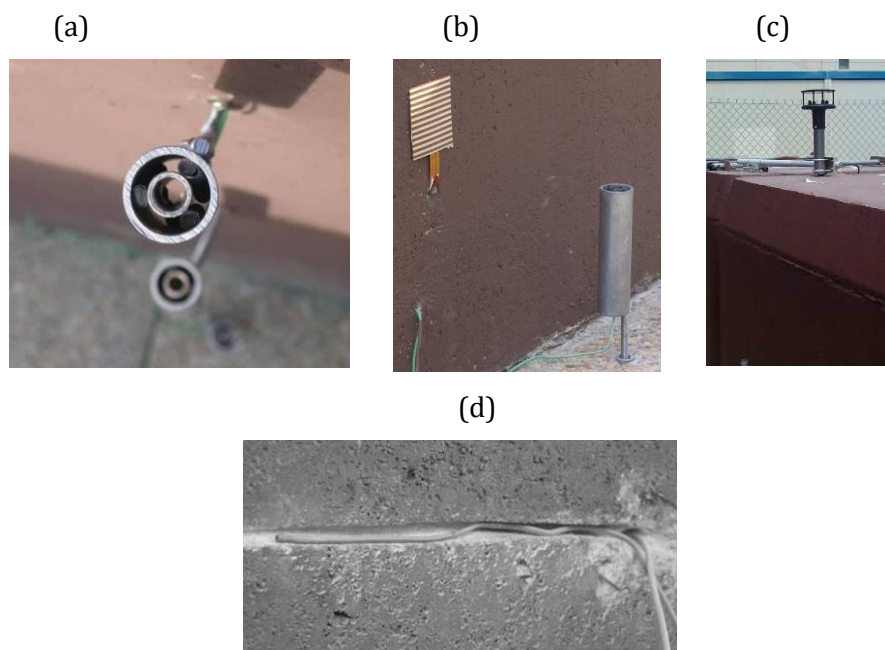


Figure 32 - thermocouples pour la mesure des températures d'air (a), fluxmètre de grandes longueurs d'onde (b), anémomètre sonique (c) et thermocouple de surface (d)

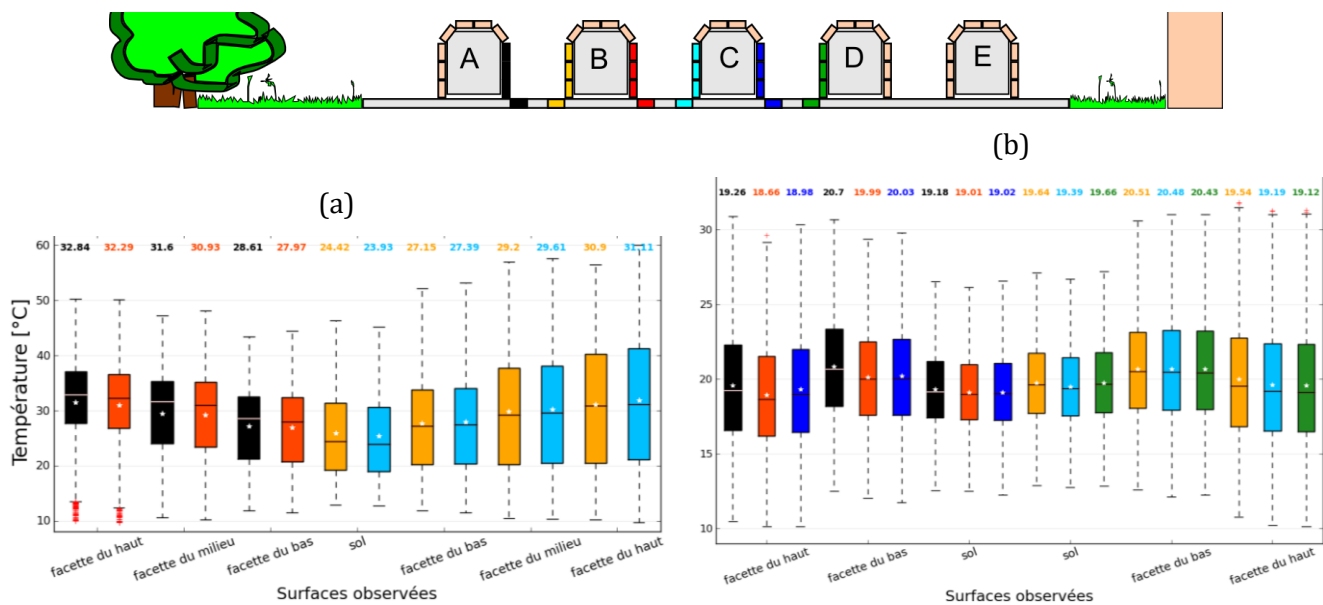


Figure 33 - vérification des températures de surface, en (a) phases diurnes et (b) nocturnes de la période de calibration (19-05-2009 au 29-06-2009), d'après (Doya, 2010)

Du point de vue des niveaux de température atteints, on note des valeurs plus élevées systématiquement en orientation ouest, en période nocturne ou diurne. On remarque également ici l'effet de confinement du canyon avec des valeurs minimales pour les températures de surface plus élevées, en particulier plus de 2°C d'écart sur les minimales des phases nocturnes (Figure 33b). Ceci est en partie dû au facteur de vue du ciel et donc au rafraîchissement nocturne limité.

Mesure du confinement dû à l'effet canyon

Au-delà de la mesure des effets de confinement thermoradiatif observé sur les distributions des températures de surface sur la hauteur de la rue (Figure 33), on retrouve aussi des effets sur les températures d'air (Figure 34c). Localement on mesure également la vitesse et la direction du vent au centre de la plateforme (Figure 34b) grâce à l'anémomètre sonique 2D (Figure 32c). Une station météo de référence a été installée à proximité sur un mât de mesure en toiture d'un bâtiment de l'université pour la température d'air, humidité relative, vitesse et direction du vent, rayonnement courtes et grandes longueurs d'onde (Figure 34a).

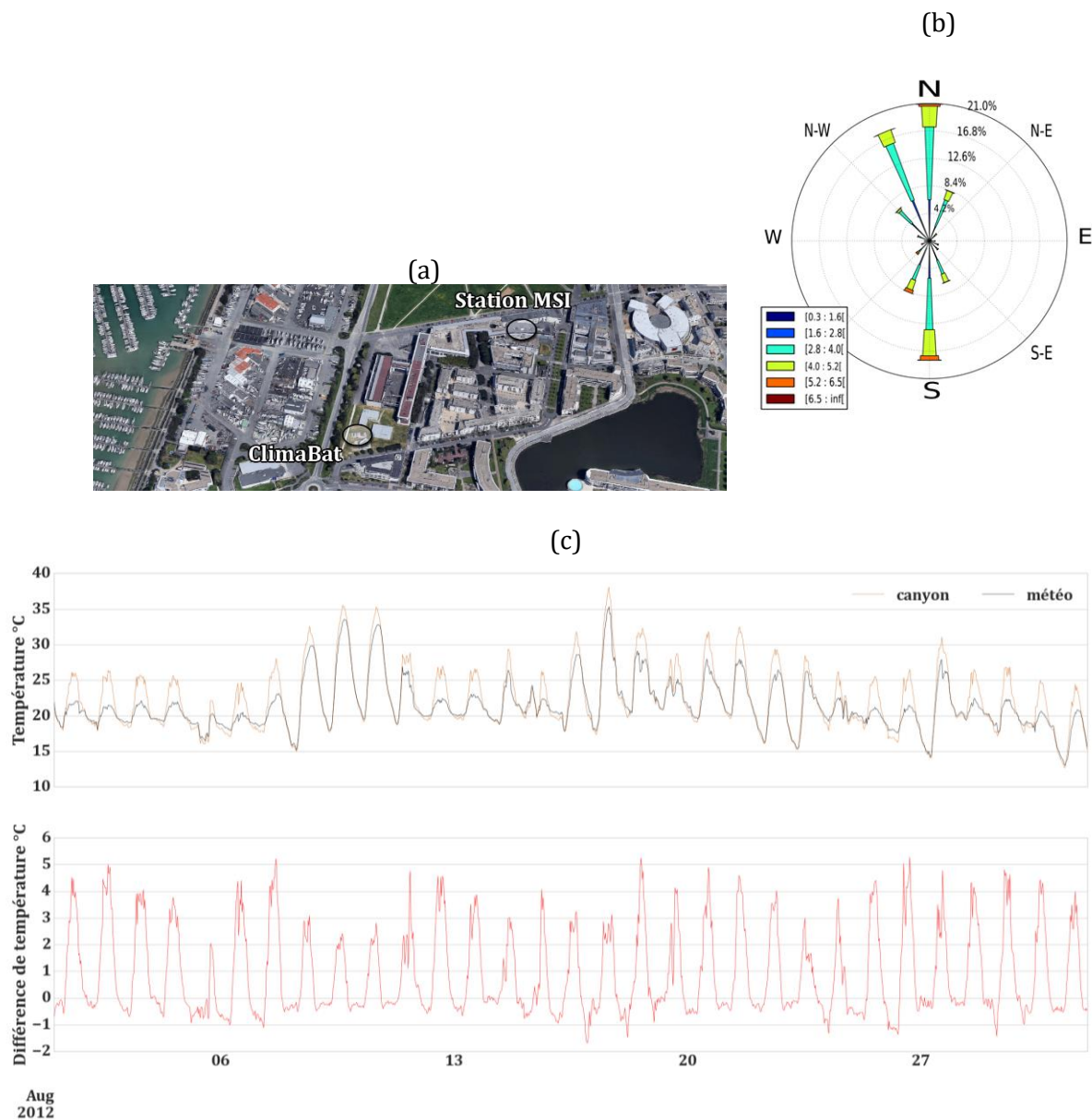


Figure 34 - (a) sites de mesures et (b) variations de températures et de l'écart, en site dégagé (toiture station MSI, météo de référence) et au centre d'un canyon de la plateforme ClimaBat, mois d'août 2012.

Les variations des températures en journée en toiture et dans le canyon montre que celles-ci sont, ici pour un mois d'août, systématiquement plus élevées (+5°C) dans le canyon en journée (Figure 34c). Cette surchauffe est due principalement aux effets du piégeage radiatif avec ici un effet limité de l'absorption des façades, la plateforme ayant été repeinte dans une seconde phase avec une peinture blanche d'albédo 0,64 (Doya et al., 2012b). Avec un effet d'inertie très faible de la plateforme, la nuit les températures en toiture (météorologie locale) et dans le canyon sont très proches, avec un léger sous-refroidissement, qui peut dépasser 1°C, du fait de l'effet du balayage des rues par les vents dominants de nord et de sud (Figure 34b), et de l'environnement proche de la plateforme très végétalisé. Cette source de rafraîchissement local (Figure 29) est détaillée par la suite dans l'analyse du potentiel de rafraîchissement passif de la végétalisation en site urbain.

Cette plateforme expérimentale permet donc de mettre en évidence des effets locaux de surchauffe liés au piégeage thermoradiatif et aux propriétés de surface des enveloppes bâties et de la chaussée, avec cependant des effets locaux liés à l'environnement proche qui ne sont pas complètement maîtrisables. Les résultats de la calibration qui démontrent la forte similitude du comportement thermique des maquettes de rues permettent cependant de développer des inter-comparaisons simultanées de dispositifs d'atténuation des effets de surchauffe locale à l'échelle d'un canyon. À plus grande échelle, du quartier à la ville, c'est l'association de ces effets locaux qui participe à la modification des microclimats urbains et c'est l'objet de la suite de ce travail.

2.3 Ilots de chaleur et bâtiments en milieu urbain

L'interaction des bâtiments à l'échelle d'une rue telle que présentée précédemment peut modifier sensiblement les conditions climatiques localement, mais aussi contribuer à la formation d'un microclimat urbain dont les mécanismes et la différence avec la donnée du climat régional a été très tôt décrite, en particulier par Howard (1818) dans ses travaux sur les mesures météorologiques : « *It appears that London does not wholly lose its superiority of temperature, by the extinction of most of the fires in Spring: on the contrary, it is resumed in a large proportion in the Sixth month, and continues through the warm season. [...] When we consider that radiation to the sky, the contact of fresh breezes, and evaporation, are the three principal impediments to the daily accumulation of heat at the surface, we shall perceive that a city like London ought to be more heated by the summer sun than the country around it.* ».

2.3.1 L'étude des ilots de chaleur à différentes échelles

Comme dans de nombreuses études du microclimat urbain, notre exploitation de mesures in-situ dans différents canyon urbains (Bozonnet et al., 2007; Georgakis and Santamouris, 2005) nous a permis de mettre en évidence les mécanismes de formation d'ilots de chaleur particulièrement critiques en période estivale. Les interactions plus fortes en condition de confinement à l'échelle de la ville, donc de vent faible, dépendent pourtant de paramètres intrinsèques hétérogènes difficiles à quantifier précisément et liés à l'espace construit (densité, morphologie, etc.) et à l'évolution des conditions météorologiques à plus grande échelle, ce qui peut accentuer les écarts aux mesures en dehors des centres urbains tels que mesurés. Avant d'aborder la modélisation de l'étude énergétique à l'échelle du quartier (Gros, 2013), il faut revenir sur les conditions de modification du climat à l'échelle de la ville.

L'îlot de chaleur urbain mesuré comme biais de mesure du climat

L'un des pionniers des mesures du microclimat urbain est certainement Howard avec son étude du climat de Londres au début du XIX^{ème} siècle (Howard, 1818). Howard est plus connu pour sa classification des nuages dès 1803, y compris l'identification du smog urbain. Mais son travail sur la précision des mesures météorologiques l'a amené à identifier des différences de températures entre le centre de Londres, mesures faites par la Royal Society, et les siennes pour différents sites ruraux autour de la ville (Plaistow à 6,4km à l'est, Tottenham, Stratford, et Clapton). Malgré l'imprécision des mesures réalisées, en partie due au placement des sondes de température, Howard identifie clairement l'effet d'îlot de chaleur urbain avec une différence de température moyenne annuelle de presque 1[K] sur 10 ans de mesures comme le montre la Figure 35.

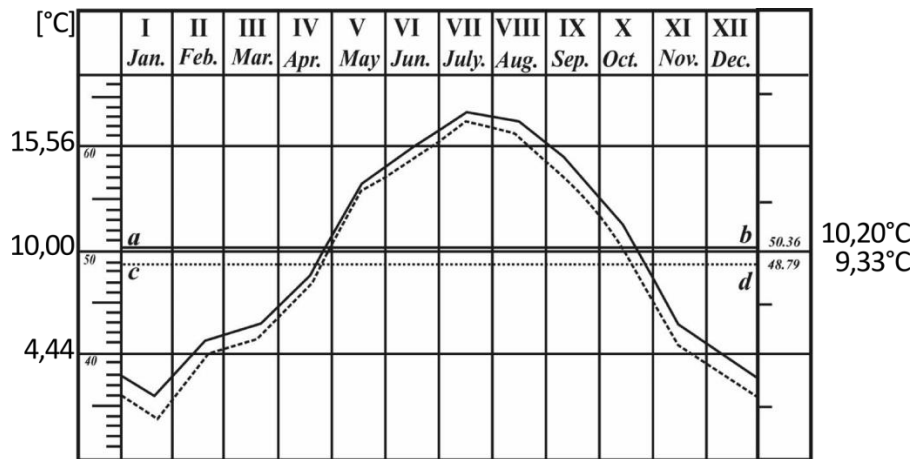


Figure 35 - Températures moyennes mensuelles (10 ans de 1807 à 1816) au centre de Londres (trait continu) et en milieu rural (tirets), d'après Howard (1818).

Cette évolution montre également que l'écart de température ΔT_{u-r} , entre le milieu urbain (u) et rural (r), est toujours positif tout au long de l'année. Si la valeur plus importante de ΔT_{u-r} en hiver peut être expliquée par les apports anthropiques liés aux dispositifs de chauffage, l'explication de son amplification en été, après un minimum au printemps, est plus complexe. Howard a parfaitement identifié les principales caractéristiques de la formation de ce microclimat urbain en été que sont le piégeage radiatif, le confinement des rues par rapport aux vents dominants, et la plus faible évapotranspiration des surfaces du fait de l'absence de terrain naturel et de végétaux. Cette analyse sera reprise de façon plus précise par différents sur les microclimats urbains comme par Renou pour la ville de Paris (Renou, 1858) qui a réalisé des mesures comparées de 1854 jusqu'à la fin du XIXème siècle, puis de nombreuses autres villes avec des mesures, des analyses et des synthèses de plus en plus précises, en particulier depuis les années 1930 par Kratzer (1956) et depuis les années 1970 par Oke (1987).

Ces nombreuses études des microclimats urbains sur de grandes villes ont également montré que les cycles de stockage et déstockage de la chaleur entraînent des effets sur ΔT_{u-r} plus importants en période nocturne en été (Howard, 1818; Kratzer, 1956; Oke, 1987; Renou, 1858).

Les campagnes expérimentales à l'échelle de la ville sont coûteuses et complexes à mettre en œuvre mais leur développement a permis de cartographier et de localiser plus précisément les îlots de chaleur urbains. Des mesures réalisées en 23 stations (Figure 36) pour la métropole de New-York en juin 1955 montrent clairement la corrélation entre les niveaux de température minimum et la zone urbaine dense, d'après Clarke (1972), où la zone grisée représente les territoires des villes de plus de 50 000 habitants.

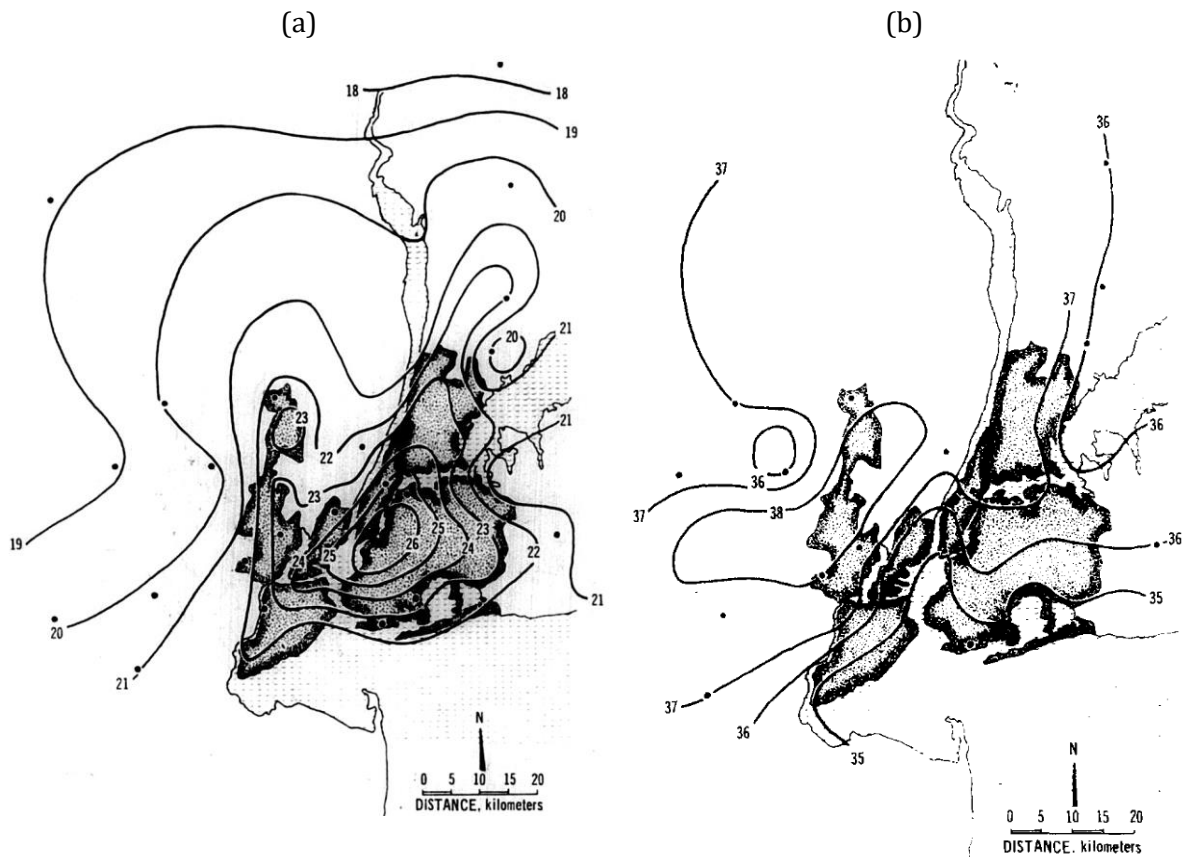


Figure 36 – cartographie des moyennes de température [°C] minimum (a) et maximum (b), pour la métropole de New York en juin 1955, pour 6 journées de mesures situées sur les repères (points) de la carte, d'après Clarke (1972).

Ce sont les températures moyennes minimales (Figure 36a), qui correspondent aux écarts ΔT_{u-r} maximum (de plus de 5°C dans ce cas). En revanche, on n'observe plus réellement de lien évident quant aux températures moyennes maximales et la densité de population (Figure 36b). Ceci s'explique par la configuration de la ville qui est située en bordure d'océan et bénéficie du rafraîchissement côtier, les niveaux de température étant naturellement amplifiés à l'intérieur des terres.

Les biais de mesure de l'îlot de chaleur urbain

Comme le montrent les Figure 36(a) et (b), l'îlot de chaleur urbain peut bien être visualisé sur les cartographies de température, mais pour le quantifier précisément il faudrait retrancher les variations de température liées à l'espace naturel. Ceci reviendrait à effectuer des mesures en l'absence de la ville, ce qui n'est pas directement possible. Cependant, l'analyse des relevés de température d'une trentaine de villes en Californie (États-Unis) entre 1920 et 1997 (Akbari et al., 2001) a montré que celles-ci constituaient des zones plus froides que le milieu rural environnant jusqu'en 1940, avec un réchauffement progressif pour arriver en 1997 à un écart ΔT_{u-r} de l'ordre de 2,5°C en moyenne.

Bilan d'énergie à l'échelle de la ville

Dans les modèles à l'échelle de la ville, le territoire urbain est considéré comme une surface modifiée par la présence des constructions et de la formation d'une canopée urbaine. On observe donc des niveaux de température d'air accrus du fait de l'amplification des flux de chaleur dans la sous-couche atmosphérique. L'analyse énergétique, présentée en particulier par Oke (1987), considère les différentes densités de flux rapportées à la surface au sol du milieu urbain :

- L'augmentation de l'éclairement solaire E_S [W/m^2] absorbé par inter-réflexions sur des surfaces développées plus grandes, comme dans le cas des formes de canyons urbains,
- L'augmentation de l'éclairement de grandes longueurs d'onde de la voûte céleste lié à la pollution atmosphérique, donc plus d'absorption et de réémission,
- La diminution du rafraîchissement nocturne par rayonnement de grandes longueurs d'onde des surfaces confinées vis-à-vis de la voûte céleste,
- La densité d'apports anthropiques φ_{anth} [W/m^2] liés en particulier aux bâtiments et au trafic,
- La densité de stockage de chaleur $\Delta\varphi_{abs}$ [W/m^2] accrue dans les matériaux de construction urbains et les bâtiments,
- La diminution des densités de flux latents φ_E [W/m^2] du fait en partie de l'imperméabilisation des surfaces,
- La diminution des densités flux de chaleur, sensible et latente, de par les renouvellements d'air atténués dans les rues confinées de type canyon.

Chacun de ces différents effets se retrouve dans les termes du bilan d'un élément de surface urbaine, considérée comme une surface rugueuse et incluant un ensemble de bâtiments (Figure 37).

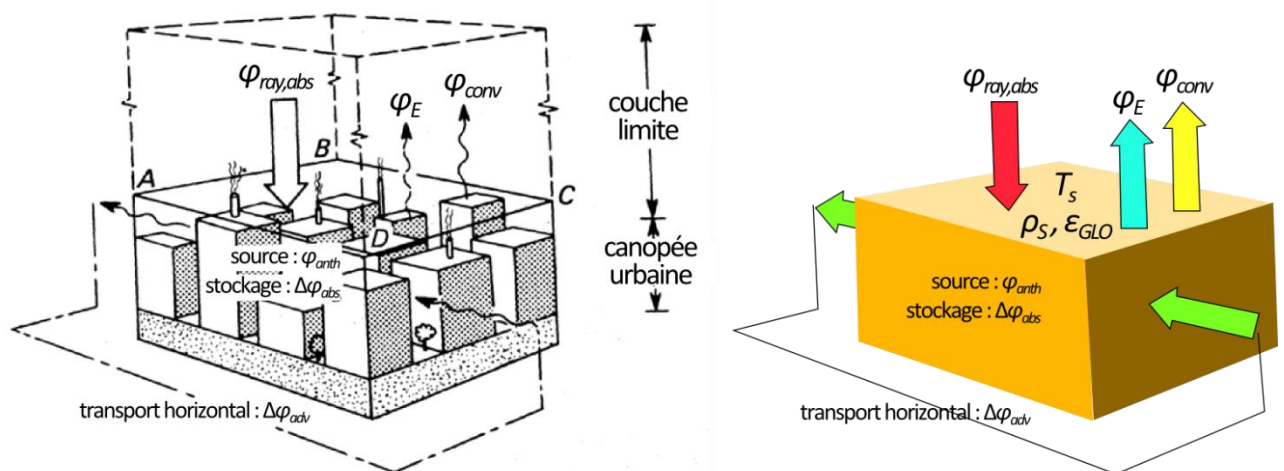


Figure 37 – représentation des différents termes du bilan énergétique pour une surface urbaine (projection ABCD), d'après Oke (1987)

Pour cette surface urbaine équivalente (Figure 37), le bilan thermique s'écrit donc en fonction des différents termes de densité de flux de chaleur représentés ici et repris dans l'équation (2-7) :

$$\varphi_{ray,abs} + \varphi_{anth} = \varphi_{conv} + \varphi_E + \Delta\varphi_{abs} + \Delta\varphi_{adv} \quad (2-7)$$

Avec ici :

- Le flux de chaleur lié au renouvellement d'air entre les bâtiments dû d'une part aux écoulements du vent entre les bâtiments, donc par advection $\Delta\varphi_{adv}$ [W/m^2] sous la canopée urbaine, et d'autre part aux échanges turbulents avec la couche limite urbaine de chaleur sensible φ_{conv} [W/m^2] et latente φ_E [W/m^2].
- L'éclairement absorbé net $\varphi_{ray,abs}$ [W/m^2] qui comprend les parts solaire (courtes longueurs d'onde) et de grandes longueurs d'onde. Ce flux absorbé peut s'exprimer en fonction de caractéristiques équivalentes de la canopée urbaine assimilée à une surface rugueuse de température équivalente T_s (K), d'albédo équivalent ou de réflectivité solaire ρ_s et d'émissivité thermique ε_{GLO} :

$$\varphi_{ray,abs} = (1 - \rho_s) \cdot E_S + \sigma \varepsilon_{GLO} (T_{ciel}^4 - T_s^4) \quad (2-8)$$

Avec T_{ciel} (K) température équivalente du ciel et σ [$W/(m^2K^4)$] constante de Stephan Boltzmann.

L'analyse des évolutions des températures menée par Howard au début du XIXème siècle avait également montré que l'intensité de l'îlot de chaleur caractérisée par la différence de température ΔT_{u-r} est généralement plus élevée la nuit que le jour (Howard, 1818). Cette variabilité a été étudiée plus précisément dans l'évolution des termes du bilan thermique de la canopée par des mesures réalisées par Christen *et al.* (2004), Figure 38, du 10 juin au 10 juillet 2002.

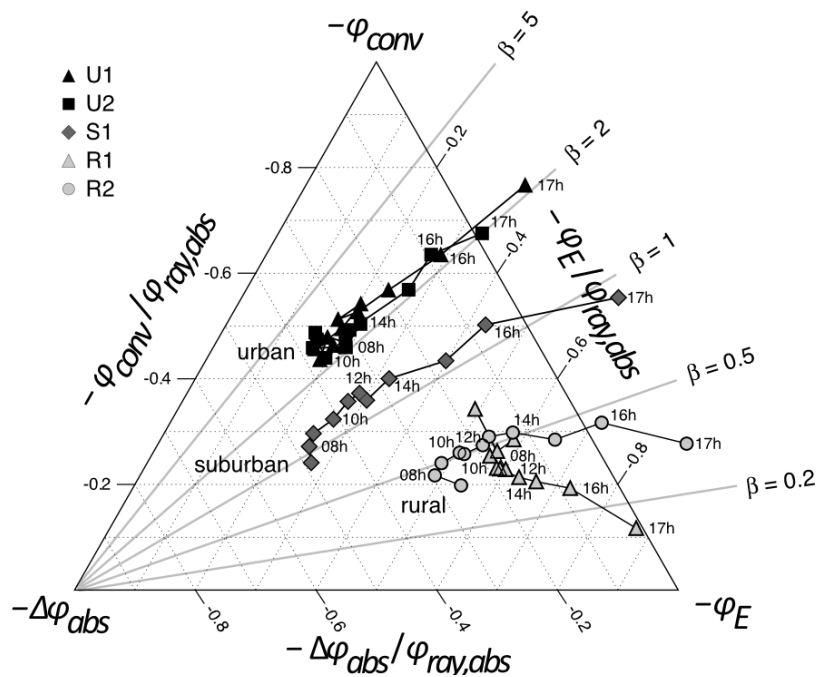


Figure 38 - variations journalières des termes du bilan thermique urbain pour un mois de mesures (juin à juillet 2002) en site urbain, périurbain et rural, pour la ville de Bâle (Suisse), d'après Christen et Vogt (2004).

Cette représentation illustre comment le rayonnement net absorbé $\varphi_{ray,abs}$ [W/m^2] se répartit entre φ_{conv} , φ_E et $\Delta\varphi_{abs}$ [W/m^2], sans considérer ici les termes d'advection $\Delta\varphi_{adv}$ et d'apport anthropique φ_{anth} [W/m^2] de l'équation de bilan (2-7). Ces deux derniers termes sont généralement plus faibles, en particulier pour ce cas d'étude en période estivale. En effet, d'après Taha (1997), les valeurs les plus fortes d'apport anthropique φ_{anth} sont observées en période hivernale du fait des déperditions de chauffage. Pour les principaux centres urbains américains, les valeurs sont de l'ordre de 70 à 210 W/m^2 en hiver et de 20 à 40 W/m^2 en été ; valeurs faibles en comparaison d'un éclaircissement solaire de l'ordre de 700 à 1 000 W/m^2 par ciel clair. Des effets locaux sur l'augmentation de l'îlot de chaleur, de l'ordre de 2 à 3°C, ont cependant été observés grâce à des simulations réalisées par Taha (1997). Par ailleurs, les zones urbaines denses se distinguent sur le terme φ_E qui représente en journée de l'ordre de 20% de $\varphi_{ray,abs}$ alors qu'en site périurbain il est de l'ordre de 30% et de 60% en site rural. Ce terme est directement corrélé à la surface réduite de végétation en site urbain. Cet effet de la végétation peut également être corrélé au ratio de Bowen $\beta = \varphi_{conv} / \varphi_E$ qui caractérise également les différences entre les 3 typologies de site. Ici, la ville absorbe plus d'énergie principalement en raison de son plus faible albédo ρ_s et de la réduction de l'évapotranspiration due au taux de végétation réduit. Le stockage de chaleur $\Delta\varphi_{abs}$ est également plus fort à cause des constructions. Ce dernier terme entraîne la nuit un déstockage (valeurs négatives de $\Delta\varphi_{abs}$) qui explique l'augmentation de la densité de flux de chaleur sensible φ_s , plus que doublée la nuit par rapport au milieu rural. Ceci a pour conséquence d'entraîner l'augmentation de l'îlot de chaleur observé la nuit.

Modélisation des flux liés aux vents dominants de l'échelle de la ville à l'échelle du quartier

La modélisation des effets du vent à l'échelle de la ville permet d'établir des conditions moyennes et des profils de vent dans la couche limite atmosphérique urbaine, en considérant l'ensemble des bâtiments comme une surface rugueuse, décrite par exemple par des paramètres de rugosité ou de porosité équivalente variables en fonction des quartiers ou lots de bâtiments. À partir des résultats de cette approche méso-échelle, il est possible d'imbriquer localement un modèle permettant la description tridimensionnelle des constructions urbaines, des transferts et des conditions thermo-aérodynamiques à petite échelle. Sous la canopée urbaine, la modélisation détaillée des transferts thermo-aérodynamiques, comprenant les termes d'advection (Figure 37), du bilan thermique de l'échelle de la ville au quartier et à la rue, peut être approchée finement par les méthodes numériques de résolution des équations de Navier-Stokes. Cette approche a par exemple été adoptée dans le cadre du développement de l'outil Solene-Microclimat intégrant l'outil CFD code Saturne (Bouyer et al., 2011; Gros et al., 2016a; Malys, 2012). Cela nécessite des temps de calculs très importants non seulement par le grand volume étudié et la finesse du maillage requis pour la modélisation des écoulements turbulents, mais aussi par la large veine numérique à développer autour du domaine d'étude pour une direction de vent dans la canopée urbaine (Figure 39).

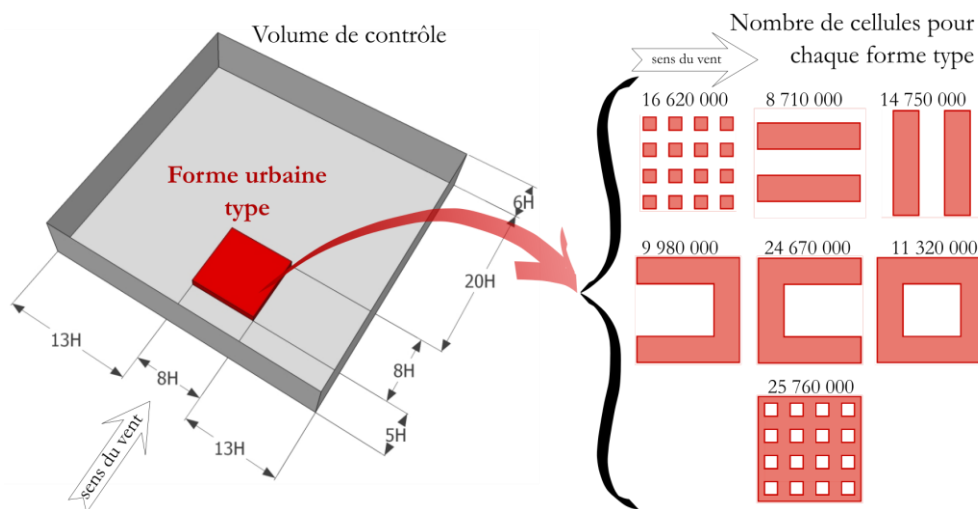


Figure 39 – taille du volume de contrôle et nombre de cellules nécessaires au maillage pour différentes formes urbaines types dans une veine numérique CFD, d'après (Merlier, 2015)

En fonction de la dimension caractéristique de l'obstacle, ici la hauteur H [m] de la forme urbaine type, les limites du volume de contrôle sont définies et le maillage irrégulier est raffiné près du sol, de l'ordre de 1m, et près des bâtiments, jusqu'à 15cm. L'obtention de solutions fiables nécessite alors de très grands nombres de cellules, $2,576 \cdot 10^7$ ici, et d'itérations, jusqu'à 6 000 pour cette étude, et donc un temps de calcul de plusieurs jours à plusieurs semaines. Cette approche CFD présente pourtant l'avantage de permettre l'expérimentation numérique de différentes configurations types avec un détail fin des écoulements dans les couches limites sous la canopée urbaine.

Elle est donc complémentaire des expérimentations in-situ ou en soufflerie, mais le temps de calcul coûteux pour l'étude précise d'un quartier dans son ensemble rend difficile sa mise en œuvre dans un outil d'étude à l'échelle du quartier. Sur la base de simplifications incluant en particulier des niveaux de description des bâtiments et des périodes limitées, des outils tels qu'ENVI-met ou Solene-Microclimat permettent cependant l'utilisation de ce type d'approche fine (Bozonnet et al., 2015; Gros et al., 2016a; Musy et al., 2011).

De la même manière que pour l'approche à l'échelle du canyon urbain précédemment, nous avons adopté une modélisation basée sur une approche semi-empirique des écoulements dus aux vents dominants. L'extension à l'échelle du quartier de notre modélisation est ici basée sur un zonage empirique de la canopée urbaine déduit de la connaissance des différents types et limites de domaines d'écoulement. Cette approche initialement proposée par Röckle a été développée par la suite (Kaplan and Dinar, 1996; Pardijak et al., 2004; Rockle, 1990) et permet d'identifier a priori des zones d'écoulement telles que représentées à la Figure 40.

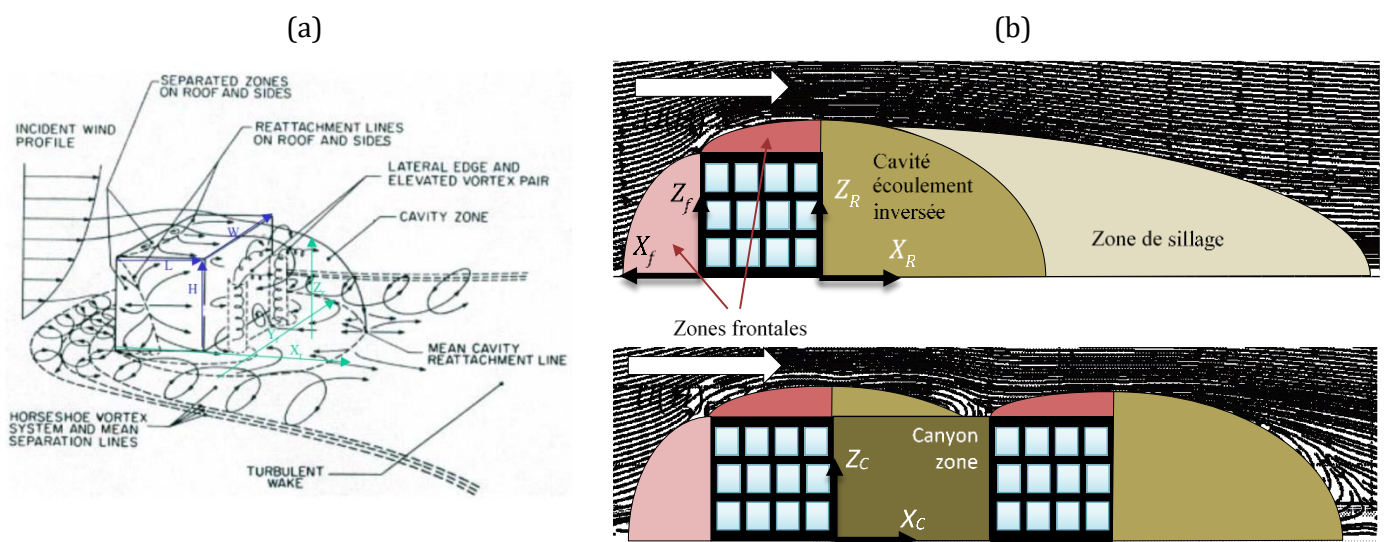


Figure 40 - (a) description des zones d'écoulement autour d'un bâtiment isolé d'après (Hosker, 1984), et (b) identification géométrique des zones avec ou sans effet d'interférence et formation d'une zone canyon d'après (Rockle, 1990)

Pour un élément isolé les formes d'écoulement et les zones de turbulence sont clairement identifiables (Figure 40a) et leurs limites déterminées assez précisément en fonction des paramètres géométriques en fonction de l'incidence du vent dominant (Figure 40b). La généralisation de cette approche permet d'aborder l'interférence de bâtiments entre eux, avec la formation de zones de recirculations variables, comme dans le cas de canyons urbains (Figure 40b).

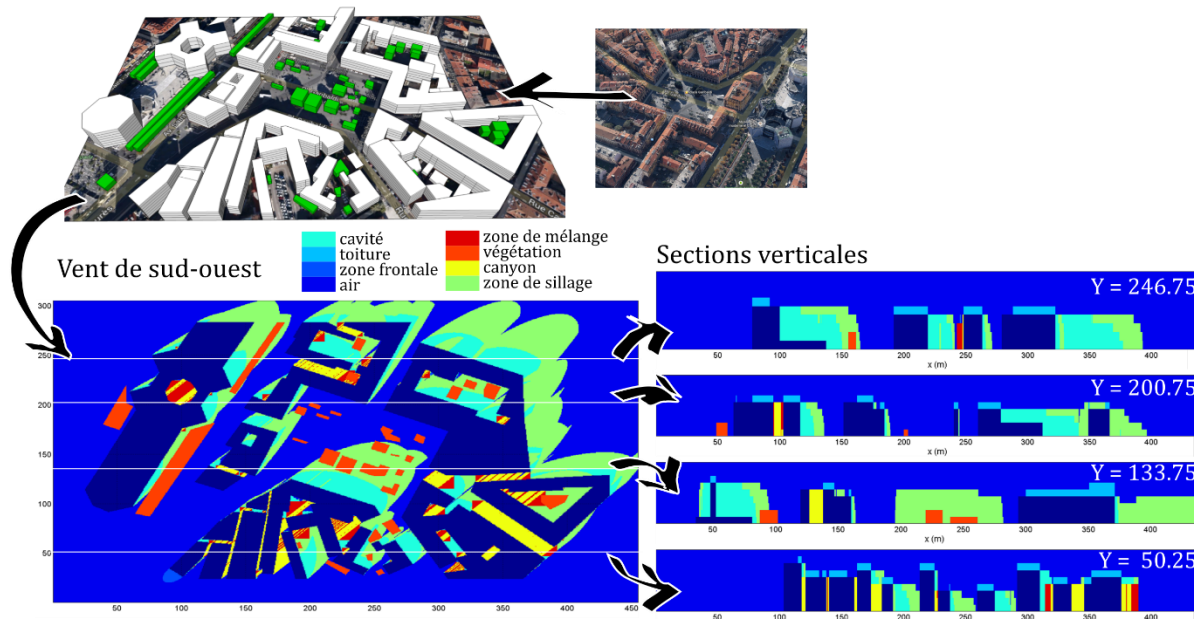


Figure 41 - vue en plan du zonage de la canopée à 1,5 m du sol et coupes verticales pour un vent dominant de sud-ouest pour le square Garibaldi (Nice) d'après (Doya et al., 2014b)

Appliqué à l'échelle d'un quartier, ce zonage doit être adapté à chaque pas de temps selon la direction de vent donnée en conditions limites de la veine numérique d'écoulement. Comme dans l'approche CFD précédente le profil de vent du site urbain doit être donné en conditions limites, soit à partir d'un profil empirique fonction des paramètres de rugosité du site urbain, soit avec la possibilité d'une meilleure précision par l'imbrication du domaine dans un domaine plus large modélisé de façon simplifié. Cette approche permet toutefois de conserver le même volume de contrôle quelle que soit la direction du vent dominant sans création d'une veine numérique adaptée à chaque direction.

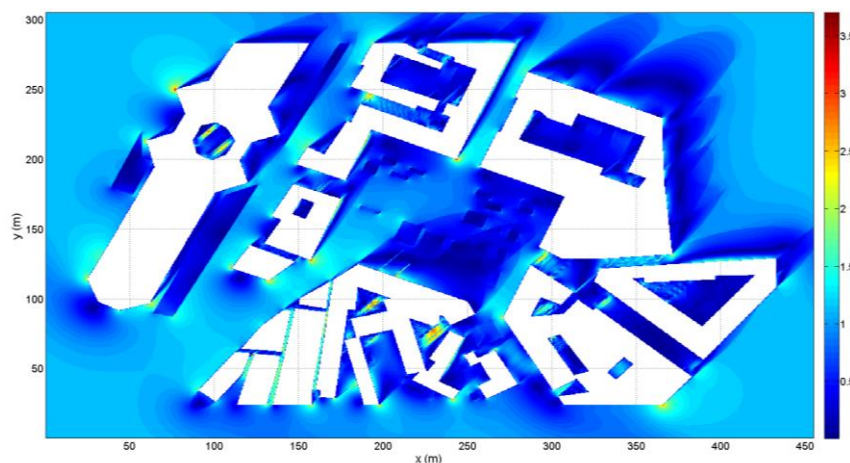


Figure 42 - amplitudes des vitesses du vent [m/s] à 1,5m du sol pour le square Garibaldi (Nice) et une direction de sud-ouest, d'après (Doya et al., 2014b)

Le champ moyen de vitesse est alors calculé (Figure 42) à partir des profils de la vitesse moyenne définis empiriquement pour chaque typologie de zone, en fonction des paramètres géométriques uniquement (Kaplan and Dinar, 1996; Rockle, 1990), puis pondéré pour satisfaire l'équation de continuité selon une méthode proposée par Sherman (Sherman, 1978). La comparaison avec des modèles de CFD et des mesures expérimentales en soufflerie ont permis de vérifier la validité des résultats de ce modèle (Booth, 2012; Bowker et al., 2004). Cette approche permet une estimation rapide et détaillée du champ de vitesse à l'échelle d'un quartier en conditions isothermes et a été intégrée dans l'outil QuicUrb utilisé par la suite (Pardysak and Brown, 2003), mais aussi dans l'outil MicroSWIFT d'Aria Technologies (Moussafir et al., 2004).

Notre modélisation du microclimat local est alors abordée pour un quartier avec un niveau de détail tridimensionnel des surfaces urbaines relativement simplifié, comme dans l'exemple du square Garibaldi (Figure 41). Aux abords des bâtiments et sur l'ensemble du quartier, on peut donc calculer pour l'ensemble de la période d'étude, typiquement une saison d'été ou une année complète, et pour un pas de temps horaire, les deux principales composantes à grande échelle :

- Calcul du champ de vitesse de l'écoulement moyen en conditions isothermes, le maillage de la canopée urbaine est ici régulier (de type hexaédrique avec l'outil QuicUrb),
- Le rayonnement solaire incident et absorbé par les surfaces urbaines, dont le maillage surfacique est adapté aux variations de propriétés radiatives mais également affiné (par triangulation avec l'outil Solene) dans les espaces confinés nécessaire pour la prise en compte des effets de masque et de facteur de vue du ciel.

Le couplage de ces deux composantes du microclimat local sur le bilan des surfaces urbaines nécessite alors de faire correspondre les différents maillages volumiques et surfaciques et d'intégrer l'ensemble dans une approche de couplage asynchrone à la modélisation dynamique des transferts de chaleur par convection, conduction et rayonnement de grandes longueurs d'onde dans la canopée urbaine mais aussi à l'intérieur des bâtiments. Cette problématique de couplage, que l'on a abordée par ailleurs dans le développement de plateformes de modélisation du bâtiment (Sempy et al., 2007) a été développée par la suite dans l'ensemble des modèles pour EnviBatE (Gros, 2013) sous la forme d'un couplage dynamique pour l'ensemble des phénomènes locaux avec une description zonale détaillée de l'ensemble des volumes et des surfaces à l'échelle du quartier.

2.3.2 Développement d'une approche intégrant l'environnement urbain dans la conception de l'enveloppe du bâtiment performante énergétiquement – EnviBatE

De même qu'à l'échelle de la rue (§2.2), la modélisation des bilans des échanges thermiques dans la canopée urbaine (Figure 37) peut mettre en évidence la contribution anthropique et les interactions des bâtiments et des systèmes de climatisation avec le microclimat urbain, comme dans l'étude menée par De Munck (2013) à l'échelle de la ville de Paris (Figure 43).

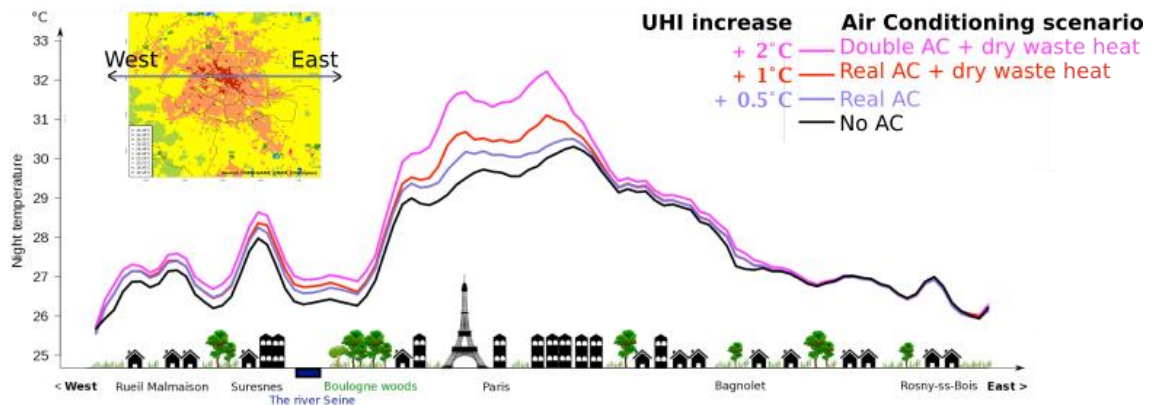


Figure 43 – Effet anthropique des systèmes de climatisation sur l'îlot de chaleur urbain nocturne à Paris pour la situation actuelle (+0,5°C), la situation si les systèmes étaient tous air/air (+1°C), et si le volume de bâtiments climatisés doublait (+2°C), d'après (de Munck et al., 2013).

Cette approche par modélisation permet d'une part de retrouver le phénomène d'îlot de chaleur urbain avec des différences observables de température plus fortes en période nocturne (§2.3.1). Cela permet alors d'estimer la part des apports anthropiques à une augmentation maximale de 0,5°C dans cette évolution spatiale d'ouest en est ; augmentation limitée du fait des installations de climatisation qui n'interagissent pas toutes directement avec l'air extérieur puisque certaines utilisent la Seine comme source chaude. Dans le cas contraire, le phénomène simulé d'îlot de chaleur double d'intensité (+1°C, Figure 43), et pourrait passer à +2°C si le volume de bâtiments climatisés était doublé. Cette augmentation du phénomène d'îlot de chaleur est d'autant plus critique qu'elle contribue à dégrader la performance énergétique des bâtiments (Figure 44), avec un coefficient de performance des climatiseurs qui se dégrade pour des températures plus élevées dans les centres urbains (Santamouris and Adnot, 2004).

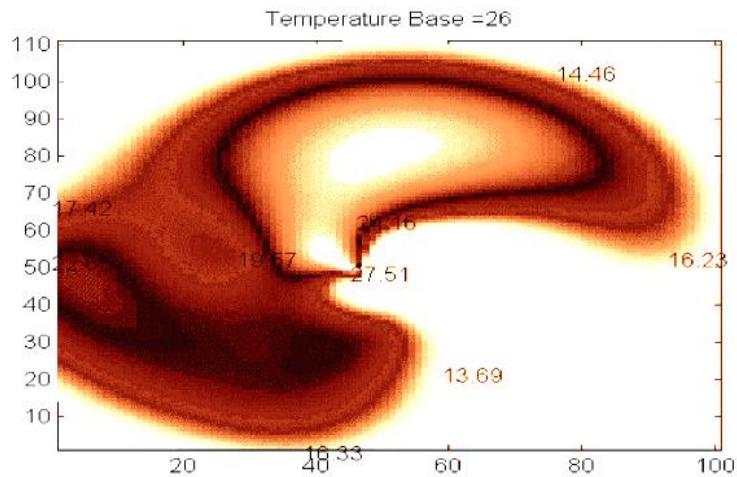


Figure 44 – variation spatiale du pic de besoin de climatisation [kW] à Athènes (août 1996) pour une température de consigne de 26°C, d'après (Santamouris et al., 2001)

Notre développement de modèles couplés, EnviBatE (Gros, 2013), à l'échelle intermédiaire de l'îlot urbain, au-delà de l'approche précédente du canyon urbain, a pour objectif d'étudier plus finement les interactions locales, et d'affiner la conception des bâtiments et le traitement des surfaces urbaines. C'est donc à partir du découpage de type multizone des bâtiments que le zonage de l'environnement intérieur/extérieur et des surfaces est réalisé pour les différents outils de modélisation puis couplé à l'approche zonale (Figure 45).

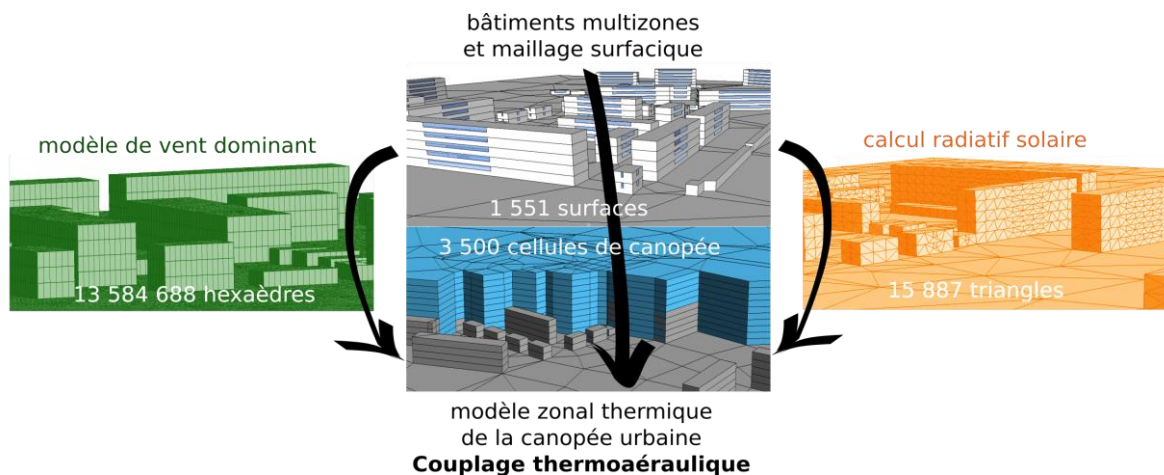


Figure 45 – Maillages adaptés aux différents modèles, partant de la description multizone des bâtiments au modèle zonal complet, et ordre de grandeur des maillages pour un cas d'étude de 136 000m² (Gros, 2013)

La correspondance entre le maillage fin utilisé pour décrire les champs de vitesse dus aux vents dominants et le maillage zonal grossier de la canopée urbaine est réalisée a priori pour permettre d'intégrer les vitesses et de calculer le débit massique aux interfaces du maillage zonal. La correspondance géométrique n'étant pas parfaite, le résidu des interpolations est redistribué pour respecter les conditions de conservation de la masse. Pour le rayonnement solaire, le maillage triangulaire est lui directement issu du maillage surfacique adapté au modèle zonal (nécessaire pour

la définition des variations des propriétés radiatives) et l'intégration par élément de surface est ici simplifiée pour le couplage des outils.

Modélisation thermique dynamique des bâtiments

La modélisation détaillée des bâtiments inclut la composition multicouche des parois, les gains liés aux apports internes et aux systèmes ainsi que les modes de ventilation sous forme de scénarii adaptés à chaque zone. L'ensemble des transferts est réduit sous la forme de la méthode des facteurs de pondération développée pour le calcul des besoins de chauffage de bâtiment (Depecker et al., 2001; Rousseau, 1978) et qui a été adaptée ici pour le calcul de la réponse en puissance ou en température d'un local en fonction des sollicitations extérieures, décomposées en excitation élémentaire (Figure 46).

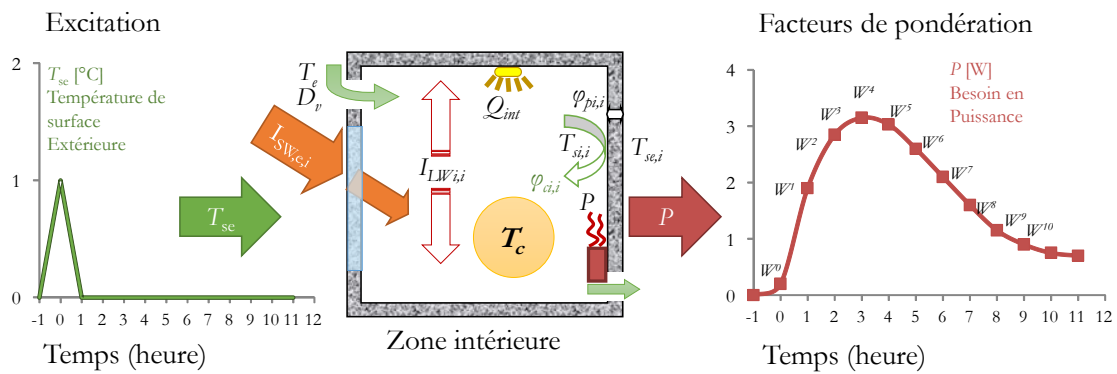


Figure 46 – Calcul des facteurs de pondération d'une zone intérieure pour une excitation extérieure donnée, ici la température de surface extérieure d'une paroi d'orientation donnée

Les données thermophysiques de l'ensemble des bâtiments permet donc de caractériser avant les simulations leur n facteurs de pondération W_E^n (Watts si la réponse recherchée est le besoin de climatisation ou chauffage) pour chaque excitation E et pour chaque pas de temps n , limités à N_p valeurs en fonction de la précision recherchée et de l'inertie du système. On peut alors retrouver en régime dynamique la réponse thermique Q_E^t [W] induite par chaque excitation E au pas de temps t à partir des N_p facteurs de pondération :

$$Q_E^t = \sum_{n=0}^{N_p} W_E^n E^{t-n} \quad (2-9)$$

Pour une consigne de température intérieure T_c^t , le besoin total en puissance P^t en fonction de l'ensemble des réponses thermiques Q^t , du débit de ventilation D_v d'air extérieur à la température $T_{e,k}^t$ et des charges internes Q_{int} peut alors s'exprimer par :

$$P^t = \rho c_p V \frac{dT_c^t}{dt} + \rho c_p D_v (T_c^t - T_{e,k}^t) - Q_{int}^t - Q_{LW}^t - Q_{T_c}^t - \sum_{j=1}^{N_p} Q_{T_{se,j}}^t \quad (2-10)$$

On peut décrire alors de façon linéaire l'ensemble du système associé à une cellule, zone intérieure de bâtiment, selon des nœuds de calcul liés aux sollicitations extérieures (Figure 47).

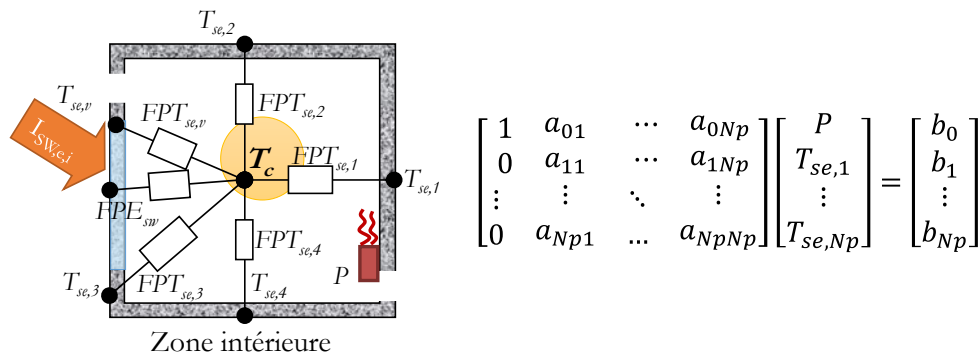


Figure 47 – modèle nodal équivalent et système linéaire issu des bilans thermiques à chaque nœud et à coupler aux sollicitations extérieures pour une zone intérieure donnée

Les termes a_{ij} et b_{ij} du système matriciel s'expriment linéairement (Gros, 2013) en fonction :

- Pour a_{ij} et b_{ij} de termes intrinsèques au bâtiment et déterminés en amont de la simulation comme les facteurs de réponse des parois (Mitalas and Stephenson, 1967; Rousseau, 1978),
- pour b_{ij} on ajoute des termes potentiellement variables au cours du temps, selon des scénarii qui sont généralement fixés en amont, comme par exemple les débits de ventilation, les consignes de température, ou les éclairagements solaires incidents.

Les paramètres du système matriciel à résoudre évoluent donc selon les scénarii et sollicitations non couplées, tandis que les termes de couplage du bâtiment au microclimat et aux autres bâtiments doivent être résolus dans le système couplé complet.

Couplage dynamique complet du quartier

Le couplage dynamique de l'ensemble des phénomènes est représenté dans le schéma général de la méthode adoptée (Figure 48) et est structuré par le système d'équations couplées défini par :

- Les résultats précédents (Figure 45) des calculs solaires et de vent dominant dans la canopée,
- L'ajout des modèles de zone pour constituer l'ensemble multizone des bâtiments par l'ajout des modèles nodaux (Figure 47),
- Un modèle zonal de bilan entre zones extérieures pour l'ensemble des cellules de la canopée urbaine.

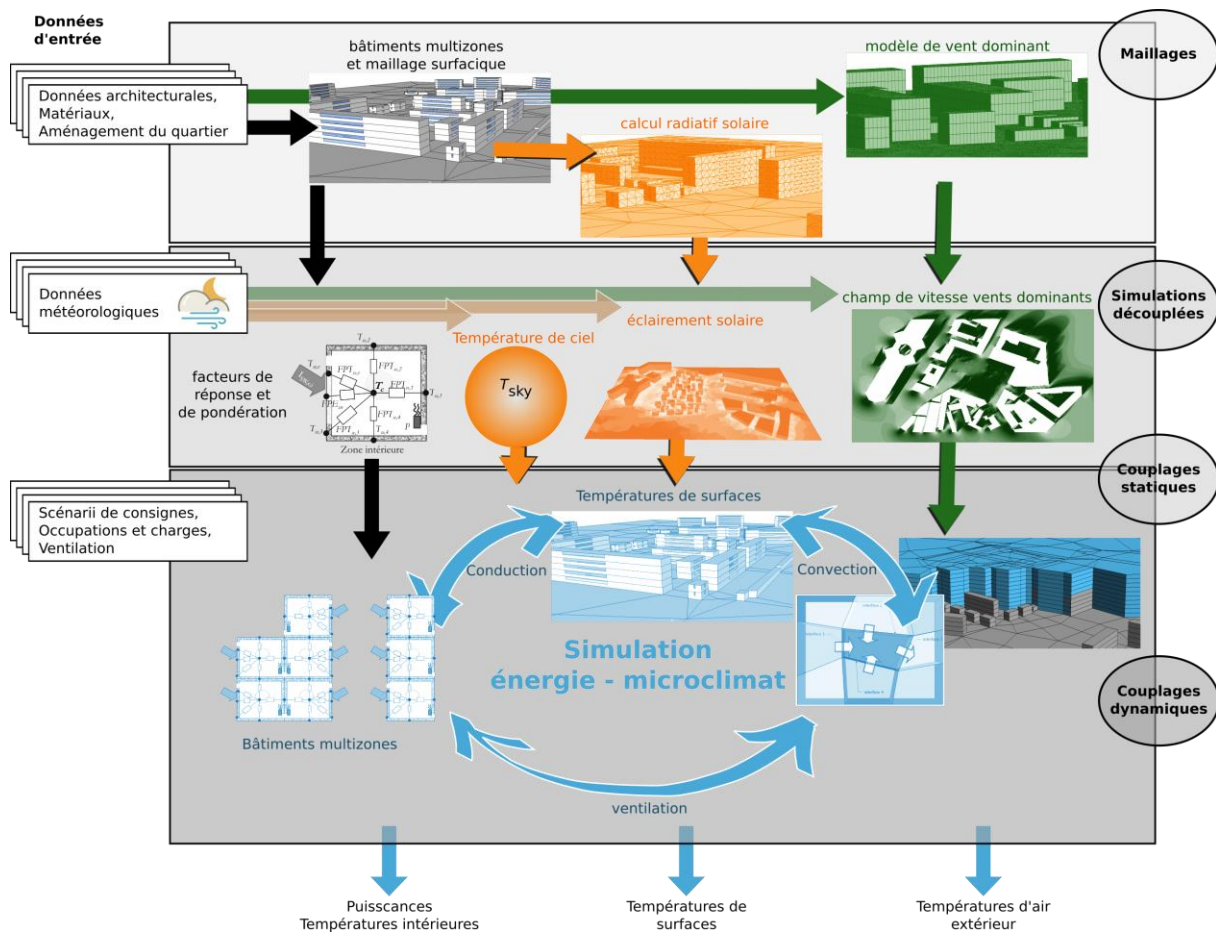


Figure 48 – Synthèse du fonctionnement général d'EnviBatE (Gros, 2013)

La structuration de la méthode développée (Figure 48) se base sur une extension de l'étude des besoins énergétiques et du traitement des ambiances intérieures. Pour à la fois améliorer la précision de modélisation, et étendre le domaine d'étude, on peut envisager que les futurs développements portent sur :

- L'extension du domaine géométrique au-delà de l'îlot, envisageable d'une part du fait des perspectives d'amélioration des performances de calcul (l'outil n'étant à ce jour pas optimisé), et d'autre part par la possibilité d'imbriquer la modélisation avec un outil méso-échelle.
- La modélisation plus fine des systèmes énergétiques et de leur rendement,
- La prise en compte des impacts et rétroactions des équipements et de leurs unités extérieures de toiture ou de façade sur le microclimat qu'ils soient individualisés ou gérés en réseaux urbain de quartier ou à plus grande échelle.

Pour ces développements se pose cependant la question de la sensibilité aux phénomènes pris en compte et des degrés de couplage nécessaires ainsi que les possibilités de simplification nécessaires pour permettre l'intégration des outils développés dans des démarches d'analyse multicritère et d'optimisation.

3 DISPOSITIFS DE RAFFRAICHISSEMENT PASSIF DES BÂTIMENTS ET DES ILOTS URBAINS – TRAITEMENT DES ENVELOPPES

Nos études expérimentales et nos modélisations de l'interaction de la performance énergétique des bâtiments couplées avec les conditions thermoaérauliques de l'environnement proche, présentées à la partie précédente, doivent permettre de mieux comprendre les mécanismes et les possibilités d'optimiser la conception des constructions pour limiter les effets négatifs d'îlot de chaleur local. Les techniques connues pour limiter les besoins de climatisation des bâtiments en site isolé et/ou mettre en œuvre des techniques de rafraîchissement passif peuvent être étendues au bâti en contexte urbain. Pour cela, il est nécessaire de prendre en considération les différentes échelles du problème et les interactions des différents phénomènes de transfert aptes à limiter l'augmentation des températures de surface et/ou d'air et des flux de chaleur sur les environnements intérieurs et extérieurs (Figure 49) : évaporatifs, radiatifs, liés à l'inertie et à l'isolation thermique, et thermoaérauliques.

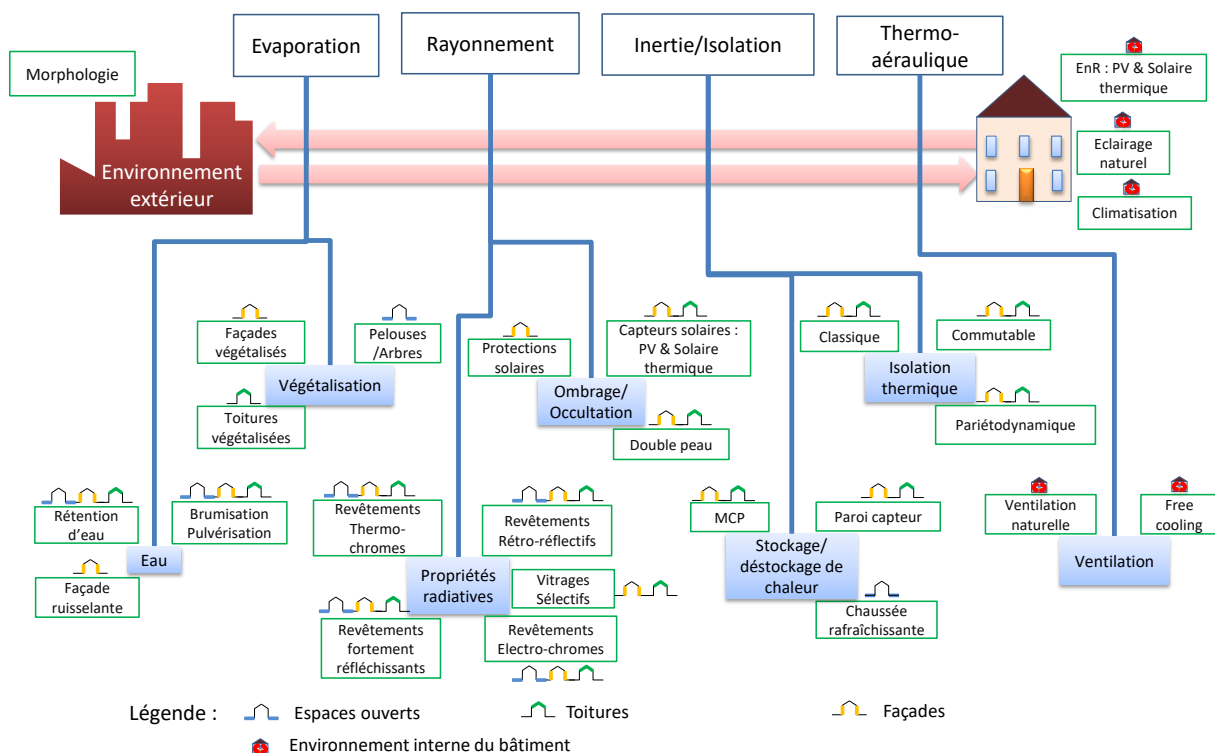


Figure 49 – techniques de rafraîchissement passif des bâtiments et des îlots de chaleur urbains

Nous nous sommes principalement intéressés aux possibilités de traitement des surfaces urbaines (façade, toiture et chaussées) du point de vue d'une part du traitement radiatif extérieur, et d'autre part des effets de la végétalisation. Ces traitements des surfaces des enveloppes des

bâtiments ont cependant une efficacité qui est parfois fortement interdépendante d'autres paramètres d'enveloppe, tels que l'isolation ou l'inertie thermique (Figure 49) et complémentaire avec les possibilités de freecooling par ventilation naturelle ou de sur-ventilation nocturne.

3.1 Traitement radiatif des toitures et façades

L'albédo des surfaces urbaines est souvent faible, tout en restant du même ordre de grandeur ou légèrement supérieur à celui des zones rurales environnantes, comme le souligne Taha (1997) avec des valeurs de l'ordre de 0,15 à 0,20 pour les villes européennes et américaines, alors que les villes d'Afrique du nord ont des valeurs plus élevées de l'ordre de 0,30 à 0,45. Le bilan d'absorption à la surface terrestre, de l'ordre de 51% par la surface et 19% par l'atmosphère et les nuages, est donc modifié en site urbain (Figure 50a).

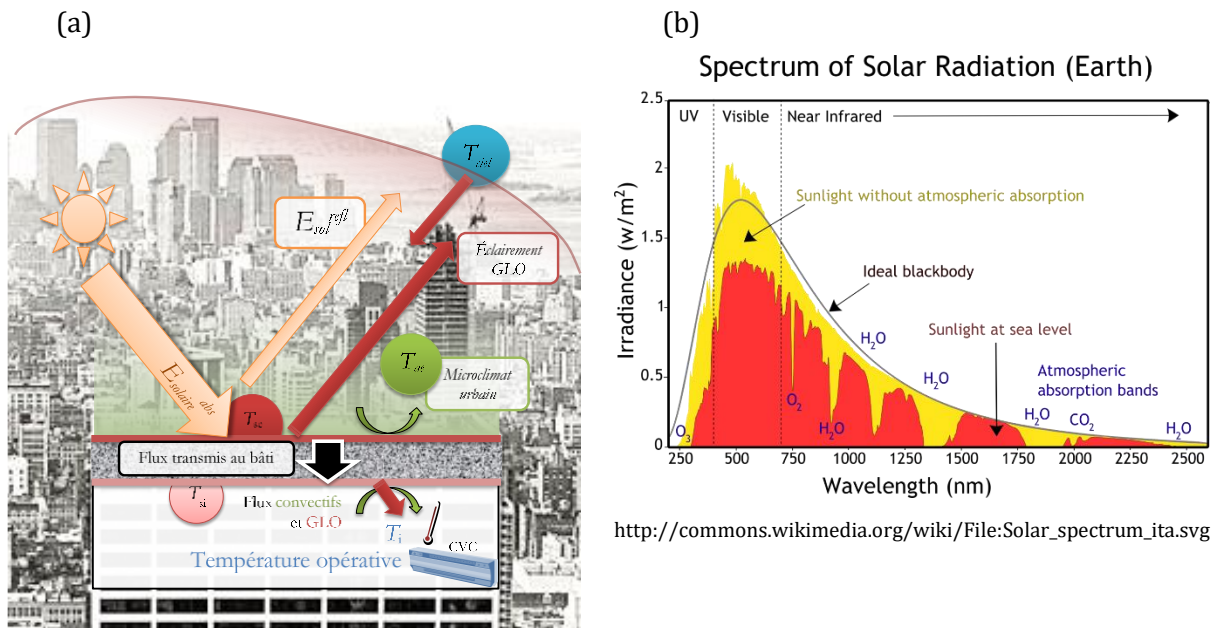


Figure 50 - (a) flux solaire transmis au bâti et à la canopée urbaine et (b) spectre solaire

L'albédo des surfaces est différent, mais le spectre solaire standard donné pour une situation en ciel clair et en dehors des perturbations urbaines (Figure 50b), est également modifié par la couche atmosphérique urbaine et atténué à nouveau par bandes en fonction des effets des polluants en suspension et de l'éventuel smog urbain (lié à la formation d'ozone). L'analyse montre cependant des effets contradictoires de limitation des apports directs (turbidité de l'air accrue liée à la pollution, effets de masques liés à la morphologie et à la densité) avec également une absorption de chaleur plus forte (couche atmosphérique limitant le rafraîchissement radiatif nocturne, absorption accrue et piégeage radiatif des constructions). Ainsi, le flux absorbé par les surfaces urbaines participe au réchauffement du microclimat local par convection, à hauteur de 47% environ à l'îlot de chaleur urbain de Tokyo d'après Kondo (2006). De plus, l'augmentation de température apparente de la voûte céleste contribue directement et fortement au développement des îlots de chaleur. On l'observe particulièrement en période nocturne du fait de l'inertie thermique des matériaux et du rayonnement thermique de grandes longueurs d'onde.

Pour limiter le piégeage de chaleur lié à l'ensoleillement en site urbain la solution que nous avons étudiée est l'augmentation de l'albédo des surfaces, en particulier les toitures et les chaussées qui sont les plus directement exposées en conditions estivales. L'effet pénalisant de la perte du gain solaire en hiver du fait de cette modification d'albédo est généralement limité car les durées quotidiennes d'ensoleillement sont alors plus courtes (période diurne plus courte, couverture nuageuse plus fréquente pour certaines régions), les angles d'incidence plus faibles sur ces surfaces horizontales ou de faible inclinaison (hauteur solaire diminuant avec la latitude), et des périodes éventuelles de couverture neigeuse en toiture ou chaussée (rarement prise en compte dans les simulations thermiques dynamiques des bâtiments). Cette solution peut donc être également avantageuse en climat tempéré à froid (Hosseini and Akbari, 2016; Wang et al., 2016).

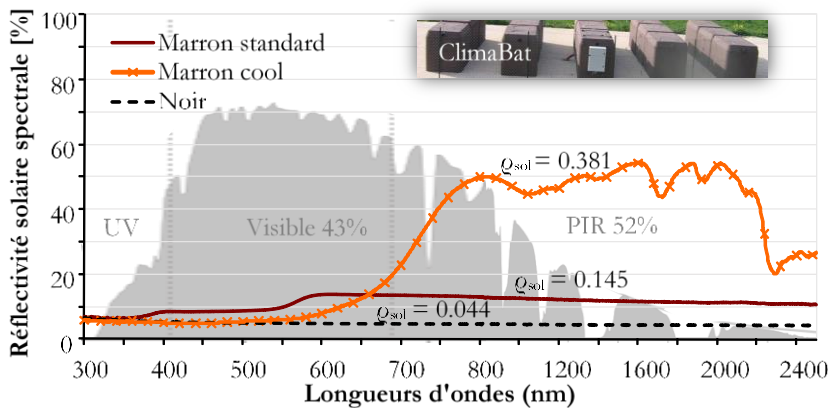
En pratique et dans les outils de simulation thermique dynamique du bâtiment, les propriétés radiatives des surfaces opaques disponibles et utilisées sont définies :

- Dans le domaine des courtes longueurs d'onde (i.e. spectre solaire) par leur albédo (fraction réfléchie de l'éclairement solaire incident).
- Dans le domaine des grandes longueurs d'onde (i.e. infrarouges lointains) par leur émissivité thermique.

Les surfaces dites sélectives froides étudiées dans cette partie (par exemple cool roofs, cool façades, matériaux colorés cool) ont simultanément des valeurs élevées d'albédo et d'émissivité thermique, ce qui permet respectivement de limiter l'absorption de l'éclairement solaire en journée tout en maintenant un rafraîchissement radiatif nocturne élevé, en particulier par ciel clair.

L'augmentation de l'albédo solaire peut cependant se concevoir par un traitement par bande de longueur d'onde dans l'étendue du spectre solaire en distinguant la bande spectrale visible pour l'aspect coloré de la bande des proches infrarouges. Pour obtenir ces valeurs, les mesures pour des surfaces homogènes peuvent être réalisées alors par spectrophotomètre à sphère intégrante (Figure 51a) ou par mesures in-situ du rapport de l'éclairement solaire incident et réfléchi comme dans le cas des expérimentations que nous avons réalisées à l'université de la Rochelle (Figure 51b).

(a) D'après (Doya, 2010)



(b) D'après (Trabelsi et al., 2011)



Figure 51 – Mesures (a) spectrophotométriques des revêtements colorés cools de la plateforme ClimaBat et (b) de mesure au pyranomètre des propriétés radiatives en toiture

Dans le cadre des traitements radiatifs étudiés ici, nous avons caractérisé par des mesures de laboratoire (Figure 51a) des traitements radiatifs de surface dits colorés cools. Ces matériaux respectent la colorimétrie d'un revêtement classique tout en maximisant la réflectivité spectrale dans la partie non visible des proches infrarouges, ce qui permet dans notre cas d'obtenir une couleur marron sombre de réflectivité solaire de plus de deux fois supérieure à la version classique du même revêtement, soit 0,381 versus 0,145 (Doya, 2010). La valeur de l'albédo utilisée ici ne doit donc pas se limiter à une simple valeur forfaitaire basée sur la couleur comme proposé dans certaines approches simplifiées comme dans la réglementation RT2012 ("RÈGLES Th-S," 2012). Elle est ici calculée sur la base d'une intégration et d'une pondération sur le spectre solaire de référence normalisé par ciel clair (Figure 51a) ; l'utilisation de différents spectres solaires normalisés pouvant alors modifier légèrement la valeur obtenue pour ces coefficients (Ferrari et al., 2013).

D'autre part, ces produits à fort albédo proposés pour le rafraîchissement passif doivent conserver une forte émissivité thermique pour permettre le rafraîchissement nocturne, et donc une forte augmentation de l'absorptivité au-delà de 5 μm , effet qui est dans notre cas confirmée dès 2,4 μm (Figure 51a). Cependant, d'autres paramètres qui interviennent dans la valeur effective de l'albédo, comme la rugosité de surface, les hétérogénéités et la prise en compte du vieillissement in situ nous ont conduit à également utiliser des mesures par pyranomètre (Figure 51b).

3.1.1 Performance énergétique d'été et rafraîchissement passif des bâtiments par traitement radiatif des toitures

Les effets directs de l'augmentation de l'albédo des toitures sont très importants sur la performance énergétique dès lors que les besoins de climatisation sont importants et que les bâtiments sont faiblement isolés comme l'on montré les nombreux cas d'étude de réhabilitation de bâtiments existants (Zinzi and Bozonnet, 2013). Une réduction simultanée de la demande énergétique de climatisation, de 25% dans le cas d'une maison individuelle typique aux États-Unis, et de 47%

pour le pic d'appel de puissance (journée d'été type) a ainsi été évaluée. L'étude et la normalisation du rafraîchissement passif par les propriétés radiatives des toitures, appelées cool roofs, ont été particulièrement développées aux États-Unis avec le comité CRRC⁸ et intégrées dans la réglementation thermique en Californie ou dans le label EnergyStar© pour les bâtiments. Nous avons participé à l'échelle européenne à la même démarche avec le projet européen COOLROOFS et au sein du comité de normalisation CEN TC2564 WG16 (réflectivité solaire de membrane d'étanchéité de toiture). Le contexte européen, et en particulier français, est néanmoins différent du fait du développement historique de la réglementation thermique pour des problématiques de chauffage et de la forte isolation des parois (la réhabilitation des toitures terrasses selon la réglementation de 2007 imposait une résistance thermique minimale de 2,5 m²K/W).

De façon à évaluer cet impact des toitures « cool », nous avons monitoré un bâtiment de logements collectifs à Poitiers (Bozonnet et al., 2011). Les mesures météorologiques ont été réalisées sur site en toiture et le suivi des conditions à l'intérieur du bâtiment a été effectué sur une saison d'été. Les enregistreurs de données (Tinytag©) intègrent les sondes de mesure de température et d'humidité relative pour l'intérieur et l'extérieur, et un thermocouple de température de surface a été intégré en sous-face de l'étanchéité de toiture et connecté à l'enregistreur autonome de données. L'effet direct de la modification des propriétés radiatives de toiture a donc pu être clairement identifié sur les pics de températures de surface, d'après les mesures avant et après réhabilitation de la toiture. La simulation calibrée sur les mesures a permis d'estimer une différence sur les pics des températures maximales de 32,5°C en journée. Par contre, les températures nocturnes sont quasi identiques, les transferts étant similaires, l'inertie thermique des matériaux de toiture étant faible, et le rafraîchissement nocturne efficace du fait de la forte émissivité thermique (de l'ordre de 0,9 pour les membranes avant et après traitement). Cette réduction de température de surface a des effets directs sur la contribution du bâtiment à la formation d'ilots de chaleur localement, et également sur la sollicitation de l'étanchéité et des composants de toiture à la dilatation thermique et aux fortes amplitudes jour/nuit. La limitation de la surchauffe maximale d'été à l'intérieur a été estimée de 30,2 à 29,3°C (température opérative des locaux sous toiture, sur la base d'un modèle de bâtiment calibré sur le cas d'étude (Bozonnet et al., 2011). Ces effets directs sur l'amélioration du confort thermique intérieur du bâti sont ici limités par la forte isolation thermique des toitures (2,6m²K/W), et le climat relativement tempéré.

Les effets de l'augmentation de l'albédo sont d'autant plus importants que les pics de température sont élevés, dans le cas d'éclairements solaires forts, et peuvent être combinés efficacement avec d'autres techniques de rafraîchissement passif tel que la ventilation naturelle, pour éliminer les

⁸ Cool Roof Rating Council (coolroofs.org)

périodes d'inconfort. Notre étude sur le bâtiment commercial générique présenté Figure 16a et Tableau 1, permet de mettre en évidence ce potentiel pour limiter les degré-heures d'inconfort d'été (Figure 52) vis-à-vis de la température d'inconfort adaptatif (Lapisa et al., 2013a).

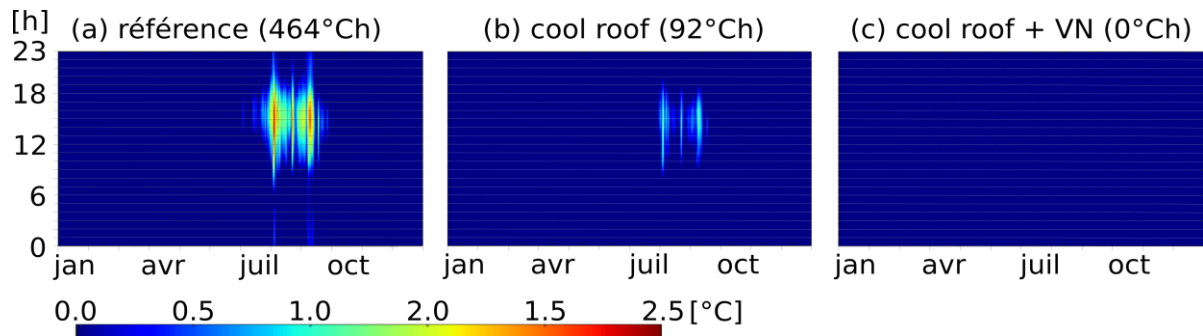


Figure 52 – évolution annuelle de l'écart de température et degré-heures d'inconfort au-dessus de la température d'inconfort pour (a) un bâtiment commercial situé à Marseille, (b) avec une solution de cool roof, et (c) avec la combinaison de l'effet de la ventilation nocturne, d'après (Lapisa et al., 2013a)

Les périodes de surchauffe observées ici pour les mois d'été et principalement l'après-midi jusqu'en début de soirée (Figure 52a) sont atténuées dans le temps et en amplitude par la modification de l'albédo de toiture (Figure 52b). La combinaison avec la ventilation naturelle nocturne permet de compléter la solution de rafraîchissement passif (Figure 52c) ; cette solution fonctionne ici aussi du fait de l'inertie thermique suffisante du bâtiment. De plus, nous avons également observé qu'il était important d'avoir un bon compromis sur l'épaisseur d'isolant sachant que l'efficacité du traitement radiatif de la toiture dépend aussi du potentiel de rafraîchissement nocturne par rayonnement vers la voûte céleste. En effet, une étude paramétrique en faisant varier l'épaisseur d'isolant de toiture du bâtiment type a montré que la tendance s'inverse pour des valeurs de l'albédo comprises entre 0,3 et 0,4 (Figure 53).

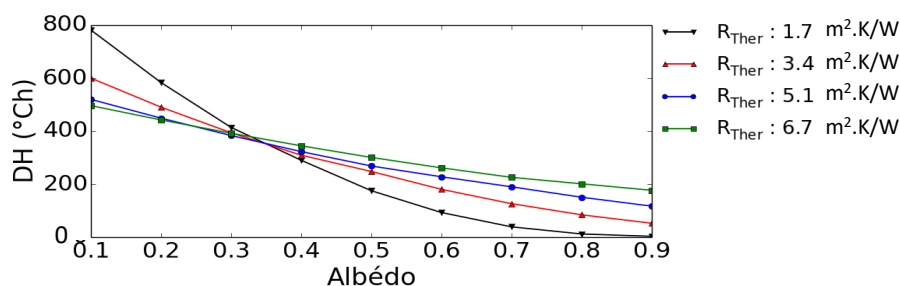


Figure 53 – degré-heures d'inconfort DH en fonction de l'albédo et de la résistance thermique de toiture, à Marseille, d'après (Lapisa, 2015)

Pour ce bâtiment, l'augmentation de l'isolation thermique de toiture pénalise le confort d'été pour des valeurs de l'albédo supérieures à 0,4 (i.e. DH augmente avec la résistance thermique de toiture), tandis qu'elle est bénéfique pour de faibles valeurs de l'albédo, lorsque les apports solaires sont très importants. La mise en œuvre de la technique des cool roofs pour le rafraîchissement

passif fonctionne donc bien et peut être un complément intéressant à l'isolation tout en nécessitant de faire des compromis. Les besoins énergétiques de chauffage sont cependant pénalisés par l'atténuation relative des gains solaires d'hiver. Sur la base des objectifs contradictoires de limiter l'énergie primaire de chauffage/ventilation/éclairage et les degré-heures d'inconfort, nous avons étudié l'optimisation possible du bâtiment commercial générique précédent du point de vue de l'effet cool roof combiné à la ventilation naturelle nocturne (Bozonnet et al., 2016; Lapisa, 2015). Les paramètres d'optimisation retenus pour cette structure comprennent principalement les propriétés de la toiture (albédo, isolation thermique, surface des lanterneaux) et du compromis de l'isolation plus ou moins forte de la dalle sur terre-plein vis-à-vis de son potentiel en termes d'inertie thermique. Les résultats d'optimisation, issus de l'algorithme génétique NSGA-II (Deb et al., 2002) et obtenus pour 24 villes en France, permettent de mettre en évidence l'ensemble des solutions optimales selon les deux objectifs (Figure 54a), la variation des performances (Figure 54b) et les paramètres (Figure 54c à d) des solutions pour chaque climat.

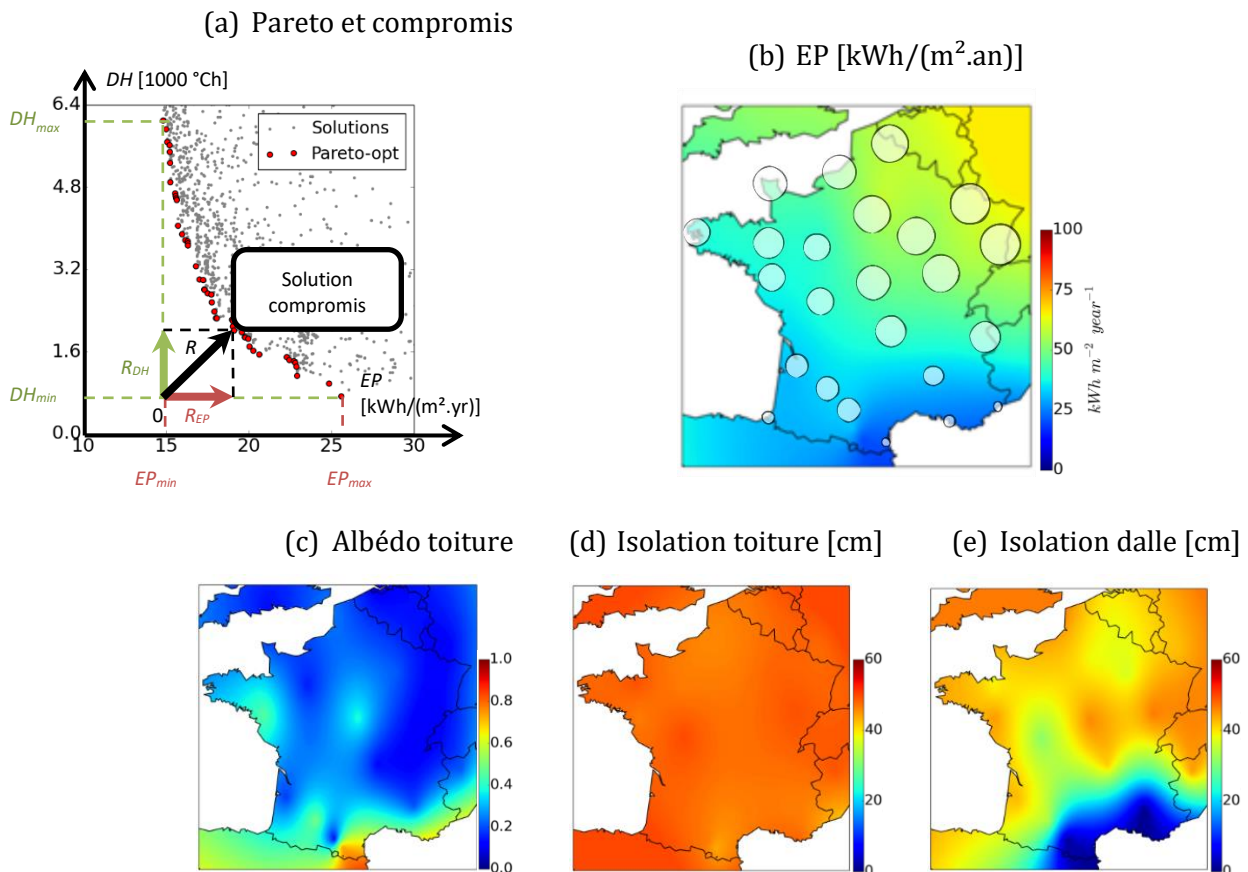


Figure 54 - (a) optimisation d'enveloppe et choix d'un compromis, et valeurs pour les compromis pour 24 villes de (b) l'énergie primaire annuelle, (c) l'albédo de toiture, (d) l'isolation de toiture et (e) l'isolation de la dalle, d'après (Bozonnet et al., 2016)

L'optimisation est ici établie avec la même pondération pour l'inconfort d'été et la consommation d'énergie primaire, valeurs qui varient respectivement de 0 à 117°C_h et de 18,9 à 65,7 kWh/(m².an), Figure 54b. Des valeurs élevées de l'albédo de toiture, solution de type cool

roof, sont intéressantes pour les régions du sud, avec un optimum d'isolation de toiture constant. Par contre, l'inertie thermique liée à la faible isolation de la dalle fournit un potentiel important dans les régions du sud. Finalement, c'est ici le rafraîchissement passif par ventilation naturelle nocturne qui prévaut d'une part pour son effet direct et le gain sur le confort thermique en journée du fait de l'inertie du bâtiment. En réalité, ces solutions de rafraîchissement passif optimales pour un climat donné peuvent être différentes face à des situations caniculaires amplifiées en milieu urbain et avec les effets du réchauffement climatique. La conception de solutions résilientes à ces situations peuvent être étudiées avec des scénarios climatiques de réchauffement, que nous avons par exemple utilisé ici à l'horizon 2080 (Jentsch et al., 2013), sur la base du scénario défavorable A2 défini par le GIEC (+3,4 °C à 2100). Ainsi, le même cas d'étude avec les effets du réchauffement climatique, et donc de plus importantes périodes de canicule et des températures plus élevées, montre que la solution de type cool roofs devient très largement intéressante pour limiter l'inconfort d'été des bâtiments non climatisés (Figure 55a).

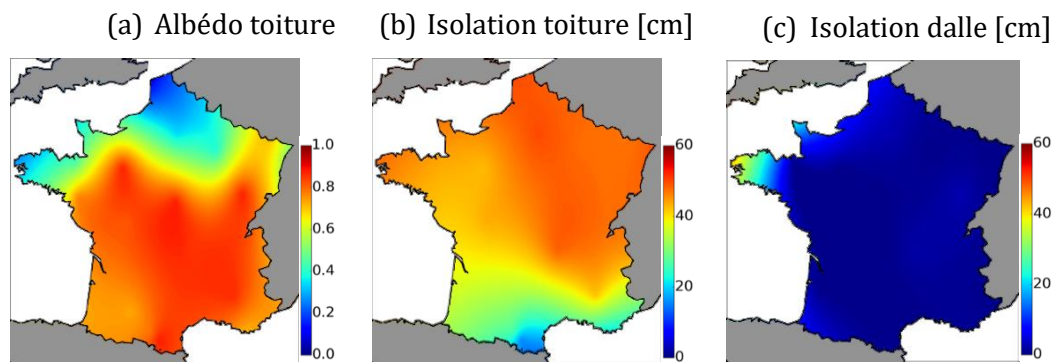


Figure 55 – distribution des paramètres de solutions optimales d'enveloppe pour le climat futur (2080) : (a) albédo, (b) isolation de toiture, et (c) isolation sous dalle, d'après (Bozonnet et al., 2016)

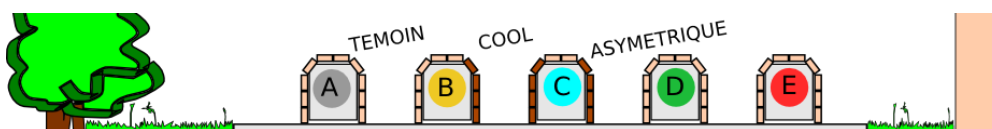
La concordance avec la limitation de l'isolation de toiture permettant le rafraîchissement radiatif nocturne (Figure 53) se vérifie ici aussi avec des solutions faiblement isolées au sud (Figure 55b). De même, la tendance précédente de faible isolation sous dalle se généralise (Figure 55c). Cependant, ces solutions de compromis à égale pondération avec la demande énergétique, entre valeurs minimales et maximales, tend vers l'obtention de solutions à faible consommation liées à la baisse générale des besoins de chauffage avec le réchauffement climatique, mais engendre des taux d'inconfort d'été qui augmentent à 265°Ch en moyenne pour les solutions optimales. Les critères de choix peuvent alors se faire sur d'autres critères pour obtenir des solutions qui restent acceptables sans système de climatisation et des consommations d'énergie de chauffage qui restent faibles. Cette étude montre que pour ces situations de climat tempéré où les solutions de rafraîchissement passif permettent d'éviter la mise en place et la maintenance d'un système de climatisation, la conception de l'enveloppe doit prendre en compte les dépendances complexes des paramètres. Pour la conception d'un bâtiment climatisé la démarche et le type de solution est similaire, mais avec un seul objectif de limiter le besoin annuel d'énergie. Cette étude sur une typologie

simple de bâtiment avec une interaction extérieure principalement sur la toiture, met en évidence l'effet direct du cool roof sur le bâtiment. Cependant, les interactions en milieu urbain dense sont bien plus complexes, avec en particulier des surfaces d'échange plus importantes en façade, tels que les échanges radiatifs dans les canyons urbains non négligeables, et les échanges convectifs entre l'enveloppe extérieure et l'air de la canopée urbaine qui doivent être précisés.

3.1.2 Façades froides, des effets à l'échelle de la rue

La plateforme expérimentale de mesure des effets de canyon urbain ClimaBat (§2.2.3) a été en particulier développée pour tester les effets dus à l'utilisation des revêtements de façade colorés cools (Figure 51a). La comparaison des suivis de température (Doya et al., 2012a) simultanés de différents scénarios (Figure 56a) a été menée avec un bâtiment de référence non traité, mais également en comparaison avec la phase de calibration (Figure 56b).

(a) – configurations d'études comparatives



(b) – comparaison des surchauffes intérieures par rapport à la phase calibration

Bâtiment	particularité	Diminution du temps de surchauffe / calibration	surchauffe max [°C] /référence
A	référence	0%	0
C	2 façades cool	7%	4.4
D	canyon asymétrique	-7%	6

Figure 56 – étude comparative des températures d'air intérieur et en façade avec différentes configuration de traitement de façade sur ClimaBat, d'après (Doya, 2010)

Les résultats obtenus montrent que le traitement des façades d'un bâtiment dans une configuration de confinement, tels que le bloc C (Figure 56b), permet de diminuer le temps de surchauffe, bien que l'effet du confinement de type canyon le maintienne à des températures plus élevées que le bâtiment de référence A. Au contraire, le bâtiment D en vis-à-vis d'une façade ayant un albédo plus élevé est exposée à une surchauffe accrue. L'ambiance intérieure du bâtiment intègre ici les effets mesurés également en surface de façade et donc sur l'air à l'intérieur des canyons, avec un effet plus marqué en partie haute des façades plus exposées au rayonnement solaire direct. Ces résultats expérimentaux ont été complétés par des simulations sur la base de la modélisation zonale des canyons urbains décrite au §2.2.2 et des variations complémentaires d'albédo de façade et de chaussée (Doya, 2010). L'étude du piégeage radiatif a permis de mettre en évidence l'impact des inter-réflexions, qui augmente l'effet dû à l'éclairement solaire absorbé quand l'albédo de la chaussée est accru, bien que le bilan à l'échelle de la rue soit amélioré. Cet effet de l'augmentation

de l'albédo pour une rue canyon de rapport d'aspect H/W de 3,3 et d'albédo 0,2, est maximum lorsque l'ensemble façades/chaussée est modifié avec un albédo de 0,8. On obtient alors une diminution de 5 à 14°C des températures maximales de bas en haut des façades. Pour le cas étudié (non isolé), les besoins de climatisation des bâtiments diminuent de 30 à 40%. De même que pour la formation d'îlot de chaleur urbain, les différences de température avec les données météorologiques sont les plus fortes durant la nuit et en partie basse du canyon ; on observe une atténuation de cet effet de confinement de l'ordre de 2,4°C en moyenne avec l'augmentation de l'albédo de la rue (Doya, 2010). Cette modification de l'albédo a un effet sur les surchauffes locales dans les espaces confinés mais peut-être étudiée plus largement dans les espaces urbains ouverts, places et ensembles de rues, à condition d'étendre le domaine d'étude.

3.1.3 Études à l'échelle du quartier

À l'échelle méso de la ville, de nombreuses études paramétriques ont été réalisées numériquement pour estimer l'impact des modifications des valeurs moyennes de l'albédo, dans des intervalles réalistes de modifications locales de certaines surfaces. Ainsi, d'après des simulations réalisées par Taha (1997), une augmentation de la valeur de l'albédo de 0,25 à 0,40 peut faire baisser l'îlot de chaleur de l'ordre de 4°C. À l'échelle du quartier, nous avons étudié cet effet d'augmentation de l'albédo pour différentes configurations et situations géographiques dans le cas du quartier Pin Sec à Nantes (Gros et al., 2014), Figure 57c. Les effets d'une augmentation de l'albédo ont pu être identifiés tant sur les îlots de chaleur locaux, au niveau des températures de surface et d'air dans la canopée (Figure 57a et b), que sur les besoins de climatisation des bâtiments (Figure 58a), simulés à l'aide de l'outil EnviBatE (§2.3.2).

Diminution relative des degrés-heures (entre 3 et 6m) par rapport au cas de référence

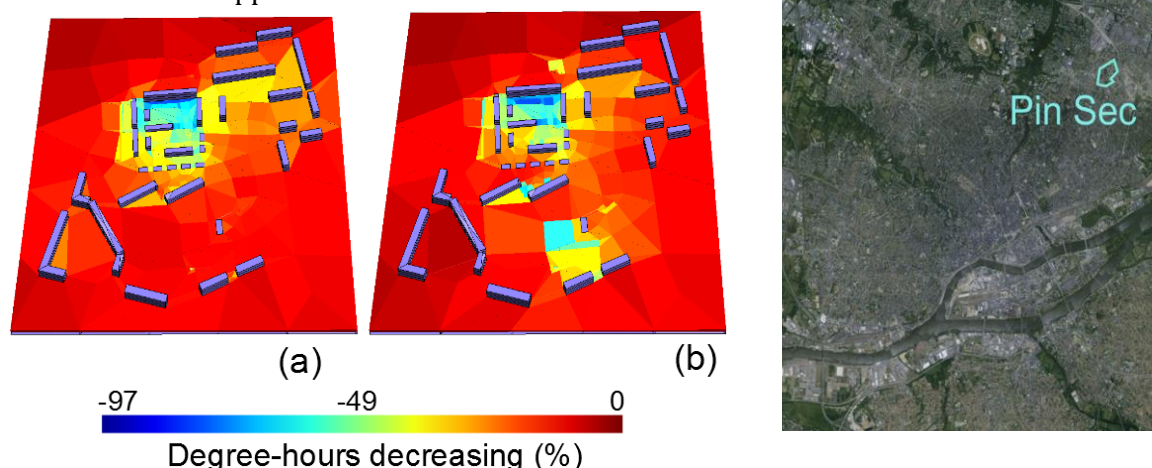


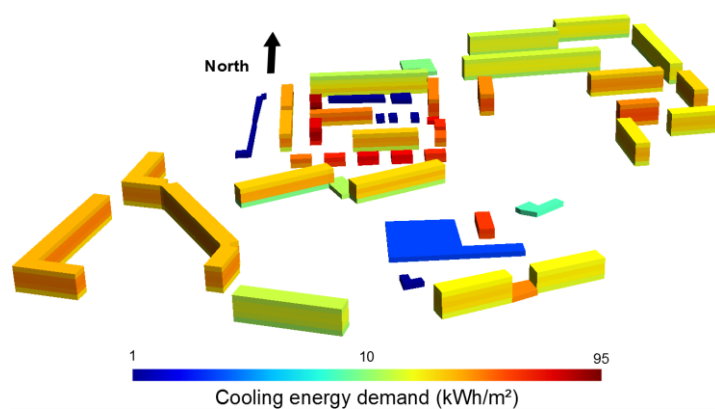
Figure 57 - Effet cumulé, du 1^{er} mai au 30 septembre, sur la température de (a) l'augmentation de l'albédo des façades et (b) des toitures seulement, pour le quartier du Pin-Sec (c) situé dans le nord-est de Nantes, d'après (Gros et al., 2014)

Ce cas d'étude de 136 000 m² comprend 40 bâtiments d'habitation, des bâtiments scolaires, de sport et des locaux techniques. En passant de la configuration initiale où façades et toitures sont d'albédo faible (0,3), à un albédo de 0,8 on observe des résultats globalement similaires, mais avec des distributions différentes sur la diminution de température extérieure (Figure 57a et b) et sur les besoins de climatisation des bâtiments. La surchauffe au-dessus de 26°C cumulée sur l'année a été calculée pour chacun des 3 cas (quartier existant de référence, modifications des façades, et modification des toitures) en degré-heures : $DH_{26} = \sum_{T_{air} > 26^{\circ}C} (T_{air} - 26)$.

La différence relative $(DH_{26} - DH_{26}^{ref})/DH_{26}^{ref}$ (Figure 57a et b) donne une indication du rafraîchissement par rapport au cas de référence sur l'année. Ce rafraîchissement relatif est proche de 0 en limite de domaine où les surchauffes sont limitées avec des valeurs de températures voisines des données météorologiques. L'effet est maximal dans les zones les plus denses du quartier, à savoir au centre qui est particulièrement confiné vis-à-vis des vents dominants de nord et d'ouest. Les effets les plus forts sont observés sur les zones les plus confinées du quartier et pour la solution de traitement des façades. Cependant, le traitement des toitures est plus important pour les bâtiments d'un seul niveau (Figure 57b) situés au sud du quartier. Le couplage thermoaérodynamique avec le comportement dynamique des bâtiments de la zone a permis de mettre en évidence une réduction de l'ordre de 78% des besoins de climatisation des bâtiments pour les deux solutions, avec des différenciations par zones. Ainsi, les zones les plus impactées sont soit celles situées en rez-de-chaussée dans les zones confinées (Figure 58b), soit celles situées sous toiture (Figure 58c).

En dehors des zones où sont situés les bâtiments non climatisés, donc non concernées par une réduction des besoins de climatisation, on observe également des différences sur les zones impactées indirectement par les modifications locales des îlots de chaleur caractérisées par la limitation des effets couplés du piégeage radiatif de courtes et grandes longueurs d'onde et les augmentations de la température de la canopée.

(a) Besoin de climatisation pour le cas de référence



(b) Diminution relative du besoin de climatisation par l'effet de l'augmentation d'albédo

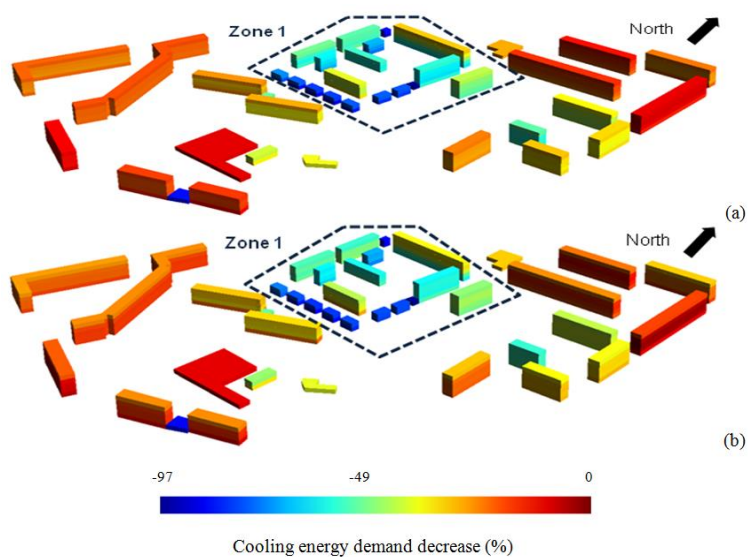


Figure 58 – résultats du l'effet couplé du microclimat sur (a) le besoin de climatisation du cas de référence et (b) impacts de l'augmentation de l'albédo de façade et (c) de toiture, d'après (Gros et al., 2014)

3.2 Végétalisation des surfaces urbaines

De l'échelle de la ville au bâtiment, la végétalisation est aussi un dispositif efficace pour le rafraîchissement passif. La limitation des apports solaires par les effets d'ombrage est un premier bénéfice direct. En effet, l'analyse des propriétés radiatives spectrales de la végétation montre qu'elle est faiblement absorbante, semi-transparente dans l'intervalle de longueur d'onde de 0,7 à 1,1 μm du fait de la présence de la chlorophylle. Au-delà, ce sont les propriétés fortement absorbantes de l'eau qui deviennent prépondérantes. Par contre, la disposition des feuillages et leur superposition possible (indice de surface foliaire⁹ F) rend complexe la détermination des échanges radiatifs. De plus, une part du rayonnement solaire absorbé est transformée en chaleur latente d'évaporation. Ce phénomène d'évapotranspiration peut également contribuer à absorber la chaleur sensible issue de l'air sec environnant et des parois dans le cas de la végétalisation des enveloppes.

3.2.1 Composant d'enveloppe végétale dans la simulation thermique dynamique du bâtiment

La végétalisation des enveloppes du bâtiment est répandue en toiture, avec deux principales typologies : les toitures extensives à couche de substrat mince (5 à 15cm, légère mais conditions sévères pour les plantes) et les toitures intensives à couche de substrat épais (20 à 100cm, plus isolantes et favorables à une plus grande diversité végétale). La végétalisation verticale pour les façades se fait soit par plantes grimpantes enracinées au sol (effets d'ombrage principalement), soit sous forme de murs végétaux comprenant la fixation de modules intégrant le substrat de culture. Cette dernière solution nécessite une irrigation et un entretien réguliers, en particulier en apport d'engrais. Dans la suite, ce sont des solutions d'enveloppes végétales type toiture et façade avec substrat que nous étudions comme solution de rafraîchissement des bâtiments et de son environnement proche.

Les modèles développés pour les outils de simulation thermique dynamique du bâtiment intègrent souvent des simplifications, par exemple non prise en compte de l'inertie thermique du substrat (Sailor, 2008), modèle intégré dans EnergyPlus. Pour nous permettre une prise en compte plus fine des effets de la végétalisation des surfaces urbaines, et des enveloppes des bâtiments (Djedjig et al., 2012), nous avons développé une modélisation du bilan thermohydrique dans le substrat et des transferts radiatifs et convectifs dans la canopée du couvert végétal (Figure 59).

⁹ L'indice de surface foliaire est défini comme étant la moitié de la surface totale des feuilles (les deux côtés de la feuille), par unité de surface au sol.

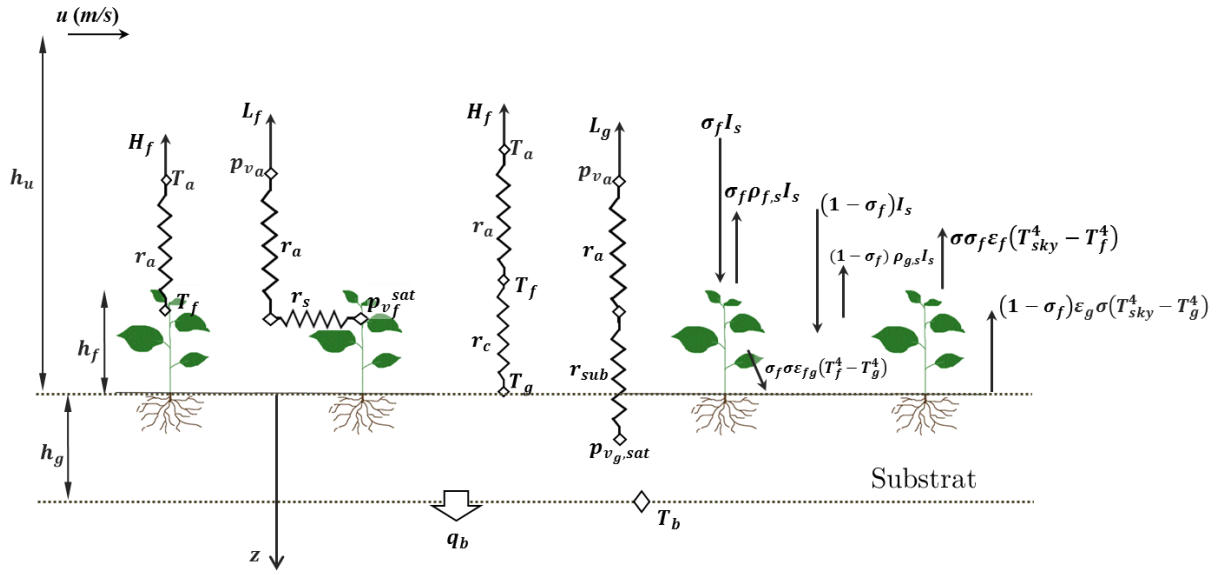


Figure 59 – détail des différents termes de flux du bilan de surface d’une toiture végétale, d’après (Djedjig, 2013)

Les termes de bilan de ce modèle (Figure 59) permettent d’établir le lien avec le flux q_b transmis au bâtiment et les flux sensibles H et latent L transmis à l’environnement urbain extérieur, ainsi que le rayonnement net absorbé Rn , solaire et grandes longueurs d’onde. L’éclairement solaire I_s et les échanges de grandes longueurs d’onde avec le ciel T_{sky} sont décrits pour la fraction de surface foliaire σ_f et le substrat g de fraction de surface directement exposée $(1 - \sigma_f)$. Les échanges convectifs et latents dans la canopée végétale sont décrits par des résistances qui dépendent en particulier des écoulements d’air dus au vent (r_a, r_c) et de la résistance stomatique des végétaux (r_s) qui modifie l’intensité de l’évapotranspiration. Le système couplé, équations (3-1) à (3-4), des équations de bilan intègre alors les bilans thermiques du couvert végétal, du substrat et du sol, ainsi que le bilan hydrique en surface.

$$(\rho c_p)_f d_f F \frac{dT_f}{dt} = Rn_f - H_f - L_f \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [(\rho c_p)_{g, \omega_g} T] = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{\omega_g} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3-2)$$

$$-k_{\omega_g} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = Rn_g - H_g - L_g \quad (3-3)$$

$$h_g \frac{\partial \omega_g}{\partial t} = A + P - D - E \quad (3-4)$$

La teneur en eau ω_g en surface du substrat dépend des apports par arrosage A et des précipitations P , ainsi que des pertes par drainage D et par évapotranspiration E . Les propriétés thermiques du

substrat dépendent de son état hydrique donné par sa teneur en eau ω_g [$\text{kg}_{\text{eau}}/\text{m}^3_{\text{substrat}}$]. Une résolution itérative de ces équations couplées est réalisée jusqu'à convergence des températures et de la teneur en eau. Le modèle développé en langage Python a été intégré à l'outil de simulation thermique dynamique TRNSYS comme un composant de façade ou de toiture du modèle existant des bâtiments multizones. Ce modèle a été confronté aux mesures réalisées sur la plateforme ClimaBat pour un élément de façade végétal (Figure 62), et bien que les détails du drainage n'aient pas été précisément représentés, on retrouve une bonne représentation de l'évolution thermohydrigue sur une période de 17 jours. L'écart moyen sur les températures de surface entre le modèle et l'expérimentation est de $0,8^\circ\text{C}$ et l'effet des périodes sèches et des précipitations est correctement reproduit (Djedjig et al., 2012).

Ce modèle permet d'évaluer la contribution directe de la végétalisation de l'enveloppe sur le confort d'été d'un bâtiment, tout en estimant, comme pour l'augmentation de l'albédo, l'effet potentiellement négatif en hiver. Nous avons alors simulé le même bâtiment que celui précédemment utilisé dans l'analogie à la plateforme ClimaBat (Figure 28b), avec végétalisation des façades est et ouest (Djedjig, 2013). Le substrat est de 12cm, et la teneur en eau est fixée à 60% de sa capacité de rétention. Le taux de couverture végétal est de 1 pour un indice de surface foliaire de 4. Les températures de consigne sont de 26°C pour la climatisation, de 19°C le jour et de 15°C la nuit en période de chauffage. Les résultats pour les besoins de climatisation et de chauffage montrent les effets positifs que ce soit à la Rochelle ou à Athènes (Figure 60).

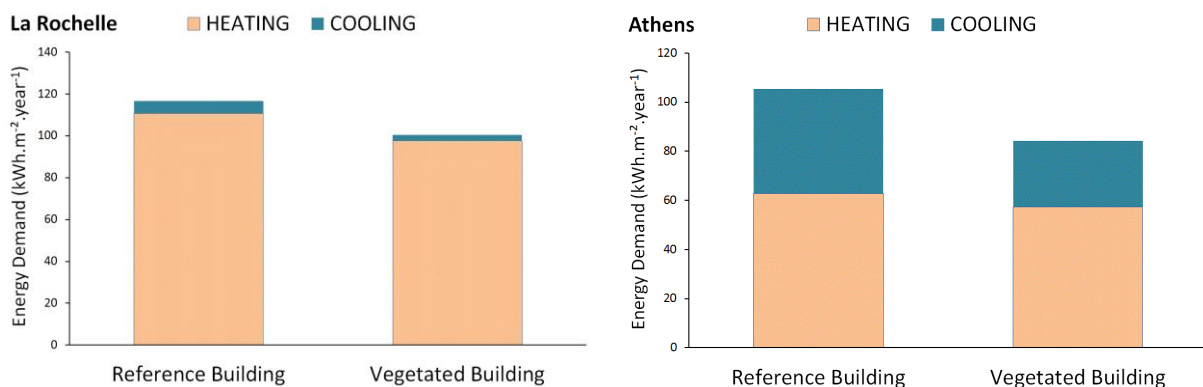


Figure 60 – différences sur les besoins de chauffage et de climatisation pour le climat de la Rochelle et d'Athènes, d'après (Djedjig, 2013)

Le bénéfice absolu sur le besoin de climatisation est plus fort à Athènes ($15,9\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$) qu'à la Rochelle, mais plus faible en valeur relative. Le bénéfice direct en hiver se retrouve également car le bâtiment de référence n'est pas isolé (de même que le modèle analogue de la plateforme expérimentale ClimaBat).

Cette modélisation ouvre la perspective de mener une étude plus large d'optimisation par type de climat comme dans le cas de l'étude de l'effet de l'albédo tout en intégrant l'effet de l'inertie du bâtiment et de sa modification par l'ajout d'une couche de substrat extérieur, ainsi que d'autres paramètres d'enveloppe et de fonctionnement du bâtiment.

3.2.2 Végétalisation des façades et des toitures à l'échelle d'une rue canyon

L'effet du confinement dans les canyons urbains modélisés grâce au couplage du modèle TRNSYS avec le modèle spécifique de canyon présenté précédemment (Figure 27a) a permis de vérifier également le potentiel de rafraîchissement de la végétalisation pour le cas de la ville de la Rochelle (Figure 61).

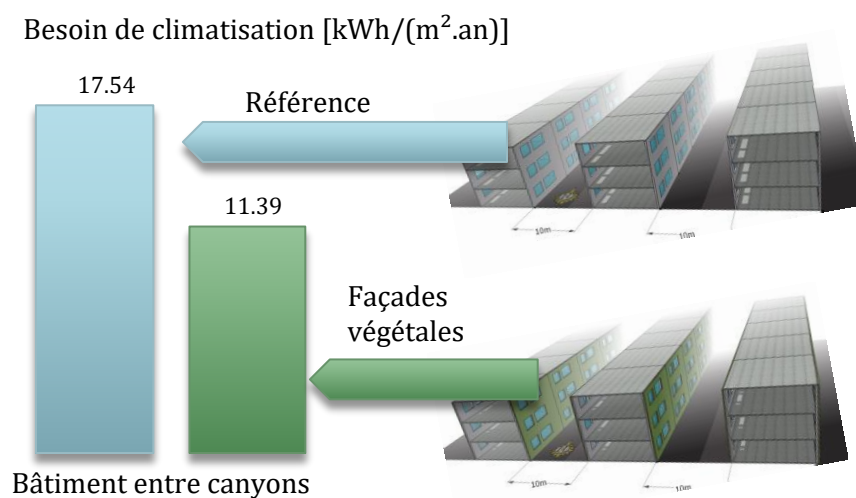


Figure 61 – atténuation des besoins de climatisation due à la végétalisation des façades, d'après (Djedjig, 2013)

Le gain relatif sur les besoins de climatisation est ici de l'ordre de 35% comme pour le cas du bâtiment seul (§3.2.1). Ce gain relatif à l'effet canyon a plus particulièrement été étudié par la mise en place de façades et toitures végétales monitorées en température et en humidité sur la maquette ClimaBat, (§2.2.3) et dont les parois ont été repeintes en blanc.

L'étude de l'impact de la végétation à échelle réduite est menée généralement sur des éléments végétalisés détachés des constructions. L'objectif de notre expérimentation était de quantifier l'impact des façades et des toitures végétalisées sur l'environnement proche et donc l'impact microclimatique à l'échelle de la rue. Un système de façades végétalisées a été mis en place et instrumenté afin de pouvoir comparer les mesures (de températures, d'humidité, et de flux de chaleurs) réalisés sur les bâtiments et les rues végétalisés à un cas (un bâtiment et une rue) de référence. Une difficulté repose sur la structure d'une façade végétalisée dont l'encombrement et l'épaisseur du substrat ne peuvent pas être réduit comme dans le cas des modules installés (Figure 62,

sphaigne végétale du chili de 15 cm d'épaisseur) et fixés sur une grille métallique laissant une lame d'air faiblement ventilée de 5 cm.



Figure 62 - Mise en place d'un système de façade végétalisée

La mesure des différents flux de chaleur sur la scène du canyon urbain permet de caractériser l'impact de la végétalisation, notamment par la mise en place de pyranomètres et pyrgéomètres de flux réfléchis. Ces capteurs de rayonnement réfléchis par la rue sont placés à la hauteur des toitures au milieu de la rue. L'orientation des façades implique que tout support volumineux aura une portée d'ombre importante à l'emplacement des différents capteurs. Le support des pyranomètres et des pyrgéomètres doit donc être peu volumineux. Une solution retenue étant alors de fixer les capteurs sur une plaque métallique de petite taille laquelle est fixée sur un système de fils tendus (Figure 63a). Cette solution permet de minimiser l'erreur due à l'ombre venant fausser les mesures d'autres capteurs. Pour la mesure d'humidité et de température, des abris de petite taille ont été développés pour limiter également les perturbations thermoaérouliques dans la rue à échelle réduite (Figure 63b).

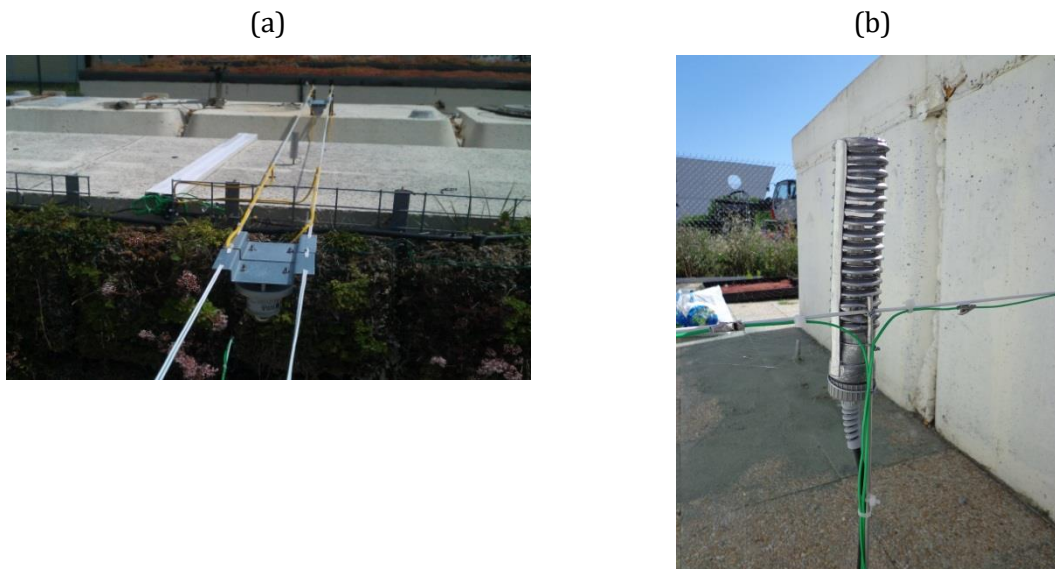


Figure 63 - (a) Capteurs de rayonnement fixés à l'aide de fils tendus, et (b) hygromètres protégés, d'après (Djedjig, 2013)

Le suivi expérimental des variations de la teneur en eau à différentes hauteurs du mur végétalisé montre que la gravité gouverne la distribution de l'eau dans le substrat. La Figure 64 met en évidence que le point de mesure le plus saturé en eau se situe en bas du mur végétalisé. En effet, l'eau

coule sous l'effet de la gravité et est drainée quelques 30 minutes après le déclenchement de l'arrosage. Rappelons ici que la hauteur du mur végétalisé n'est que de 1 m. La partie supérieure se retrouve ainsi dépourvue d'eau en surplus et la capacité de rétention d'eau du substrat y est déterminante.

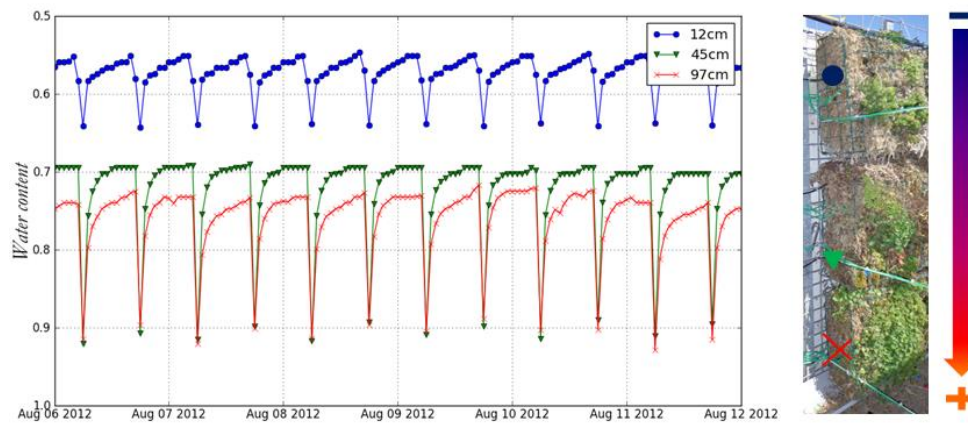


Figure 64 – Évolution de la teneur en eau volumétrique ($\text{m}^3_{\text{eau}}/\text{m}^3_{\text{substrat}}$) du substrat mesurée dans la paroi végétalisée à différentes distances de l'arrosage

Les sondes utilisées pour la mesure de la teneur en eau sont des sondes capacitatives qui permettent de mesurer la teneur en eau du sol sur un volume défini autour de la sonde (une mesure non ponctuelle à prendre en compte pour un substrat de faible épaisseur). Ces sondes sont sensibles à la permittivité du milieu. La réponse électrique de ce type de sondes dépend du type de substrat utilisé. L'étalonnage des sondes implémentées dans le mur végétal a dû être réalisé avant la mise en place des capteurs dans la maquette expérimentale.

Ce dispositif de suivi a permis de vérifier la cohérence du modèle numérique développé précédemment. La mise en place en parallèle de toitures végétales a mis en évidence l'effet relatif des différentes solutions de végétalisation sur le confinement thermique dans les canyons (Figure 65c), comme dans l'approche précédemment développée sur la plateforme ClimaBat (§2.2.3). On constate que les effets les plus remarquables apparaissent en journée sur les températures d'air au centre des canyons avec des comportements similaires la nuit (Figure 65a). Comme pour l'effet de l'albédo, c'est principalement l'effet de l'atténuation liée aux apports solaires en journée qui est observé. L'atténuation est plus forte pour la façade végétalisée qui a un impact plus direct sur l'ambiance de la rue (Figure 65b), avec une température jusqu'à 1,5°C plus faible que la rue de référence. On observe aussi que l'inertie de la paroi végétale entraîne au contraire une restitution de chaleur en soirée pour la rue GWallC. L'étude de la distribution des écarts relatifs de température montre une bonne efficacité de l'ordre de 33% de la façade végétale pour limiter l'effet de confinement, efficacité définie par le ratio $\frac{T_{GWallC} - T_{RefC}}{T_{RefC} - T_{Meteo}}$. La corrélation linéaire vis-à-vis de cette

définition d'efficacité est de l'ordre de 0,86 ; elle est moins bonne pour l'effet des toitures (efficacité de l'ordre de 13% avec une corrélation de 0,71).

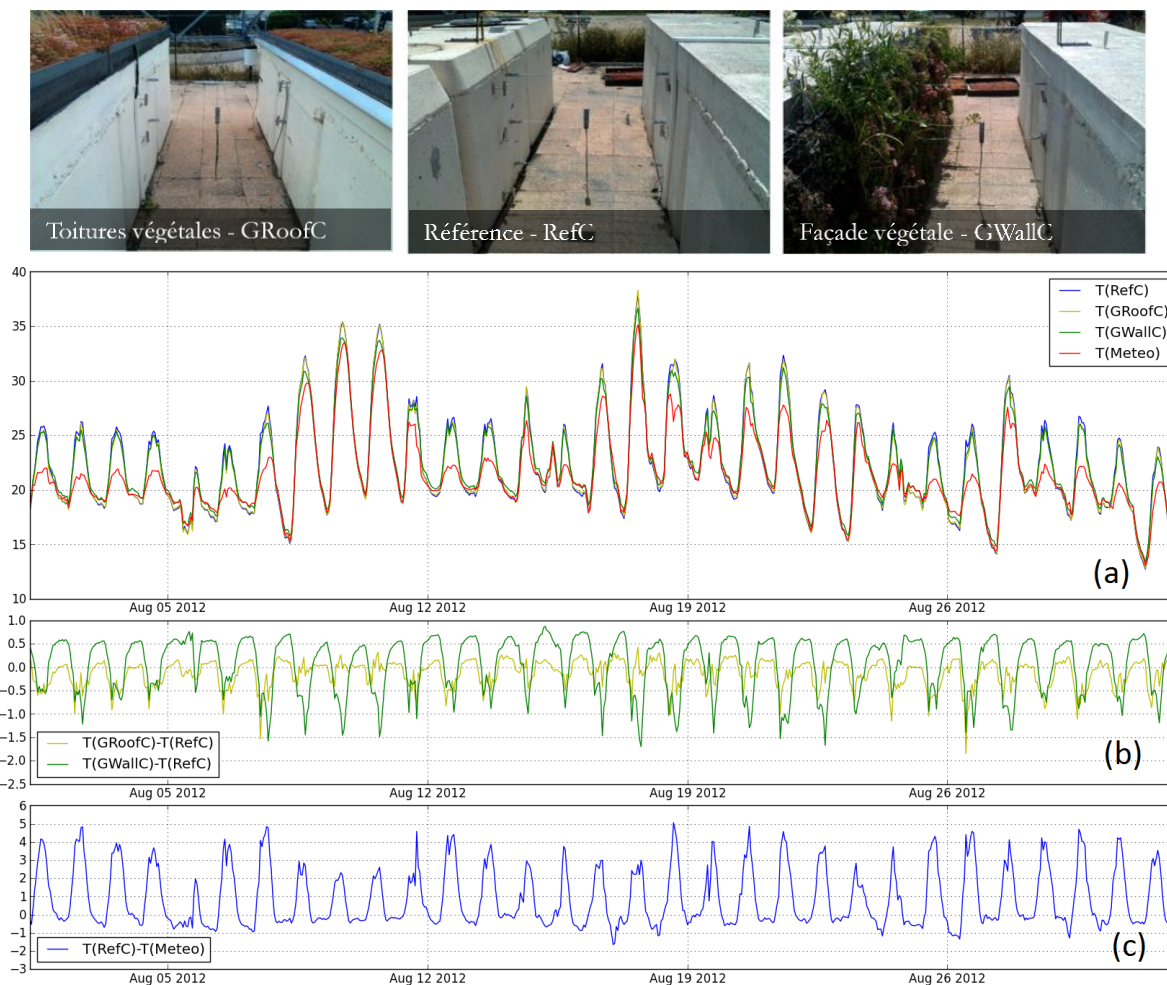


Figure 65 - (a) variation des températures mesurées au centre des canyons, (b) baisses de températures par rapport au canyon de référence, et (c) effet du confinement par rapport à la station météo, d'après (Djedjig et al., 2015a)

L'effet lié à l'évapotranspiration est aussi obtenu par l'augmentation de l'humidité relative dans les rues végétalisées, avec une différence maximale observée de 6 à 8% dans la rue GWallC à 17h. Cette variation d'humidité relative peut également modifier les paramètres du confort thermique dans la rue.

Ces mesures ont été complétées par le dispositif de mesure du rayonnement de grandes et courtes longueurs d'onde réémis par les canyons (Figure 63a), qui a permis d'estimer un albédo équivalent de 0,27 pour la rue de référence et de 0,15 pour la rue végétalisée. En effet, la façade blanche de la rue de référence est alors remplacée par la végétation plus absorbante dont la surface hétérogène tend à piéger le rayonnement. Par contre, les enregistrements avec les pyrgéomètres montrent que la température radiante équivalente est fortement atténuée, jusqu'à -4°C de différence à 18h. Enfin, l'impact sur les bâtiments a également été vérifié avec en particulier les capteurs de

flux conductifs sur les façades des bâtiments. On constate en été que les gains thermiques nets en façade du bâtiment de référence sont de l'ordre de $45\text{Wh/m}^2/\text{jour}$ alors que les pertes par la façade du bâtiment végétalisé sont de l'ordre de $155\text{Wh/m}^2/\text{jour}$. Par contre, en hiver les gains et les pertes s'équilibrent de façon similaire pour les deux cas, avec moins d'amplitude pour la façade végétale, et un gain net faible du fait de l'effet canyon et du moindre ensoleillement.

Il faudrait enfin compléter l'étude par le suivi de l'état de la végétation, en particulier le développement de la couverture foliaire ainsi que de ses propriétés radiatives. L'utilisation dans la modélisation reste cependant difficile du fait de la multiplication des paramètres nécessaires à la bonne représentation du comportement dynamique et des transferts couplés hygrothermiques.

3.2.3 Végétalisation à l'échelle du quartier

La végétalisation à l'échelle du quartier ou de la ville peut créer des oasis de fraîcheur du fait de l'évapotranspiration du système substrat-végétation de surface, et elle est particulièrement efficace dans les zones climatiques chaudes et arides. Des atténuations locales d'îlot de chaleur urbain de l'ordre de 2 à 8°C peuvent être atteintes (Taha, 1997) et le ratio de Bowen, de l'ordre de 5 en site urbain (Figure 38), peut même devenir négatif pour certaines configurations, le flux sensible convectif s'inversant depuis l'environnement d'air sec vers la zone végétalisée source d'évapotranspiration. En première approche, le bilan complexe du composant végétal décrit dans le modèle précédent de composant d'enveloppe n'a pas été intégré dans notre modélisation à l'échelle du quartier (modèle EnviBatE décrit au §2.3.2). Nous avons opté ici pour une approche simplifiée qui intègre d'une part l'effet sur le bilan radiatif solaire et la circulation d'air dans la canopée des arbres, et d'autre part l'effet indirect de l'évapotranspiration due à la végétalisation des surfaces enherbées et de l'humidification des chaussées. En effet, le modèle complet décrit Figure 48 n'intègre pas le bilan hydrique dans la canopée urbaine. Le bilan de surface extérieure est donc modifié par un terme source lié à l'équilibre de la température des surfaces végétalisées avec la température d'air, ce qui suppose une teneur en eau suffisante et donc un arrosage régulier. Pour l'humidification continue des chaussées, le flux latent d'évaporation a été intégré comme un terme source pour le bilan des surfaces basé sur le modèle d'évaporation des chaussées adapté d'après des expérimentations réalisées in situ (Musy et al., 2016). Deux îlots urbains dans le quartier de Lyon Part-Dieu, Buire et Moncey (Figure 66), ont fait l'objet d'une étude comparative de l'effet de l'augmentation de la valeur de l'albédo et de la possibilité de végétaliser les surfaces urbaines ou d'implanter des arbres comme solution de limitation de l'effet d'îlot de chaleur local.

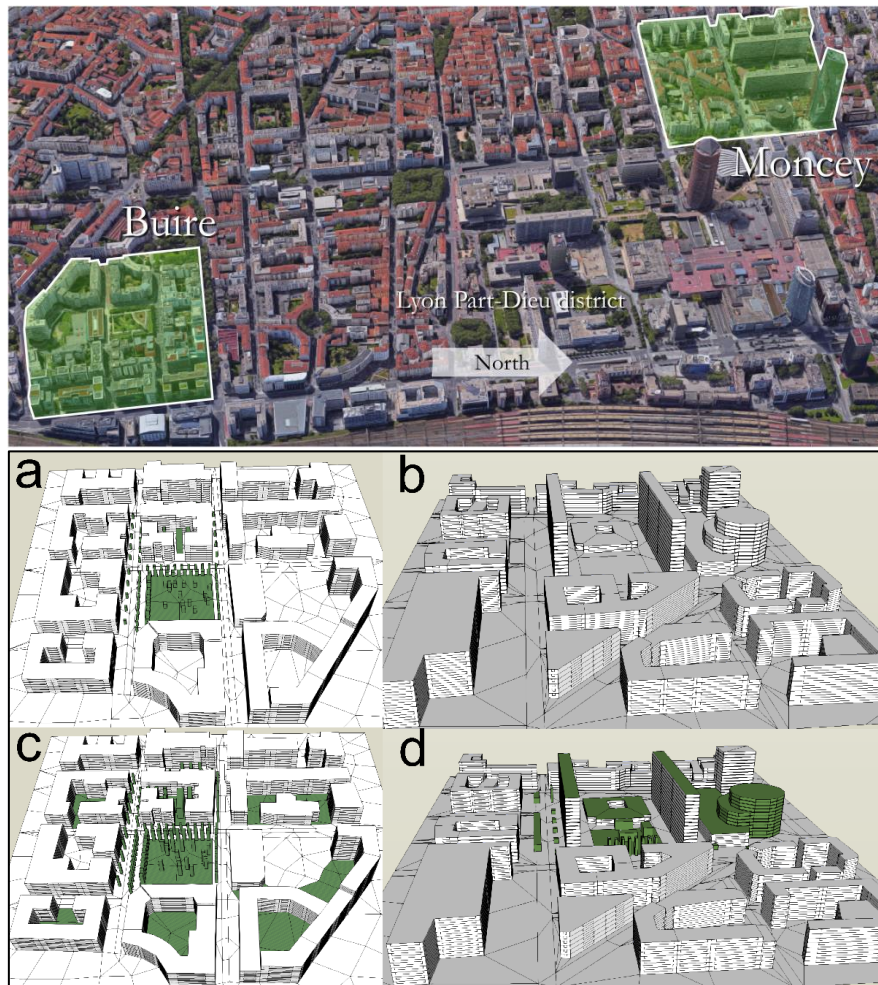


Figure 66 – quartiers de la Buire (a) et de Moncey (b) à Part-Dieu, Lyon ; stratégies de végétalisation pour ces deux quartiers respectivement (c) et (d) d’après (Gros et al., 2016b)

Ces deux quartiers présentent l’intérêt d’être assez différents quant à leur morphologie et leur niveau d’isolation :

- Le site de la Buire (Figure 66a) représente un ensemble homogène d’une dizaine de blocs de bâtiments récents (9 étages en moyenne) sur une surface de 70 000 m².
- Le site de Moncey (Figure 66b) d’une surface de 60 000 m², est un ensemble hétérogène de bâtiments (7 étages en moyenne) anciens et de construction des années 1960, avec la construction prévue (et intégrée au modèle) de deux tours, de 51 et 153m.

Les albédos des toitures et des façades varient de 0,15 à 0,8 tandis que les sols ont des valeurs de l’albédo faibles, à savoir de l’ordre de 0,15 à 0,25. Les apports solaires par les vitrages sont également très variables en fonction des typologies de bâtiment avec des taux de surface vitrée de 15 à 80%. Enfin, seul le quartier de la Buire a un espace végétalisé significatif en cœur d’îlot avec un parc et des arbres. Les stratégies de rafraîchissement urbain proposées incluant une extension des zones et des enveloppes végétalisées (Figure 66c et d), et ont été confrontées aux possibilités

envisageables dans le projet (Musy et al., 2016). De même, deux autres stratégies ont été étudiées, une augmentation de l'albédo de l'ensemble des surfaces et l'humidification des chaussées. Les résultats obtenus sur la performance énergétique montrent que la végétalisation des surfaces extérieures permet une économie de demande énergétique de l'ordre de 0,6% pour l'ensemble des bâtiments. Pour les deux cas, ce résultat faible en valeur relative masque des effets plus marqués sur certains bâtiments sensibles au traitement local des îlots de chaleur. L'humidification des chaussées a un effet encore beaucoup plus indirect, avec une économie de climatisation 0,3% et 0,1% pour la Buire et Moncey. Le traitement plus large de l'augmentation de l'albédo de l'ensemble des surfaces a un effet sur cette économie de 1,3% et 5,6% pour la Buire et Moncey.

L'effet direct sur le microclimat est lui beaucoup plus important avec des effets variables dans les différentes couches de la canopée urbaine. De façon à intégrer l'ensemble des surchauffes locales sur la durée de la saison chaude, le rafraichissement relatif au cas de référence peut être défini de façon similaire à la demande d'énergie en comparant les degrés heures au-dessus de 26°C (moyenne spatiale pour la canopée urbaine) au cas de référence :

$$\frac{DH_{26} - DH_{26}^{ref}}{DH_{26}^{ref}} [\%] \quad (3-5)$$

Pour les des deux sites, on observe alors avec la végétalisation un rafraichissement relatif de 5,8% et de 0,7% pour la Buire et Moncey. Le scénario de végétalisation de Moncey est en effet assez limité, mais il faut également tenir compte du fait que les bâtiments concernés de ce site sont fortement vitrés (de l'ordre de 80%) ce qui limite les surfaces disponibles pour la végétalisation des façades en particulier, et maintient un albédo équivalent du quartier faible. On retrouve alors les mêmes tendances pour l'humidification des chaussées, avec un rafraichissement relatif sur l'année de l'ordre de 5% et 0,8%. Alors que pour l'augmentation de l'albédo on obtient 12% et 5,9% de rafraichissement relatif pour la Buire et Moncey. Les résultats permettent d'aller plus loin dans l'analyse du rafraichissement à différents niveaux de la canopée, près des façades et toitures, ainsi que de la distribution des effets sur les zones intérieures et extérieures. La modélisation couplée permet également de quantifier les effets directs et indirects sur le microclimat et sur les ambiances intérieures. La mise en œuvre de modèles plus complexes et plus complets devrait être développée, en intégrant par exemple un comportement plus réaliste de la végétation, tout en étudiant les possibilités de simplification acceptables à l'échelle macroscopique du quartier, de manière à rester cohérent avec l'ensemble des autres approximations des modèles. Par ailleurs, la disponibilité et le détail des données d'entrées nombreuses et difficiles à gérer à cette échelle peuvent également être un obstacle à une modélisation très fine.

4 DES PERSPECTIVES DE RECHERCHE EN DÉVELOPPEMENT ET À VENIR

4.1 De nouveaux dispositifs de rafraîchissement et de traitement des surfaces urbaines à intégrer

À différentes échelles d'étude, je me suis intéressé aux performances énergétiques et au confort thermique des bâtiments en interaction avec le microclimat local, tout en évaluant les possibilités de traitement des enveloppes pour leur potentiel de rafraîchissement. C'est en effet une situation où des phénomènes de couplage complexe peuvent intervenir, que ce soit à l'échelle du composant de paroi ou du comportement dynamique du bâti, ou à l'échelle de la rue ou du quartier. À toutes ces échelles d'étude on retrouve les solutions techniques connues pour le traitement des îlots de chaleur urbain, dont les traitements des surfaces décrits précédemment (albédo et végétalisation en particulier). Cependant de nombreuses nouvelles techniques émergent qui pourraient être intégrées à terme dans les études numériques et expérimentales développées.

4.1.1 Des perspectives pour l'intégration de nouveaux traitements radiatifs

L'effet de l'augmentation globale de l'albédo des surfaces urbaines peut être conçu plus finement en prenant en compte les interactions locales selon différentes techniques en développement proposées ci-après. Cependant cela nécessite des adaptations de modélisation et des moyens d'étude pour évaluer leurs performances et définir leurs caractéristiques optimales en fonction des bâtiments et de la morphologie des quartiers.

Les matériaux rétro réfléchissants

Le traitement radiatif par l'intégration de produits aux propriétés spéculaires tels que les revêtements rétro réfléchissants (Figure 67) est particulièrement adapté pour éviter le piégeage radiatif en zone urbaine dense, et en particulier pour les façades des rues de type canyon (Rossi et al., 2015).

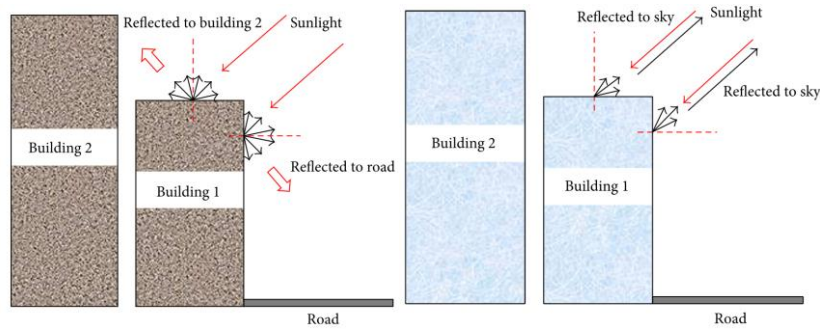


Figure 67 – illustration de l’effet d’un revêtement (a) réfléchissant diffusant et (b) rétro réfléchissant, d’après (Yuan et al., 2015)

Les directions principales de l’éclairage réfléchi peuvent être modulées dans la conception du revêtement avec par exemple des angles différents pour les surfaces pavées des rues canyons (Rossi et al., 2015), ce qui permet d’augmenter l’albédo équivalent des formes urbaines. Cependant, l’utilisation des modèles de radiosités pour des surfaces grises et diffusantes utilisés dans nos études (Gros et al., 2011) n’est plus possible et l’intégration de matériaux spéculaires nécessite de nouveaux développements ou l’intégration de nouveaux modèles de calculs de type lancer de rayon.

La conception de surfaces de réflectivité solaire hybride, cas par exemple des cool roofs hybrides (Jensen, 2012), en utilisant la rugosité de surface ou plus simplement la variation de morphologie et de revêtement permet d’obtenir des propriétés variables en fonction de l’angle d’incidence tels que décrit dans différents brevets (Figure 68).

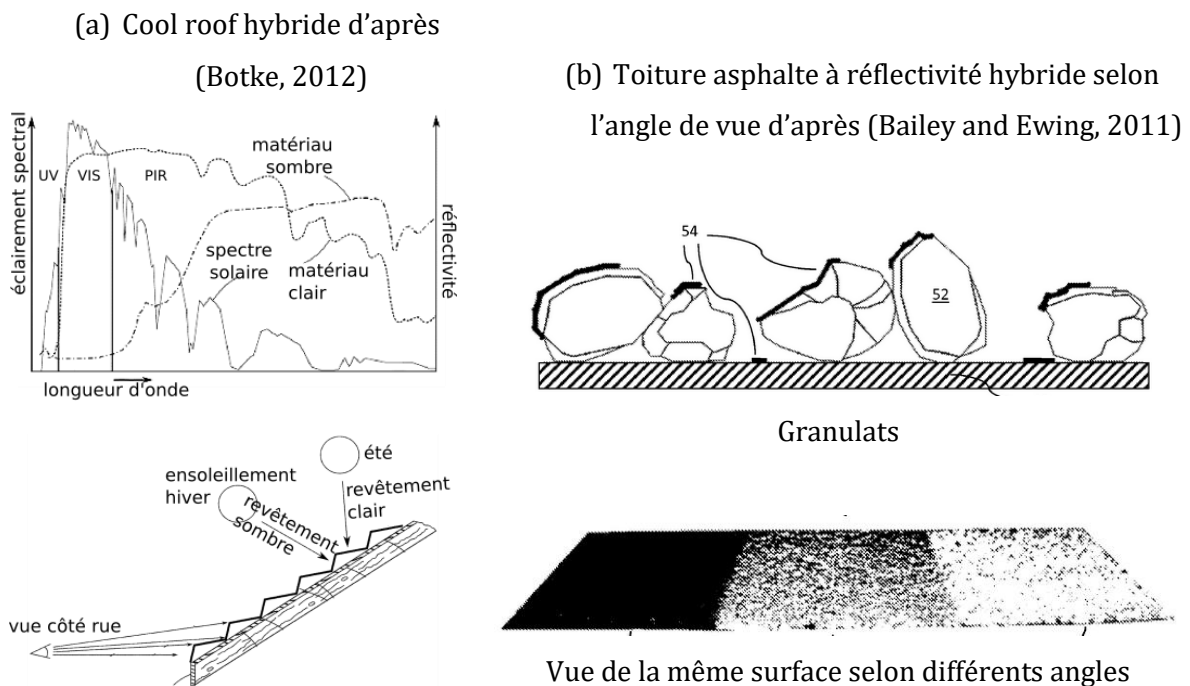


Figure 68 – quelques techniques de réflectivité solaire hybride brevetées pour les toitures (cool roofs hybrides)

L'un des principaux atouts est alors de concevoir et d'adapter les propriétés radiatives, pour les façades en interaction dans les canyons urbains comme dans le cas des revêtements rétro réfléchissants, mais aussi pour adapter les toitures aux variations été/hiver (Figure 68a). Outre la nécessité de prendre en compte la variabilité des propriétés radiatives, les variations de forme et de propriétés de surfaces peuvent perturber les transferts de chaleur généralement supposés unidimensionnels par convection et conduction, avec par exemple de forts contrastes de températures en surface, ce qui pourrait aussi complexifier l'approche de modélisation.

Les produits à propriétés radiatives contrôlables (thermochromes et électrochromes)

L'utilisation de produits thermochromes ou électrochromes permet l'adaptation des propriétés radiatives aux besoins de climatisation (Santamouris et al., 2011), tout en minimisant les effets négatifs sur les besoins de chauffage. L'intégration à l'enveloppe nécessite cependant de déterminer en amont les propriétés optimales de transition, température de changement d'état pour le thermochrome ou mode de pilotage pour l'électrochrome. De plus, l'utilisation de propriétés radiatives variables doit être intégrée à la modélisation avec des effets de couplages supplémentaires.

Les pigments fluorescents pour des propriétés colorées cool accrues

Pour permettre de combiner conception architecturale et fonctionnalité de rafraîchissement, les produits dits colorés cools classiques tels qu'utilisés dans nos études (Figure 51a) sont conçus de façon à maximiser la réflectivité dans le domaine des proches infrarouges (spectre solaire). Ils sont néanmoins limités par la réflectivité nécessairement réduite dans la partie visible du spectre solaire pour permettre de conserver la colorimétrie, définie par ailleurs par des exigences architecturales par exemple. L'utilisation de pigments fluorescents permet alors d'accroître significativement l'albédo équivalent d'une surface urbaine, avec par exemple pour une toiture rouge sombre dont l'albédo est généralement faible (de l'ordre de 0,2) et qui peut atteindre avec cette technique une valeur de 0,64 (Berdahl et al., 2016). En plus de la réflectivité accrue dans le domaine des proches infrarouges, l'énergie solaire absorbée dans la partie visible du spectre est partiellement réémise aussi dans les proches infrarouges par effet de fluorescence. Pour la prise en compte de ces matériaux dans la modélisation, les interactions entre surfaces urbaines et le bilan radiatif seront également modifiées comme dans le cas des produits colorés cool dans le domaine des proches infrarouges et une subdivision des courtes longueurs d'onde en partie visible et ultraviolet, et proches infrarouges pourrait être nécessaire.

Les revêtements réfléchissants à sur-refroidissement diurne

Au-delà de la technique classique des cool roofs à forts albédo et émissivité thermique, ces matériaux, appelés aussi super-cool roof (Gentle and Smith, 2015), permettent d'atteindre des températures de surface inférieures à la température de l'air extérieur par temps clair et en exposition directe à l'éclairement solaire. Ce sur-refroidissement est obtenu par l'optimisation des échanges radiatifs vis-à-vis de la fenêtre atmosphérique (maximum de transmittivité de la couche atmosphérique) et du rayonnement de surface, dans la bande de longueur d'onde de 7,9 à 14 μm (Figure 69).

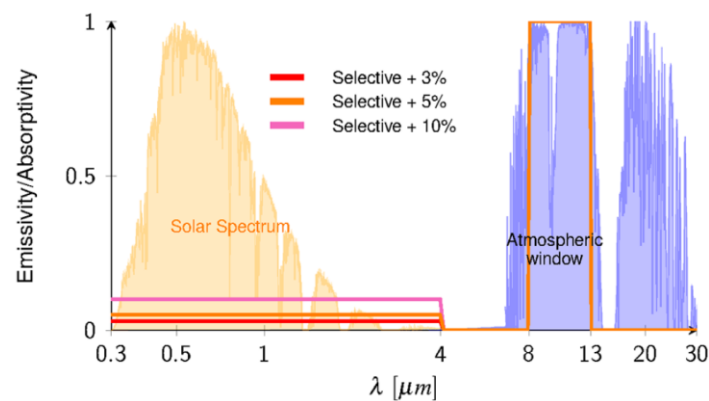


Figure 69 – propriétés radiatives idéales de 3 revêtements réfléchissants à sur-refroidissement diurne d'après (Rephaeli et al., 2013). En jaune le spectre solaire et en bleu la transmittivité atmosphérique.

Bien que les expérimentations montrent le réel potentiel de ces produits (Gentle and Smith, 2015; Rephaeli et al., 2013), en pratique la modélisation nécessitera une prise en compte fine des échanges radiatifs par bandes, ce qui implique différents niveaux de complexification :

- Les propriétés d'émissivité des matériaux généralement définies par une valeur dans les grandes longueurs d'onde (émissivité thermique mesurée par exemple par la norme ("ASTM C1371," 2015)) devraient être ici spécifiées par bande (dans le domaine des grandes longueurs d'onde) ainsi que les propriétés radiatives de voûte céleste.
- L'utilisation de valeurs pondérées supplémentaires pour les échanges avec le ciel et différente de la valeur usuelle pour les échanges avec les surfaces à température ambiante pourrait être proposée.
- Des valeurs différentes d'émissivité devraient être utilisées en fonction des conditions atmosphériques et de l'exploitation de la fenêtre atmosphérique, le sur-refroidissement radiatif n'étant plus possible par ciel couvert.

4.1.2 Des perspectives pour diverses techniques de rafraîchissement par évaporation

La rétention d'eau en surface de toiture terrasse, l'utilisation de matériaux semi-poreux ou l'humidification de chaussée doivent être optimisées dans leur fonctionnement tout en limitant les consommations d'eau. Nous avons initié l'intégration de l'effet de l'humidification des chaussées dans le cadre du projet EVA avec la modélisation à l'échelle du quartier par EnviBatE (Musy et al., 2016). La gestion de l'eau pluviale en toiture est également importante dans les règles d'urbanisme et les techniques de rétention et/ou stockage d'eau pour adapter le bâtiment aux problèmes de surchauffe peut se concevoir dans une analyse multicritère.

Au-delà du simple effet latent d'évapotranspiration que l'on retrouve dans la végétalisation des enveloppes, la conception des toitures et des façades peut combiner l'adaptation des propriétés radiatives et d'ombrage. Ainsi, pour la végétalisation il faudrait adapter la modélisation pour la prise en compte des variations de formes et des propriétés thermo-radiatives dans le temps, avec par exemple l'utilisation de végétaux à fort albédo, ou encore la combinaison de variétés complémentaires en fonction des besoins.

4.1.3 Verrous et développements envisageables

Ces développements récents de nouveaux produits semblent prometteurs, et offrent des perspectives d'études paramétriques intéressantes au-delà de l'échelle de la surface du matériau seul. Les principaux verrous seraient donc :

- D'étudier et de modéliser leurs effets couplés de l'échelle de la rue au quartier, en interaction avec les bâtiments et le microclimat.
- À l'inverse, de concevoir les propriétés adaptées à la conception d'un quartier, voire de combiner aussi l'adaptation de la morphologie du quartier, des propriétés de surface et du climat vis-à-vis des objectifs de performance énergétique et environnementale.

Nos outils actuels de modélisation sont insuffisants pour les intégrer directement de façon précise et ils devront donc être adaptés ou complétés pour permettre une intégration efficace. Il apparaît que la prise en compte des variations des propriétés radiatives par bandes de longueurs d'onde ou couplées aux autres phénomènes de transfert thermique devrait être considérée dans la modélisation. Quelques études expérimentales sont menées par des équipes de recherche sur la mise au point de ces produits, et l'étude expérimentale de leur intégration au bâtiment en contexte urbain peut être envisagée (telle que celle réalisée précédemment sur la plateforme ClimaBat). Cependant, la conception optimale des propriétés des produits adaptée à leur intégration en fonction du contexte local et du bâti exige un effort de modélisation important ainsi que des études paramétriques nombreuses afin d'optimiser les solutions.

En première approche, les variations des propriétés de surfaces peut donc se concevoir selon de très nombreuses combinaisons, même en considérant parmi les techniques proposées les moins coûteuses et les plus robustes, mais avec des propriétés variables adaptées aux microclimats et aux usages des bâtiments. Des modifications des outils de calcul devront être envisagées du point de vue des calculs radiatifs en particulier, tout en travaillant sur les possibles simplifications de modélisation pour permettre les calculs paramétriques et d'optimisation.

4.2 Des perspectives d'extension des plateformes de simulation

4.2.1 Intégration des systèmes, des réseaux énergétiques du quartier et de son environnement

Nos mesures et nos modèles pour l'études des interactions de l'environnement urbain devront également être étendus pour gagner en fiabilité, mais aussi vérifier et valider des niveaux d'interactions plus étendus et éventuellement plus complexes ou avec des simplifications possibles des systèmes couplés par des résolutions asynchrones par phénomènes ou par niveau d'échelle d'étude. Ainsi nous avons engagé des collaborations avec EDF et le CSTB sur le développement des outils de modélisation pour intégrer en particulier une modélisation des équipements techniques couplée à l'échelle du quartier et de son microclimat, ce qui permet d'envisager une conception intégrée de l'enveloppe et du quartier optimisée, incluant l'étude du comportement dynamique de la demande énergétique liée aux systèmes de conditionnement des ambiances et des possibilités de répartition des charges et de l'écrêtage des pics de puissance en régime dynamique.

À terme cette modélisation devra prendre en compte de façon plus fine les usages et comportements des occupants à l'échelle du bâtiment et du quartier (Robinson and Haldi, 2011, 2012), mais intégrer aussi d'autres usages ou moyens de stockage de l'énergie, par exemple pour les transports et les usages spécifiques, et enfin optimiser l'intégration des énergies renouvelables mais également de récupération d'énergie fatale au-delà de l'échelle du bâtiment.

Enfin, de même qu'une meilleure prise en compte des effets d'îlot de chaleur issue des modèles à méso-échelle permettrait d'améliorer la précision des prédictions des conditions de canopée, une approche plus précise des phénomènes d'îlot de chaleur du sous-sol urbain (Ferguson and Woodbury, 2004) devrait faire l'objet d'études de sensibilité et d'adaptation des modèles. Ainsi, nous avons identifié l'importance de la modélisation de l'inertie des sols à l'échelle du bâtiment (Lapisa et al., 2013b) et les effets de l'inertie variable à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments reste toujours un sujet d'étude à approfondir à l'échelle du quartier (Gros, 2013).

4.2.2 Vers la conception multicritère optimisée à l'échelle du quartier – nouvelles méthodologies et développement d'indicateurs agrégés

Les nouvelles techniques présentés montrent le besoin de poursuivre le développement de nos méthodologies de modélisation que nous avons initiées autour de la gestion des données issues de maquettes numériques de bâtiments et qui devraient s'étendre à l'échelle du quartier pour permettre des études de sensibilité et d'optimisation de paramètres dans une démarche de conception intégrée (Bozonnet et al., 2016; Brangeon et al., 2016; Chardon et al., 2016). Cependant, bien que la convergence des formats et outils de modélisation se développe, la complexité des niveaux de modélisation est complexe à gérer à l'échelle du quartier. De plus, les objectifs d'opti-

misation et l'exploitation des résultats est en réalité complexe du fait du niveau de détail des conditions dans le maillage de la canopée et de l'ensemble des zones intérieures des bâtiments, au pas de temps horaire sur une année. On retrouve ce niveau de complexité dans la prise de décision des maître d'ouvrage vis-à-vis des résultats détaillés, et de façon accrue par rapport à l'exploitation actuelle, déjà incomplète, des simulations thermiques dynamiques du bâtiment seul. Il est alors nécessaire de développer des indicateurs qui intègrent le large domaine d'étude et ne masquent pas les éventuels pics de puissances ou de températures localement ou dans le temps. Ces indicateurs sont importants non seulement pour la prise de décision mais aussi pour le développement de nos outils d'analyse de sensibilité ou d'optimisation vis-à-vis d'objectifs pertinents.

En première approche, nous avons commencé le développement d'une méthodologie à l'échelle du quartier pour définir des indicateurs de performance de dispositifs de rafraîchissement urbain, par rapport d'une part à une situation de référence d'un quartier existant et d'autre part au même quartier avec un traitement idéal des surfaces urbaines vis-à-vis de ce potentiel (Gros et al., 2016b). L'efficacité du rafraîchissement est définie de façon similaire à la méthode normalisée du calcul de l'index de réflectivité solaire SRI utilisé pour la caractérisation des produits cool roofs et défini par la norme ASTM E1980-11, où on compare des températures de surfaces pour différents revêtements. De même (Figure 70), on se propose ici de comparer la solution envisagée à d'une part la configuration de référence (avec une problématique d'îlot de chaleur local), et à d'autre part à la configuration idéale pour laquelle l'albédo solaire de toutes les surfaces opaques est mise à la valeur de 0,8 (même valeur que pour la définition de l'indice SRI). De même que le SRI définit le niveau de fraîcheur d'une surface exposée au soleil et en équilibre thermique en comparant les températures de surface atteintes, nous avons défini l'indice *ATMI* (Ambient Temperature Mitigation Index), équation (4-1), pour qualifier le niveau de rafraîchissement atteint vis-à-vis du cas idéal en comparant les degrés-heures cumulés DH [$^{\circ}\text{Ch}$] de surchauffe dans le quartier étudié. Ceci est applicable à l'îlot de chaleur surfacique mais aussi à l'écart de température extérieure cumulée en tous points de la canopée et intégré sur l'année. Pour des bâtiments climatisés, l'effet sur la demande énergétique de climatisation peut être évalué de la même façon en considérant cette fois les demandes énergétiques B [kWh] cumulées sur la période estivale. Il s'agit d'un indice *EPI* (Energy Performance Index) proposé à l'équation (4-2).



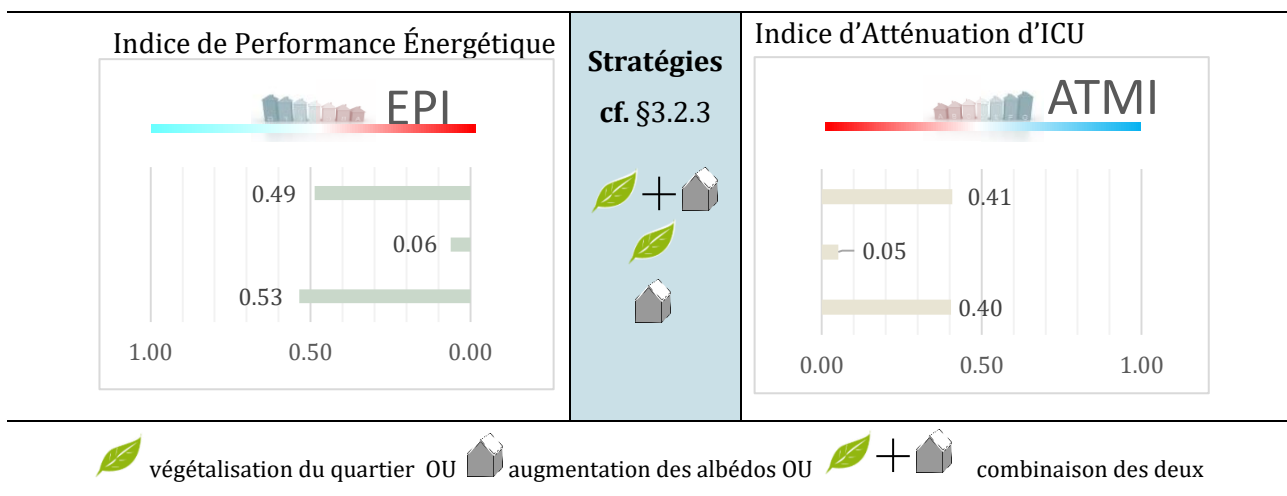
Figure 70 – Proposition d'un indice de performance de traitement des surfaces urbaines par analogie au SRI

$$ATMI = \frac{DH_{ref} - DH_{stratégie}}{DH_{ref} - DH_{idéal}} \quad (4-1)$$

$$EPI = \frac{B_{ref} - B_{stratégie}}{B_{ref} - B_{idéal}} \quad (4-2)$$

Appliqué au quartier Moncey (§3.2.3), nous obtenons des valeurs d'indices pour les différentes stratégies vis-à-vis de l'impact sur l'intérieur du bâtiment (*EPI*) et l'atténuation d'ilot de chaleur de la canopée (*ATMI*) (Tableau 4).

Tableau 4 - Indicateurs de performance énergétique (EPI) et microclimat (ATMI) pour 3 stratégies de rafraîchissement (végétalisation et albédo combinés, et séparés) du quartier Moncey, d'après (Gros et al., 2016b)



Ici par exemple (Tableau 4), les valeurs d'*EPI* et d'*ATMI* varient de façon similaire pour les trois stratégies, mais le gain sur *EPI* est le plus fort pour la stratégie d'albédo accru (*EPI* à 53%), tandis que le gain sur *ATMI* est le plus fort pour la combinaison des deux stratégies (*ATMI* à 41%). Cette approche permet de comparer différentes stratégies selon une échelle normalisée par rapport à un maximum atteignable de traitement des surfaces urbaines, indépendamment des contraintes morphologiques, des taux de vitrage et de la taille du quartier. Elle permet également d'intégrer des modifications locales de formes, de masques solaires ou de toute autre forme de traitement de l'ilot de chaleur local.

Enfin, différentes pistes de développement émergent vis-à-vis des problématiques d'aide à la décision pour la conception et la réhabilitation des quartiers :

- Les techniques pour les enveloppes adaptatives au climat et la prise en compte de la performance énergétique globale sur l'année devraient permettre de concevoir ou de proposer des stratégies qui incluent les effets positifs des ilots de chaleur en hiver. Ceci devrait être intégré soit dans une approche d'optimisation multicritères, soit dans la définition même d'indicateurs agrégés.

- La fiabilité des solutions de rafraîchissement passif peut se heurter à la variation du climat, en particulier pour les îlots de chaleur urbains qui pourraient être fortement amplifiés par le réchauffement climatique. L'utilisation de ces scénarii climatiques modifiés a déjà été abordée à l'échelle du bâtiment (Bozonnet et al., 2016) mais elle doit être étendue à l'échelle du quartier.
- La complexité des nombreux paramètres d'entrée et de l'utilisation des modèles rend difficile la systématisation des études dans la démarche de conception des îlots de bâtiments ou des quartiers. Cependant, des cas d'études types peuvent venir en support à l'aide à la décision en considérant des tendances et l'étude comparative de certaines stratégies en fonction de la localisation et des typologies de quartiers, de même que dans l'approche d'optimisation de certaines typologies de bâtiments (Lapisa, 2015).

BIBLIOGRAPHIE

- Akbari, H., Pomerantz, M., and Taha, H. (2001). "Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas" *Solar Energy* 70, 295–310.
- Allard, F., and Ghiaus, C. (2004). *Final Report of the URBVENT project* (Brussels: European Commission Directorate General For Research).
- "ASTM C1371 - Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers" (2015).
- "ASTM E1980-11 Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces" (n.d.).
- Bailey, K. M., and Ewing, M. E. (2011, July 28). "Roofing material with directionally dependent properties."
- Berdahl, P., Chen, S. S., Destailats, H., Kirchstetter, T. W., Levinson, R. M., and Zalich, M. A. (2016). "Fluorescent cooling of objects exposed to sunlight – The ruby example" *Solar Energy Materials and Solar Cells* 157, 312–317.
- Booth, T. M. (2012). *Validation of a data assimilation technique for an urban wind model* (Thesis).
- Botke, M. M. (2012, June 19). "Multifunctional energy management building cladding."
- Bourbia, F., and Awbi, H. B. (2004). "Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate: Part 1: Air and surface temperature measurements" *Renewable Energy* 29, 249–262.
- Bouyer, J., Inard, C., and Musy, M. (2011). "Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context" *Energy and Buildings* 43, 1549–1559.
- Bowker, G. E., Perry, S. G., and Heist, D. K. (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" (Vancouver, Canada) . Presented at the 13th Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the Air and Waste Management Assoc - Fifth Conference on Urban Environment.
- Bozonnet, E. (2005). *Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments : Cas de la rue canyon* (Thèse de Doctorat).
- Bozonnet, E., Allard, F., Chazelas, M., Guarracino, G., and Musy, M. (2008). "Du bâtiment à la ville, du microclimat à la demande énergétique" In J. Fol (Ed.), *Futur de l'habitat* (Jean-Michel Place / PUCA), pp. 139–154.
- Bozonnet, E., Allard, F., Musy, M., Chazelas, M., and Guarracino, G. (2006). *URBAT - Approche méthodologique de la construction durable en milieu urbain : le microclimat urbain et son impact environnemental sur les constructions* PUCA - Futur de l'Habitat - Réf. : F04.39 - CO 04 000058 p. 96.
- Bozonnet, E., Belarbi, R., and Allard, F. (2005). "Modelling solar effects on the heat and mass transfer in a street canyon, a simplified approach" *Solar Energy* 79, 10–24.
- Bozonnet, E., Belarbi, R., and Allard, F. (2006). "Etude de la demande énergétique de climatisation pour une construction urbaine de type méditerranéenne" *Tecnologia y Construcción* 22, p.27-34. ISSN 0798-9601.
- Bozonnet, E., Belarbi, R., and Allard, F. (2006). "Modelling air flows around buildings in urban environment" *International Workshop on Energy Performance and Environmental Quality of Buildings* (Milos island, Greece), p. 15 . Presented at the EPEQUB 2006.
- Bozonnet, E., Belarbi, R., and Allard, F. (2007). "Thermal Behaviour of buildings: modelling the impact of urban heat island" *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)* 14, 19–22.

- Bozonnet, E., Clerjaud, L., Salagnac, P., Trabelsi, A., and Perrin, R. (2012). "Etude expérimentale et numérique d'un bâtiment de dépôt et tertiaire à basse consommation" XXXèmes rencontres de l'AUGC-IBPSA - Constructions Durables (Chambéry - France), pp. 1145–1154 . Presented at the IBPSA France 2012.
- Bozonnet, E., Doya, M., and Allard, F. (2011). "Cool roofs impact on building thermal response: A French case study" *Energy and Buildings* 43, 3006–3012.
- Bozonnet, E., Lapisa, R., Salagnac, P., and Abadie, M. (2016). "Low-rise commercial buildings optimization – energy performance and passive cooling potential in France" *Building Simulation & Optimization 2016* (Newcastle, England), pp. 108–114 . Presented at the BSO16.
- Bozonnet, E., Musy, M., Calmet, I., and Rodriguez, F. (2015). "Modeling methods to assess urban fluxes and heat island mitigation measures from street to city scale" *International Journal of Low-Carbon Technologies* 10, 62–77.
- Brangeon, B., Bozonnet, E., and Inard, C. (2016). "Integrated refurbishment of collective housing and optimization process with real products databases" *Building Simulation & Optimization 2016* (Newcastle, England), pp. 531–538 . Presented at the BSO16.
- Buechley, R. W., Van Bruggen, J., and Truppi, L. E. (1972). "Heat ISLAND = death island?" *Environmental Research* 5, 85–92.
- Chandler, T. J. (1965). *The Climate of London* (Hutchison & Co (Publisher) LTD, London, U.K.).
- Chardon, S., Bozonnet, E., Montecot, R., and Inard, C. (2014). "Développement d'un outil pratique d'optimisation utilisant des algorithmes génétiques pour l'aide à la conception économique et énergétique des maisons individuelles" *Les modèles face aux résultats expérimentaux* (Arras, France) . Presented at the IBPSA France 2014.
- Chardon, S., Bozonnet, E., Montecot, R., and Inard, C. (2014). "A new tool for designing cost effective low energy houses in France" In L. Malki-Epstein, C. Spataru, L. Marjanovic-Halburd, and D. Mumovic (Eds.), *Proceedings of the 2014 Building Simulation and Optimization Conference* (UCL, London, UK) . Presented at the BSO14.
- Chardon, S., Brangeon, B., Bozonnet, E., and Inard, C. (2016). "Construction cost and energy performance of single family houses: From integrated design to automated optimization" *Automation in Construction* 70, 1–13.
- Chiffres clés de l'énergie* (No. édition 2012) (2012). (MEDDE, Commissariat général au développement durable), p. 40.
- Christen, A., and Vogt, R. (2004). "Energy and radiation balance of a central European city" *Int. J. Climatol.* 24, 1395–1421.
- Clarke, J. F. (1972). "Some effects of the urban structure on heat mortality" *Environmental Research* 5, 93–104.
- Clarke, J. F., and Bach, W. (1971). "Comparison of the comfort conditions in different urban and suburban microenvironments" *Int J Biometeorol* 15, 41–54.
- "Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique" (2007, August) .
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyerivan, T. (2002). "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II" *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6, 182–197.
- Denes, T., Bozonnet, E., and Calmet, I. (2009). "Modeling the global warming effect on indoor temperature peaks and cooling systems consumption" *BUILDING SIMULATION 2009* (Glasgow, Scotland), p. 117 . Presented at the Eleventh International IBPSA Conference.
- Depecker, P., Menezo, C., Virgone, J., and Lepers, S. (2001). "Design of buildings shape and energetic consumption" *Building and Environment* 36, 627–635.
- Dhalluin, A., and Bozonnet, E. (2014). "How UHI is taken into account in the location and the design of public buildings for sensitive people to rising temperature" In A. Muscio (Ed.), *Proceedings of the third international conference on countermeasures to urban heat island* (Venice, Italy), pp. 876–887 . Presented at the IC2UHI.
- Dhalluin, A., and Bozonnet, E. (2015). "Urban heat islands and sensitive building design – a study in some French cities' context" *Sustainable Cities and Society* 19, 292–299.

- Dhalluin, A., Bozonnet, E., and Ponton, P. (2013). *Prise en compte de l'effet des îlots de chaleur dans la localisation et la conception des établissements accueillant des publics sensibles aux élévations de température* (No. 01122013) (LaSIE, Université de La Rochelle - Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie - CGDD - SEEIDD), p. 73.
- "Directive 2010/31/EU of the European Parliament and the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), Official Journal of the European Communities, L 153/13" (2010, May 19).
- Djedjig, R. (2013, déc). *Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain* (Thèse de Doctorat).
- Djedjig, R., Bozonnet, E., and Belarbi, R. (2013). "Integration of a green envelope model in a transient building simulation program and experimental comparison" *Building simulation for a sustainable world* (Chambéry, France), pp. 49–55 . Presented at the Building Simulation 2013.
- Djedjig, R., Bozonnet, E., and Belarbi, R. (2015). "Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons" *Int. J. Low-Carbon Tech.* 10, 34–44.
- Djedjig, R., Bozonnet, E., and Belarbi, R. (2015). "Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program" *Energy and Buildings* 86, 93–103.
- Djedjig, R., Bozonnet, E., and Belarbi, R. (2016). "Modeling green wall interactions with street canyons for building energy simulation in urban context" *Urban Climate* 16, 75–85.
- Djedjig, R., Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R., and Bozonnet, E. (2012). "Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs" *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39, 752–761.
- Doya, M. (2010, July 8). *Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense* (Thèse de Doctorat).
- Doya, M., Bozonnet, E., and Allard, F. (2012). "Experimental measurement of cool facades' performance in a dense urban environment" *Energy and Buildings* 55, 42–50.
- Doya, M., Bozonnet, E., and Tassevil, C. (2014). *Advanced Building energy simulations* (No. Scientific Report ET-2014-01-001) (LaSIE-TIPEE, Université de La Rochelle), p. 236.
- Doya, M., Briottet, X., Djedjig, R., and Ouldboukhitine, S.-E. (2012). *Mesures de réflectivité dans le spectre solaire sur des surfaces végétalisées - Description des mesures VEGDUD du 23/09/2011* (Rapport interne) (Toulouse (France)), p. 22.
- Doya, M., Tassevil, C., Bozonnet, E., and Gros, A. (2014, October). *Methodologies for Building Energy Simulations and Integration of Microclimate Issues* . Presented at the Sustainable Places SP2014.
- Ferguson, G., and Woodbury, A. D. (2004). "Subsurface heat flow in an urban environment" *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth* 109, B02402 1-9.
- Ferrari, C., Libbra, A., Muscio, A., and Siligardi, C. (2013). "Influence of the irradiance spectrum on solar reflectance measurements" *Advances in Building Energy Research* 7, 244–253.
- "French thermal building regulation RT2012 - Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments" (2010, October 27).
- Gentle, A. R., and Smith, G. B. (2015). "A Subambient Open Roof Surface under the Mid-Summer Sun" *Advanced Science*.
- Georgakis, C., and Santamouris, M. (2005). "Canyon effects: Calculation of wind speed in an urban street canyon with the aid of a semi-empirical model based on experimental data" *International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment"* (Santorini, Greece).
- Groleau, D., Fragnaud, F., and Rosant, J.-M. (2003). "Simulation of the radiative behavior of an urban quarter of Marseille with the Solene model" *Fifth international conference on urban climate* (Lodz).
- Gros, A. (2013, June 26). *Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier* (Thèse de Doctorat).

- Gros, A., Bozonnet, E., and Inard, C. (2011). "Modelling the Radiative Exchanges in Urban Areas: A Review" *Advances in Building Energy Research* 5, 163–206.
- Gros, A., Bozonnet, E., and Inard, C. (2014). "Cool materials impact at district scale - Coupling building energy and microclimate models" *Sustainable Cities and Society* 13, 254–266.
- Gros, A., Bozonnet, E., Inard, C., and Musy, M. (2016). "Simulation tools to assess microclimate and building energy – A case study on the design of a new district" *Energy and Buildings, SI: Countermeasures to Urban Heat Island* 114, 112–122.
- Gros, A., Bozonnet, E., Inard, C., and Musy, M. (2016). "A new performance indicator to assess building and district cooling strategies" (Singapore), Vol. SUB02–Relationship between UHI, urban planning and building energy consumption and comfort . Presented at the 4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island - IC2UHI.
- Handler, A. B. (1970). *Systems approach to architecture* (American Elsevier Pub. Co.).
- Haq, G. (2002). "Learning from urban air pollution management in Europe" In G. Haq, W.-J. Han, and C. Kim (Eds.), *Urban air pollution management and practice in major and mega cities of Asia* (Korea Environment Institute, Seoul, Korea), pp. 160–185.
- Harman, I. N., Barlow, J. F., and Belcher, S. E. (2004). "Scalar Fluxes from Urban Street Canyons Part II: Model" *Boundary-Layer Meteorology* 113, 387–410.
- Harman, I. N., Best, M. J., and Belcher, S. E. (2004). "Radiative Exchange in an Urban Street Canyon" *Boundary-Layer Meteorology* 110, 301–316.
- Hosker, R. P. J. (1984). *Flow and Diffusion Near Obstacles* (No. Atmospheric Science and Power Production-DOE/TIC-27601, U.S. Dept. Of Energy, Wash., DC).
- Hosseini, M., and Akbari, H. (2016). "Effect of cool roofs on commercial buildings energy use in cold climates" *Energy and Buildings, SI: Countermeasures to Urban Heat Island* 114, 143–155.
- Hotchkiss, R. S., and Harlow, F. H. (1973). *Air pollution transport in street canyons* (No. Technical Report EPA-R4-73-029, NTIS PB-233 252) (Prepared by Los Alamos National Laboratory for U.S. Environmental Protection Agency).
- Howard, L. (1818). *The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations, Made at Different Places in the Neighbourhood of the Metropolis* (W. Phillips, sold also by J. and A. Arch, London, U.K.), Vol. 1.
- Inard, C., Bouia, H., and Dalicieux, P. (1996). "Prediction of air temperature distribution in buildings with a zonal model" *Energy and Buildings* 24, 125–132.
- Jensen, M. (2012, September 27). "United States Patent Application: 0120243113 - Hybrid Cool Roof."
- Jentsch, M. F., James, P. A. B., Bourikas, L., and Bahaj, A. S. (2013). "Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates" *Renewable Energy* 55, 514–524.
- Kaplan, H., and Dinar, N. (1996). "A lagrangian dispersion model for calculating concentration distribution within a built-up domain" *Atmospheric Environment* 30, 4197–4207.
- Klein, S. A. (1988). *TRNSYS - A transient system simulation program* (No. 38–12, version 12.2) Engineering Experiment Station Report (Madison, USA: University of Wisconsin).
- Klein, S. A., Beckman, W. A., Mitchell, J. W., Duffie, J. A., Duffie, N. A., Freeman, T. L., Mitchell, J. C., et al. (2010). *TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program* (Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA).
- Kondo, Y. (2006, August). *Current State and Future Prospects of Cool Roof in Japan* . Presented at the International Energy Agency Workshop on Countermeasures to Urban Heat Islands.
- Kratzer, A. (1956). *The Climate of Cities* (Air Force Cambridge Research Laboratories).
- Laaidi, K., Zeghnoun, A., Dousset, B., Bretin, P., Vandentorren, S., Giraudet, E., and Beaudeau, P. (2012). "The Impact of Heat Islands on Mortality in Paris during the August 2003 Heat Wave" *Environ Health Perspect* 120, 254–259.
- Lambert-Habib, M. L., Hidalgo, J., Fedele, C., Lemonsu, A., and Bernard, C. (2013). "How is climatic adaptation taken into account by legal tools? Introduction of water and vegetation by French town planning documents" *Urban Climate* 4, 16–34.

- Landsberg, H. E. (1981). *The urban climate* (J. Van Mieghem, H. L. Hales, and W. L. Donn, Eds.) International geophysics series, ISSN 0074-6142 (A Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich, Publishers, New-York), Academic Press., Vol. 28.
- Lapisa, R. (2015, December 16). *Étude du rafraîchissement passif de bâtiments commerciaux ou industriels* (Thèse de Doctorat).
- Lapisa, R., Abadie, M. O., Bozonnet, E., and Salagnac, P. (2014). "Numerical analysis of the thermal stratification modelling effect on comfort for the case of a commercial low-rise building" Proceedings of Indoor Air 2014 (Hong Kong), Vol. 4, pp. 310–317 . Presented at the Indoor Air 2014 - 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate.
- Lapisa, R., Bozonnet, E., Abadie, M. O., and Salagnac, P. (2013). "Cool roof and ventilation efficiency as passive cooling strategies for commercial low-rise buildings – ground thermal inertia impact" Advances in Building Energy Research 7, 192–208.
- Lapisa, R., Bozonnet, E., Abadie, M., and Salagnac, P. (2013). "Effect of ground thermal inertia on the energy balance of commercial low-rise buildings" Building simulation for a sustainable world (Chambéry, France), pp. 2068–3825 . Presented at the Building Simulation 2013.
- Lapisa, R., Bozonnet, E., Abadie, M., Salagnac, P., and Perrin, R. (2013). "Design impacts of cool roof coating, ventilation and thermal inertia on commercial low-rise building energy demand and summer comfort" Energy conservation technologies for mitigation and adaptation in the built environment: the role of ventilation strategies and smart materials (Athens, Greece), pp. 1061–1070 . Presented at the Joint Conference 34th AIVC - 3rd TightVent - 2nd Cool Roofs - 1st Venticool.
- "Le Grenelle Environnement, Groupe I: Lutter contre les changements climatiques et maîtriser l'énergie [The Grenelle Environment, Group I: To fight against the climate change and control the energy] (In French), Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables" (2007)..
- Malys, L. (2012). *Évaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments* (Thèse de Doctorat).
- McDowell, T. P., Emmerich, S. J., Thornton, J. W., and Walton, G. N. (2003). "Integration of Airflow and Energy Simulation using CONTAM and TRNSYS" ASHRAE Transactions (Kansas City, USA), Vol. 109, No. 1 . Presented at the ASHRAE Transactions 2003 Annual Meeting.
- Merlier, L. (2015, September 4). *On the interactions between urban structures and air flows: a numerical study of the effects of urban morphology on the building wind environment and the related building energy loads* (Thèse de Doctorat).
- Mestayer, P. g., Rosant, J.-M., Rodriguez, F., and Rouaud, J.-M. (2011). "La campagne expérimentale FluxSAP 2010 : Mesures de climatologie en zone urbaine hétérogène" La Météorologie 8, 34–44.
- Miguet, F., and Groleau, D. (2007). "Urban bioclimatic indicators for urban planners with the software tool SOLENE" (IOS PRESS, Lisbonne), pp. 348–355 . Presented at the SB07 Sustainable Construction, materials and practices : challenges of the industry for the new millennium.
- Mitalas, G. P., and Stephenson, D. G. (1967). "Room thermal response factors" ASHRAE Transactions 73, 1–10.
- Moussafir, J., Oldrini, O., Tinarelli, G., Sontowski, J., and Dougherty, C. M. (2004). "A new operational approach to deal with dispersion around obstacles: the mss (micro swift spray) software suite" 9 th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (Garmisch-Partenkirchen, Germany), pp. 114–118 . Presented at the Harmo9.
- de Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tréméac, B., Merchat, M., et al. (2013). "How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France?" Int. J. Climatol. 33, 210–227.
- Musy, M., Calmet, I., Bozonnet, E., and Rodriguez, F. (2011). "Modélisation des interactions Ville-Climat-Energie" La modélisation de la ville : de la représentation au projet, Références (Commissariat général au développement durable, ENPC, Marne la Vallée, France), pp. 16–33 . Presented at the Colloque GIS - Modélisation urbaine.

- Musy, M., Maillard, P., Azam, M.-H., Bailly, J.-B., Barel, E., Bozonnet, E., Calmet, I., et al. (2016). *EVA (Eau, Végétation, Albédo) - Quantitative assesment of the impacts from three urban cooling solutions on microclimate, buildings' energy demand and thermal comfort – application to lyon partdieu district* (Rapport final ADEME), p. 327.
- Musy, M., Wurtz, E., Winkelmann, F., and Allard, F. (2001). "Generation of a zonal model to simulate natural convection in a room with a radiative/convective heater" *Building and Environment* 36, 589–596.
- Niachou, K., Livada, I., and Santamouris, M. (2008). "Experimental study of temperature and air-flow distribution inside an urban street canyon during hot summer weather conditions— Part I: Air and surface temperatures" *Building and Environment, Hybrid Ventilation In The Urban Environment* 43, 1383–1392.
- Nicholson, S. E. (1975). "A pollution model for street-level air" *Atmospheric Environment* (1967) 9, 19–31.
- Nicolas, J. (2013, October 14). "Expérimentation : réduire l'effet d'îlot de chaleur urbain - Aménagement" *Le moniteur Hebdo*.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates* (University press, Cambridge), Second Edition.
- Pardiyak, E. R., Brown, M. J., and Bagal, N. (2004). "Improved Velocity Deficit Parameterizations for a Fast Response Urban Wind Model" 84th American Meteorological Society Annual Meeting (Seattle, WA).
- Pardiyak, E., and Brown, M. (2003). *QUIC-URB v1.1 - Theory and User's Guide* (Software Users Guide No. LA-UR-07-3181) (University of California, United States: Los Alamos National Laboratory).
- Plate, E. J., and Kiefer, H. (2001). "Wind loads in urban areas" *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89, 1233–1256.
- PNACC - Plan national d'adaptation de la France aux effets du changement climatique 2011-2015* (2011). (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie), p. 188.
- "RÉGLEMENTATION THERMIQUE 2012 RÈGLES Th-S : Caractérisation du facteur de transmission solaire des parois du bâtiment" (2012, March).
- Renou, É. J. (1858). *Instructions météorologiques, et Tables usuelles* (Paris), Société météorologique de France.
- Rephaeli, E., Raman, A., and Fan, S. (2013). "Ultrabroadband Photonic Structures To Achieve High-Performance Daytime Radiative Cooling" *Nano Lett.* 13, 1457–1461.
- Robinson, D., and Haldi, F. (2011). "Modelling Occupants' Presence and Behaviour – Part I" *Journal of Building Performance Simulation* 4, 301–302.
- Robinson, D., and Haldi, F. (2012). "Modelling Occupants' Presence and Behaviour – Part II" *Journal of Building Performance Simulation* 5, 1–3.
- Robinson, D., and Stone, A. (2005). "A simplified radiosity algorithm for general urban radiation exchange" *Building Services Engineering Research and Technology* 26, 271.
- Rockle, R. (1990). *Bestimmung der Stomungsverhältnisse im Bereich komplexer Bauungsstrukturen*. (Ph.D. thesis, Vom Fachbereich Mechanik, der Technischen Hochschule Darmstadt).
- Rossi, F., Morini, E., Castellani, B., Nicolini, A., Bonamente, E., Anderini, E., and Cotana, F. (2015). "Beneficial effects of retroreflective materials in urban canyons: Results from seasonal monitoring campaign" *Journal of Physics: Conference Series* 655.
- Rossi, F., Pisello, A. L., Nicolini, A., Filipponi, M., and Palombo, M. (2014). "Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat island mitigation: A new analytical model" *Applied Energy* 114, 621–631.
- Rotach, M. W. (1999). "On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion" *Atmospheric Environment* 33, 4001–4008.
- Rousseau, S. (1978). *Simulation numérique du comportement thermique des locaux d'habitation: évaluation de l'influence de la radiation solaire, des conditions climatiques et des paramètres caractéristiques du bâtiment* (Thèse de docteur-ingénieur).
- Rupp, R. F., Vásquez, N. G., and Lamberts, R. (2015). "A review of human thermal comfort in the built environment" *Energy and Buildings* 105, 178–205.

- Sailor, D. J. (2008). "A green roof model for building energy simulation programs" *Energy and Buildings* 40, 1466–1478.
- Santamouris, M., and Adnot, J. (2004). *Rafrâichir les villes* (Presses des MINES).
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A., and Assimakopoulos, D. N. (2001). "On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings" *Solar Energy* 70, 201–216.
- Santamouris, M., Synnefa, A., and Karlessi, T. (2011). "Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions" *Solar Energy* 85, 3085–3102.
- Schwarz, N., and Seppelt, R. (2009). "Analyzing vulnerability of european cities resulting from urban heat island" *Urbanization and Local Climate: Observing the Relationship* (Marseille, France) . Presented at the Fifth Urban Research Symposium.
- Sempey, A., Bozonnet, E., and Inard, C. (2007). *Développement de plateformes de simulation opérationnelles - Techniques de médiation entre les outils - Etude bibliographique* Projet DYNASIMUL - PREBAT 2006 p. 9 pages.
- Sherman, C. A. (1978). "A Mass-Consistent Model for Wind Fields over Complex Terrain" *J. Appl. Meteor.* 17, 312–319.
- Synnefa, A., Pantazaras, A., Santamouris, M., Bozonnet, E., Doya, M., Zinzi, M., Muscio, A., et al. (2013). "Interlaboratory comparison of cool roofing material measurement methods" *Energy conservation technologies for mitigation and adaptation in the built environment: the role of ventilation strategies and smart materials* (Athens, Greece) . Presented at the Joint Conference 34th AIVC - 3rd TightVent - 2nd Cool Roofs - 1st Venticool.
- Taha, H. (1997). "Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the South Coast Air Basin" *Atmospheric Environment* 31, 1667–1676.
- Trabelsi, A., Doya, M., Bozonnet, E., Salagnac, P., Belarbi, R., and Perrin, R. (2011). "Caractérisation expérimentale de propriétés radiatives de revêtements en toiture : Application à un bâtiment industriel" *Energie Solaire et Thermique* (Perpignan, France) . Presented at the Congrès Français de Thermique - SFT 2011.
- United Nations (2015). *World Urbanization Prospects - The 2014 Revision* (No. ST/ESA/SER.A/366) (New-York: Department of Economic and Social Affairs, Population Division), p. 517.
- Vaneckova, P., Beggs, P. J., and Jacobson, C. R. (2010). "Spatial analysis of heat-related mortality among the elderly between 1993 and 2004 in Sydney, Australia" *Social Science & Medicine* 70, 293–304.
- Voogt, J. A., and Oke, T. R. (2003). "Thermal remote sensing of urban climates" *Remote Sensing of Environment* 86, 370–384.
- Walton, G. N. (1980). "A new algorithm for radiant interchange in rooms loads calculations" *ASHRAE Transactions* 86 (II) pp. 190–208.
- Wang, Y., Berardi, U., and Akbari, H. (2016). "Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada" *Energy and Buildings, SI: Countermeasures to Urban Heat Island* 114, 2–19.
- Wilkins, E. T. (1954). "Air pollution aspects of the London fog of December 1952" *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 80, 267–271.
- Wright, A. J., Young, A. N., and Natarajan, S. (2005). "Dwelling temperatures and comfort during the August 2003 heat wave" *Building Services Engineering Research and Technology* 26, 285–300.
- Wurtz, E., Deque, F., Mora, L., Bozonnet, E., and Trompezinsky, S. (2003). "Sim_zonal: a software to evaluate the risk of discomfort: coupling with an energy engine, comparison with cfd codes and experimental measurements" *BUILDING SIMULATION 2003* (Eindhoven, Netherlands), pp. 1423–1428 . Presented at the Eighth International IBPSA Conference.
- Yuan, J., Farnham, C., and Emura, K. (2015). "Development of a retro-reflective material as building coating and evaluation on albedo of urban canyons and building heat loads" *Energy and Buildings* 103, 107–117.

Zinzi, M., and Bozonnet, E. (2013). "Cool Roofs' Case Studies" In D. Kolokotsa, M. Santamouris, and H. Akbari (Eds.), *Advances in the Development of Cool Materials for the Built Environment* Bentham Science Publishers., pp. 333–381.

Annexe A - CURRICULUM VITAE

Emmanuel Bozonnet – Maître de Conférences 60^{ème} section à l'université de la Rochelle – 42 ans

A.1. Parcours universitaire et professionnel

Depuis sept. 2006	Maître de conférences à l'Université de La Rochelle
2004-2006	ATER à l'IUT de Génie Civil de La Rochelle Enseignements : Thermique du bâtiment, équipement technique, béton armé, topographie et matériaux.
Juin 2005	Thèse de doctorat de Génie Civil LEPTAB (EA 2119) - Université de La Rochelle Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments –Cas de la rue canyon G. GUARRACINO (Rapporteur) Professeur, ENTPE, Lyon J.F. SINI (Rapporteur) Professeur, École Centrale de Nantes G. HÉGRON (Président du Jury) Professeur, École d'Architecture de Nantes F. ALLARD (Directeur de thèse) Professeur, Université de La Rochelle R. BELARBI (Directeur de thèse) Maître de conférences, Université de La Rochelle M. SANTAMOURIS (Examineur) Professeur, Université d'Athènes A. ALBERGEL (Membre invité) Directeur Général Délégué, ARIA Technologies
2001-2004	Allocataire moniteur normalien (AMN) – Université de la Rochelle
2000-2001	DEA de Génie Civil Option Physique du Bâtiment – mention bien École Centrale de Nantes/Université de La Rochelle
1999-2000	Agrégation externe de Génie Civil – rang 2 ^{ème} Option B – Équipements Techniques et Énergie (ETE)
Fév. 1999-Août 1999	Enseignant contractuel en dessin industriel de bâtiment Lycée Professionnel Roches Maigres de St-Louis (la Réunion)
Oct. 1997-Janv. 1999	Chargé de Mission ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) – Délégation Régionale Réunion. Montage et suivi des projets MDE et énergies renouvelables région Réunion.
1994-1997	ENS de Cachan 1996 – stage professionnel en GTB – Thorn-Jel S.A. (Paris) 1995 – stage professionnel essais normalisés bétons et sols – Alp'Essai (Paris)

A.2. Publications et production scientifique

A.2.1. Revues internationales à comité de lecture

- [1] Chardon, S., Brangeon, B., Bozonnet, E., & Inard, C. (2016). Construction cost and energy performance of single family houses: From integrated design to automated optimization. *Automation in Construction*, 70, 1-13. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.06.011>

- [2] Djedjig, R., Bozonnet, E., & Belarbi, R. (2016). Modeling green wall interactions with street canyons for building energy simulation in urban context. *Urban Climate*, 16, 75-85. <http://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.12.003>
- [3] Gros, A., Bozonnet, E., Inard, C., & Musy, M. (2016). Simulation tools to assess microclimate and building energy – A case study on the design of a new district. *Energy and Buildings*, 114, 112-122. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.032>
- [4] Djedjig, R., Bozonnet, E., & Belarbi, R. (2015a). Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 86, 93-103. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.057>
- [5] Djedjig, R., Bozonnet, E., & Belarbi, R. (2015b). Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10(1), 34-44. <http://doi.org/10.1093/ijlct/ctt019>
- [6] Bozonnet, E., Musy, M., Calmet, I., & Rodriguez, F. (2015). Modeling methods to assess urban fluxes and heat island mitigation measures from street to city scale. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10(1), 62-77. <http://doi.org/10.1093/ijlct/ctt049>
- [7] Dhalluin, A., & Bozonnet, E. (2015). Urban heat islands and sensitive building design – a study in some French cities' context. *Sustainable Cities and Society*, 19, 292-299. <http://doi.org/10.1016/j.scs.2015.06.009>
- [8] Gros, A., Bozonnet, E., & Inard, C. (2014). Cool materials impact at district scale - Coupling building energy and microclimate models. *Sustainable Cities and Society*, 13, 254-266. <http://doi.org/10.1016/j.scs.2014.02.002>
- [9] Lapisa, R., Bozonnet, E., Abadie, M. O., & Salagnac, P. (2013). Cool roof and ventilation efficiency as passive cooling strategies for commercial low-rise buildings – ground thermal inertia impact. *Advances in Building Energy Research*, 7(2), 192-208. <http://doi.org/10.1080/17512549.2013.865559>
- [10] Djedjig, R., Ould boukhitine, S.-E., Belarbi, R., & Bozonnet, E. (2012). Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(6), 752-761. <http://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.03.024>
- [11] Doya, M., Bozonnet, E., & Allard, F. (2012). Experimental measurement of cool facades' performance in a dense urban environment. *Energy and Buildings*, 55, 42-50. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.001>
- [12] Jaffal, I., Inard, C., & Bozonnet, E. (2012). Toward integrated building design: A parametric method for evaluating heating demand. *Applied Thermal Engineering*, 40, 267-274. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.02.005>
- [13] Bozonnet, E., Doya, M., & Allard, F. (2011). Cool roofs impact on building thermal response: A French case study. *Energy and Buildings*, 43(11), 3006-3012. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.017>
- [14] Gros, A., Bozonnet, E., & Inard, C. (2011). Modelling the Radiative Exchanges in Urban Areas: A Review. *Advances in Building Energy Research*, 5(1), 163-206. <http://doi.org/10.1080/17512549.2011.582353>
- [15] Bozonnet, E., Belarbi, R., & Allard, F. (2007). Thermal Behaviour of buildings: modelling the impact of urban heat island. *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)*, 14(Sup.), 19-22.
- [16] Bozonnet, E., Belarbi, R., & Allard, F. (2005). Modelling solar effects on the heat and mass transfer in a street canyon, a simplified approach. *Solar Energy*, 79(1), 10-24. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2004.10.007>

A.2.2. Chapitres d'ouvrages

- [1] Brangeon, B., & Bozonnet, E. (2016). Mise en œuvre de la simulation - Géométrie, liens avec la maquette numérique. In B. Peuportier (Éd.), *Énergétique des bâtiments et simulation thermique* (Eyrolles, p. 256-270). Paris, France. Consulté à l'adresse <http://www.eyrolles.com/BTP/Livre/energetique-des-batiments-simulation-thermique-9782212142754>
- [2] Musy, M., & Bozonnet, E. (2016). Mise en œuvre de la simulation - Microclimat et environnement proche. In B. Peuportier (Éd.), *Énergétique des bâtiments et simulation thermique* (Eyrolles, p. 240-256). Paris, France. Consulté à l'adresse <http://www.eyrolles.com/BTP/Livre/energetique-des-batiments-simulation-thermique-9782212142754>
- [3] Salagnac, P., Lapisa, R., Abadie, M. O., & Bozonnet, E. (2016). Nouvelles utilisations de la simulation - Bâtiment industriel et tertiaire. In B. Peuportier (Éd.), *Énergétique des bâtiments et simulation thermique* (Eyrolles, p. 415-424). Paris, France. Consulté à l'adresse <http://www.eyrolles.com/BTP/Livre/energetique-des-batiments-simulation-thermique-9782212142754>
- [4] Bozonnet, E., Belarbi, R., Djedjig, R., Gros, A., Malys, L., Inard, C., & Musy, M. (2014). Impacts sur la consommation énergétique et le confort dans les bâtiments. In M. Musy (Éd.), *Une ville verte - Les rôles du végétal en ville* (p. 67-84). Quae éditions. Consulté à l'adresse <http://www.quae.com/fr/r3400-une-ville-verte.html>
- [5] Zinzi, M., & Bozonnet, E. (2013). Cool Roofs' Case Studies. In D. Kolokotsa, M. Santamouris, & H. Akbari (Éd.), *Advances in the Development of Cool Materials for the Built Environment* (Bentham Science Publishers, p. 333-381). Consulté à l'adresse <http://www.eurekaselect.com/107422/chapter/cool-roofs%E2%80%99-case-studie>
- [6] Musy, M., & Bozonnet, E. (2013). Micro-climats et interactions avec le bâtiment. In B. Peuportier (Éd.), *Livre blanc sur les recherches en énergétique des bâtiments* (p. 39). Paris (France): Presses des MINES. Consulté à l'adresse <http://www.pressesdesmines.com/developpement-durable/livre-blanc-sur-les-recherches-en-energetique-des-batiments.html>
- [7] Bozonnet, E., Allard, F., Chazelas, M., Guarracino, G., & Musy, M. (2008). Du bâtiment à la ville, du microclimat à la demande énergétique. In J. Fol (Éd.), *Futur de l'habitat* (p. 139-154). Jean-Michel Place / PUCA.

A.2.3. Autres revues de diffusion et vulgarisation scientifique

- [1] Bozonnet, E., Djedjig, R., & Belarbi, R. (2014, mai-juin). Apports de la végétalisation à l'échelle des bâtiments et des quartiers : aspects thermiques. *Jardins de France*, (629), 15-17.
- [2] Bozonnet, E., Belarbi, R., & Allard, F. (2006). Étude de la demande énergétique de climatisation pour une construction urbaine de type méditerranéenne. *Tecnologia y Construccion*, 22(3), p.27-34. ISSN 0798-9601.
- [3] Bozonnet, E., & Allard, F. (2006). The Implementation of the Energy Performance Directive Throughout Europe - A review of the vocational training need for the EPBD throughout Europe. *Rehva Journal*, 6-11.

A.2.4. Articles de conférences internationales à comités de lecture

- [1] Gros, A., Bozonnet, E., Inard, C., & Musy, M. (2016). A new performance indicator to assess building and district cooling strategies (Vol. SUB02-Relationship between UHI, urban planning and building energy consumption and comfort). Présenté à 4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island - IC2UHI, Singapore.
- [2] Djedjig, R., Belarbi, R., & Bozonnet, E. (2016). Green wall impacts inside and outside buildings: experimental study. In *International Conference on Materials & Energy*. La Rochelle, France.
- [3] Brangeon, B., Bozonnet, E., & Inard, C. (2016). Integrated refurbishment of collective housing and optimization process with real products databases. In *Building Simulation & Optimization 2016*. Newcastle, England.

- [4] Bozonnet, E., Lapisa, R., Salagnac, P., & Abadie, M. (2016). Low-rise commercial buildings optimization – energy performance and passive cooling potential in France. In *Building Simulation & Optimization 2016*. Newcastle, England.
- [5] Chardon, S., Brangeon, B., Bozonnet, E., Inard, C., & Montecot, R. (2015). A multi objective design tool for the French detached house market: cost and energy performance optimization. In *14th International Building Simulation Conference* (p. 2073-2079). Hyderabad, India. Consulté à l'adresse <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2015/p2400.pdf>
- [6] 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 ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate, Toulouse (France).
- [7] Djedjig, R., Bozonnet, E., & Belarbi, R. (2014). A hygrothermal model of green walls interactions in street canyons – numerical development and experimental comparison. In A. Muscio (Éd.), *Proceedings of the third international conference on countermeasures to urban heat island* (p. 1540-1551). Venice, Italy. Consulté à l'adresse <http://www.ic2uhi.unimore.it>
- [8] Chardon, S., Bozonnet, E., Montecot, R., & Inard, C. (2014). A new tool for designing cost effective low energy houses in France. In L. Malki-Epsthein, C. Spataru, L. Marjanovic-Halburd, & D. Mumovic (Éd.), *Proceedings of the 2014 Building Simulation and Optimization Conference*. UCL, London, UK. http://www.bso14.org/BSO14_Papers/BSO14_Paper_017.pdf
- [9] Gros, A., Bozonnet, E., Inard, C., & Musy, M. (2014). Case study of a new district design through a coupled model for urban microclimate and building energy simulation. In A. Muscio (Éd.), *Proceedings of the third international conference on countermeasures to urban heat island* (p. 1552-1563). Venice, Italy. Consulté à l'adresse <http://www.ic2uhi.unimore.it>
- [10] Dhalluin, A., & Bozonnet, E. (2014). How UHI is taken into account in the location and the design of public buildings for sensitive people to rising temperature. In A. Muscio (Éd.), *Proceedings of the third international conference on countermeasures to urban heat island* (p. 876-887). Venice, Italy. Consulté à l'adresse <http://www.ic2uhi.unimore.it>
- [11] Musy, M., Malys, L., Morille, B., Szucs, A., Inard, C., Bozonnet, E., ... Chancibault, K. (2014). Impact of vegetation on urban climate, thermal comfort and building energy consumption – Overview of VegDUD project results. In A. Muscio (Éd.), *Proceedings of the third international conference on countermeasures to urban heat island* (p. 719-730). Venice, Italy. Consulté à l'adresse <http://www.ic2uhi.unimore.it>
- [12] Lapisa, R., Abadie, M. O., Bozonnet, E., & Salagnac, P. (2014). Numerical analysis of the thermal stratification modelling effect on comfort for the case of a commercial low-rise building. In *Proceedings of Indoor Air 2014* (Vol. 4, p. 310-317). Hong Kong. Consulté à l'adresse <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84924689946&partnerID=40&md5=c99f6b9d17c3671ee6e063261e79286f>
- [13] Lapisa, R., Bozonnet, E., Abadie, M., Salagnac, P., & Perrin, R. (2013). Design impacts of cool roof coating, ventilation and thermal inertia on commercial low-rise building energy demand and summer comfort. In *Energy conservation technologies for mitigation and adaptation in the built environment: the role of ventilation strategies and smart materials* (p. 1061-1070). Athens, Greece. Consulté à l'adresse <http://www.aivc.org/resource/design-impacts-cool-roof-coating-ventilation-and-thermal-inertia-commercial-low-rise>
- [14] Lapisa, R., Bozonnet, E., Abadie, M., & Salagnac, P. (2013). Effect of ground thermal inertia on the energy balance of commercial low-rise buildings. In *Building simulation for a sustainable world* (p. 2068-3825). Chambéry, France. Consulté à l'adresse http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_1286.pdf
- [15] Djedjig, R., Belarbi, R., & Bozonnet, E. (2013). Experimental Study of a Green Wall System Effects in Urban Canyon Scene. In *11th REHVA World Congress & 8th International Conference on IAQVEC* (p. 3086-3094). Prague, Czech Republic.

- [16] Gros, A., Alexaki, P., Bozonnet, E., & Inard, C. (2013). Influence of cool materials on building energy demand at district scale. In *Energy conservation technologies for mitigation and adaptation in the built environment: the role of ventilation strategies and smart materials* (p. 1050-1060). Athens, Greece.
- [17] Djedjig, R., Bozonnet, E., & Belarbi, R. (2013). Integration of a green envelope model in a transient building simulation program and experimental comparison. In *Building simulation for a sustainable world* (p. 49-55). Chambéry, France. Consulté à l'adresse http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_1225.pdf
- [18] Synnefa, A., Pantazaras, A., Santamouris, M., Bozonnet, E., Doya, M., Zinzi, M., ... Kolokotsa, D. (2013). Interlaboratory comparison of cool roofing material measurement methods. In *Energy conservation technologies for mitigation and adaptation in the built environment: the role of ventilation strategies and smart materials*. Athens, Greece.
- [19] Gros, A., Bozonnet, E., & Inard, C. (2012). Modelling the building energy demand at district scale. Présenté à 8th International Conference on Urban Climate - ICUC8, Dublin, Ireland.
- [20] Trabelsi, A., Bozonnet, E., Salagnac, P., Belarbi, R., & Perrin, R. (2011). Roof design and sky-lights effects on the energy performance and comfort of low energy industrial buildings. Présenté à ISES Solar world congress 2011, Kassel, Germany.
- [21] Doya, M., Bozonnet, E., & Allard, F. (2010a). Benefits of cool facades in dense urban environment. In *Cooling the Cities - The absolute Priority*. Rhodes Island, Greece.
- [22] Doya, M., Bozonnet, E., & Allard, F. (2010b). Comparison of Building Energy Models Prognostics for Cool Façades' Performance in a Dense Urban Environment. In *CLIMA 2010*. Antalya, Turkey.
- [23] Bozonnet, E., & Doya, M. (2010). Cool roofs impact on building thermal response - a French case study. In *Cooling the Cities - The absolute Priority*. Rhodes Island, Greece.
- [24] Zinzi, M., Bozonnet, E., Kolokotroni, M., Kolokotsa, D., Santamouris, M., & Synnefa, A. (2010). Technical advances in the EU-Cool Roof project. Présenté à EuroSun 2010, Graz, Austria.
- [25] Doya, M., Bozonnet, E., & Allard, F. (2009). Investigating changes in façades' energy balance according to coating optical properties. In *BUILDING SIMULATION 2009* (p. 1753-1760). Glasgow, Scotland. http://ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_1753_1760.pdf
- [26] Denes, T., Bozonnet, E., & Calmet, I. (2009). Modeling the global warming effect on indoor temperature peaks and cooling systems consumption. In *BUILDING SIMULATION 2009* (p. 117). Glasgow, Scotland. http://ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_0117_122.pdf
- [27] Doya, M., Bozonnet, E., & Allard, F. (2007). Theoretical evaluation of energy performance achieved by cool paints for dense urban environment. In C. M. Joppolo (Éd.), *Proceedings of CLIMAMED 2007 - Energy, Climate and Indoor Comfort in Mediterranean Countries* (p. 365-380). Genoa, Italy.
- [28] Katsamaki, A., Kolokotsa, D., Saridakis, G., Geros, V., Santamouris, M., Bozonnet, E., ... Radulov, L. (2006). An interactive vocational training tool for the energy performance buildings directive. In *Technologies & sustainable policies for a radical decrease of the energy consumption in buildings* (p. 20-22). Lyon, France. Consulté à l'adresse <http://www.aivc.org/resource/interactive-vocational-training-tool-energy-performance-buildings-directive?volume=34605>
- [29] Bozonnet, E., Belarbi, R., & Allard, F. (2006a). Modelling air flows around buildings in urban environment. In *International Workshop on Energy Performance and Environmental Quality of Buildings* (p. 15). Milos Island, Greece. Consulté à l'adresse http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive%5CMilos2006%5C04_Bozonnet_6P.pdf
- [30] Bozonnet, E., Belarbi, R., & Allard, F. (2006b). Study of air conditioning energy demand for a Mediterranean urban construction - étude de la demande énergétique de climatisation pour une construction urbaine de type méditerranéenne. In *Proceedings of 3rd Mediterranean Congress of HVAC Engineering - Sustainable conditioning of indoor spaces* (p. 247-255). Lyon, France: Francis Allard & Mirela Robitu.

- [31] Bozonnet, E., Belarbi, R., & Allard, F. (2005). Modelling solar effects on the heat and mass transfer in a street canyon, a simplified approach. In *Réhabilitation des constructions et développement durable*. Alger, Algeria.
- [32] Wurtz, E., Deque, F., Mora, L., Bozonnet, E., & Trompezinsky, S. (2003). Sim_zonal: a software to evaluate the risk of discomfort: coupling with an energy engine, comparison with cfd codes and experimental measurements. In *BUILDING SIMULATION 2003* (p. 1423-1428). Eindhoven, Netherlands. http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2003/BS03_1423_1428.pdf

A.2.5. Articles de conférences nationales à comité de lecture

- [1] Bozonnet, E., Lapisa, R., Salagnac, P., & Abadie, M. (2016). Optimisation des enveloppes de bâtiments commerciaux - cartographie des stratégies de conception passive en France. In *Conférence IBPSA France*. Marne-la-Vallée, France.
- [2] Lapisa, R., Abadie, M. O., Bozonnet, E., Salagnac, P., & Perrin, R. (2015). Caractérisation expérimentale et numérique des performances d'un bâtiment tertiaire et industriel. In *La Thermique de l'Habitat et de la Ville* (Vol. 23, p. 827-834). La Rochelle, France: Société Française de Thermique.
- [3] Srun, A., Cordeiro Mendonça, K., Salagnac, P., Bozonnet, E., & Inard, C. (2015). Méthode d'optimisation pour la conception de systèmes compacts. In *La Thermique de l'Habitat et de la Ville*. La Rochelle, France: Société Française de Thermique.
- [4] Chardon, S., Bozonnet, E., Montecot, R., & Inard, C. (2014). Développement d'un outil pratique d'optimisation utilisant des algorithmes génétiques pour l'aide à la conception économique et énergétique des maisons individuelles. In *Les modèles face aux résultats expérimentaux*. Arras, France.
- [5] Lapisa, R., Bozonnet, E., Abadie, M. O., Salagnac, P., & Perrin, R. (2014). Étude de l'impact des « cool roofs », de la ventilation naturelle et de l'inertie thermique du sol sur les performances énergétiques de bâtiments commerciaux. In *Approches multi-échelles pour la thermique, l'énergétique et le génie des procédés* (Vol. 22, p. 351-358). Lyon: Société Française de Thermique.
- [6] Lapisa, R., Abadie, M. O., Bozonnet, E., & Salagnac, P. (2014). Étude numérique de la stratification thermique pour l'évaluation du confort thermique d'un bâtiment commercial de faible hauteur. In *Les modèles face aux résultats expérimentaux*. Arras, France.
- [7] Bozonnet, E., Clerjaud, L., Salagnac, P., Trabelsi, A., & Perrin, R. (2012). Étude expérimentale et numérique d'un bâtiment de dépôt et tertiaire à basse consommation. In *XXXèmes rencontres de l'AUGC-IBPSA - Constructions Durables* (p. 1145-1154). Chambéry - France.
- [8] Salagnac, P., Bozonnet, E., Clerjaud, L., Trabelsi, A., & Perrin, R. (2012). Impact des propriétés radiatives de revêtements de toiture sur la consommation énergétique d'un bâtiment industriel. In *Thermique en Conditions Extrêmes* (Vol. 1, p. 402). Bordeaux, France. Consulté à l'adresse http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/Congres_2012/Tome1_bordeaux_2012.pdf
- [9] Clerjaud, L., Trabelsi, A., Bozonnet, E., Salagnac, P., Belarbi, R., & Perrin, R. (2012). Impact des revêtements de toitures (cool roofs) et des lanterneaux sur la performance énergétique et le confort des bâtiments industriels basse consommation. In *Matières et matériaux pour l'enveloppe du bâtiment - Outils, mesures et méthodes* (p. 305-315). Paris (France): CoDEM.
- [10] Djedjig, R., Bozonnet, E., & Belarbi, R. (2012). Modélisation dynamique des transferts hygrothermiques dans les enveloppes de bâtiments végétalisées. In *IBPSA France 2012*. Chambéry - France.
- [11] Trabelsi, A., Doya, M., Bozonnet, E., Salagnac, P., Belarbi, R., & Perrin, R. (2011). Caractérisation expérimentale de propriétés radiatives de revêtements en toiture : Application à un bâtiment industriel. In *Énergie Solaire et Thermique*. Perpignan, France. Consulté à l'adresse http://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres_2011/Communications/215.pdf

- [12] Gros, A., Bozonnet, E., & Inard, C. (2011). Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier. In *La modélisation de la ville : de la représentation au projet* (p. 272-275). ENPC, Marne la Vallée, France: Commissariat général au développement durable. Consulté à l'adresse http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Ref-Modelisation_urbaine.pdf
- [13] Musy, M., Calmet, I., Bozonnet, E., & Rodriguez, F. (2011). Modélisation des interactions Ville-Climat-Énergie. In *La modélisation de la ville : de la représentation au projet* (p. 16-33). ENPC, Marne la Vallée, France: Commissariat général au développement durable. Consulté à l'adresse http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Ref-Modelisation_urbaine.pdf
- [14] Doya, M., Bozonnet, E., & Allard, F. (2010). Impact de la réflectivité solaire dans la simulation énergétique du bâtiment. Présenté à IBPSA France 2010 - Fiabilisation de la performance énergétique du bâtiment : simulation et expérimentation, Moret-Sur-Loing.
- [15] Bozonnet, E. (2006). Les microclimats urbains et la demande énergétique du bâti. In *24èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil* (p. 14). France.
- [16] Bozonnet, E., Belarbi, R., & Allard, F. (2006). Modélisation couplée des transferts thermo-aérodynamiques à l'échelle d'une rue. In *IBPSA 2006*. France.
- [17] Bozonnet, E., Belarbi, R., & Allard, F. (2003). Impact du micro climat urbain sur les bâtiments : Circulation d'air et évaluation du rayonnement solaire à l'échelle d'une rue (Vol. 1, p. 135-142). Présenté à XXIèmes rencontres universitaires de génie civil, Université de la Rochelle.
- [18] Bozonnet, E., Wurtz, E., Belarbi, R., & Allard, F. (2002). Simulation thermo-aérodynamique du microclimat urbain à l'échelle d'une rue de type canyon. Présenté à IBPSA France, Saint-Denis la Plaine, France.

A.2.6. Principaux Workshops et communications dans des conférences sans actes

- [1] Bozonnet, E., Musy, M., & Faure, X. (2015, octobre). *Scientific tools for microclimate study*. Présenté à Simurex 2015 - SIMULATION et Retour d'EXpérience, Porticcio, Corsica, France. Consulté à l'adresse http://simurex.ibpsa.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=57&Itemid=82
- [2] Bozonnet, E. (2015, mai). *Numerical simulation and experimental mockup for buildings in urban context*. Workshop présenté à CHAMPS 2015 - The 12th International Forum and Workshop on Combined Heat, Air, Moisture and Pollutant Simulations, La Rochelle, France.
- [3] Musy, M., & Bozonnet, E. (2015, mai). *Revue des différentes approches de modélisation du quartier*. Présenté à Journées thématiques IBPSA France 2015, La Rochelle, France. Consulté à l'adresse http://ibpsa.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=131
- [4] Doya, M., Tassevil, C., Bozonnet, E., & Gros, A. (2014, octobre). *Methodologies for Building Energy Simulations and Integration of Microclimate Issues*. Présenté à 2nd smart city focus group meeting, Nice, France. Consulté à l'adresse <http://republic-med.eu/index.php/en/overview/17-public-events/63-2nd-smart-city-focus-group-meeting-france>
- [5] Bozonnet, E. (2013, septembre). *UHI workshop*. Workshop, Athens, Greece.
- [6] Musy, M., & Bozonnet, E. (2011, janvier). *Façades et toitures : impacts climatiques et thermiques*. Présenté à 6èmes Rencontres du Végétal, Angers, France.
- [7] Gros, A., Bozonnet, E., & Inard, C. (2011). Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier. In *La modélisation de la ville : de la représentation au projet* (p. 272-275). ENPC, Marne la Vallée, France: Commissariat général au développement durable. Consulté à l'adresse http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Ref-Modelisation_urbaine.pdf
- [8] Trabelsi, A., Bozonnet, E., Salagnac, P., Belarbi, R., & Perrin, R. (2010, novembre). *Étude de l'impact des ouvrants en toiture sur les performances énergétiques de bâtiments industriels*. Présenté

à IBPSA France 2010 - Fiabilisation de la performance énergétique du bâtiment : simulation et expérimentation, Moret-Sur-Loing.

- [9] Bozonnet, E. (2007). The EPBD training needs throughout the professional's fields and the various European member states. In *WellBeing Indoors - WS1 - Web based learning for the Energy Performance of Buildings Directive*. Helsinki, Finland.
- [10] Bozonnet, E., Belarbi, R., & Allard, F. (2003). *Simulation thermoaéraulique du microclimat urbain à l'échelle d'une rue de type canyon*. Présenté à Les Entretiens du Réseau Génie Civil et Urbain, Paris, France.

A.2.7. Conférences et cours invité

- [1] Plenary speaker IC2UHI (2016, 30 mai, Singapour). *A new performance indicator to assess building and district cooling strategies*.
- [2] IABP PhD summer school 2015 (2015, 19 juin, Politecnico di Torino, Turin, Italy). *UHI and energy demand - Building physics in urban environments*.
- [3] Cours Chambre des Métiers CMA06 – 8h (2015, mai, Nice, France) *Performance parameters of building surfaces – Matériaux Intelligents (MAIN)*
- [4] Conférence invité Solar Meetings (2011, 29 novembre, Chambéry, France). *Cool Roofs - Rafraîchissement des bâtiments et des ambiances urbaines*.
- [5] Keynote PALENC 2010 (2010, Rhodes Island, Grèce). *Cool roofs impact on building thermal response - a French case study*.
- [6] Cours M2 GBBV – 14h/an (depuis 2012, ENTPE de Lyon, France) *Innovative materials for buildings and the urban environment*.
- [7] Cours M2 Qualité Environnementale du Cadre Bâti en Milieu Tropical – 16h (2011, Université de la Réunion). *Ilots de chaleur urbains*.
- [8] Cours ENTPE – 4h (2010, Lyon, France). *Microclimat urbain et bâtiment – module bâtiment et environnement du cycle constructions responsables*
- [9] Cours Université de Caracas – 8h (2007, Caracas, Venezuela) *Confort interior de verano, demanda energética de climatización y microclima urbano – programme ECOS-Nord Venezuela*

A.3. Encadrement doctoral et scientifique

A.3.1. Encadrements de thèses de doctorat

- [1]. Remon LAPISA. Début 09/2012, soutenue le 16/12/2015 – actuellement enseignant-chercheur à l'Université de l'État de Padang, Indonésie
Étude des performances énergétiques de bâtiments à usage commercial et industriel
Financement gouvernement indonésien - Codirection avec Patrick Salagnac et Marc Abadie
- [2]. Rabah DJEDJIG. Début 01/10/2010, soutenue le 11/12/2013 – actuellement maître de conférences à l'université de Lorraine, laboratoire LERMAB
Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain
Financement ANR (projet VegDUD) - Codirection avec Rafik Belarbi
- [3]. Adrien GROS. Début 01/09/2009, soutenue le 26/06/2013 – actuellement post-doctorant à l'École Polytechnique de Curitiba, Brésil
Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier
Financement ADEME et Région Poitou-Charentes - Codirection avec Christian Inard
- [4]. Maxime DOYA. Début 01/09/2006, soutenue le 08/07/2010 – actuellement chef de projets à Tipee, la Rochelle, France
Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense

A.3.2. Encadrements postdoctoral

- [5]. Madi KABORE (post-doctorant). 06/2016 – 05/2017
Mise en place d'un guide de rafraîchissement urbain et optimisation des techniques de rafraîchissement.
Financement SOPREMA – Co-encadrement avec Patrick Salagnac
- [6]. Boris BRANGEON (post-doctorant). 03/2014 – 03/2017
Développement d'un prototype pour la conception intégrée du bâtiment par un outil de cosimulation économique-énergétique, la gestion de la maquette numérique et l'optimisation multicritère.
Financement ANR et ADEME (projet COSIMPHI et TIPEE, et RENOIR) – Co-encadrement avec Christian Inard
- [7]. Adrien GROS (post-doctorant). 09/2013 – 07/2016 – actuellement post-doctorant à l'École Polytechnique de Curitiba, Brésil
Modélisation de la demande énergétique à l'échelle d'un projet d'aménagement urbain
Financement ADEME (projets EVA et TIPEE) – Co-encadrement avec Christian Inard
- [8]. Alexandra TALLET (post-doctorante). 09/2015 – 08/2016 – actuellement professeure certifiée
Analyse de sensibilité et optimisation par algorithme génétique d'un système vecteur air pour le cas d'un bâtiment tertiaire
Financement ANR (projet VENISE) – Co-encadrement avec Christian Inard
- [9]. Katia ABADIE CORDEIRO (post-doctorante). 09/2013 – 08/2014 – actuellement enseignante-chercheur au CESI (École d'ingénieur)
Développement d'une librairie de modèle sous DYMOLA et conception d'un système vecteur air pour le cas d'une maison individuelle
Financement ANR (projet VENISE) – Co-encadrement avec Christian Inard et Patrick Salagnac
- [10]. Lilian CLERJAUD (post-doctorant). 09/2011 – 04/2012 – actuellement ingénieur formateur ArchiWizard, GRAITEC
Maquette numérique d'un bâtiment industriel et suivi expérimental
Financement SOPREMA – Co-encadrement avec Patrick Salagnac
- [11]. Abdelkrim TRABLESI (post-doctorant). 04/2010 – 08/2011 – actuellement maître de conférences à l'INSA de Lyon, laboratoire CETHIL
Caractérisation des produits de toiture et modélisation de bâtiments industriels et commerciaux
Financement SOPREMA – Co-encadrement avec Patrick Salagnac & Rafik Belarbi
- [12]. Timea DENES BEJAT (nov. 2008 – jan. 2010) – actuellement ingénieure de recherche au CEA/INES
Couplage de modèles méso-échelle et de simulation thermique dynamique du bâtiment.
Financement IRSTV (projet MEIGville) – Co-encadrement avec Christian Inard
- [13]. Agota. SZUCS (sept. 2008 – août 2009) – actuellement professeure des écoles
Mise en place du comité européen Cool Roofs
Financement projet européen COOLROOFS – Co-encadrement avec Francis Allard
- [14]. Alain SEMPEY (sept. 2007 – août 2008) – actuellement maître de conférences à l'Université de Bordeaux, laboratoire I2M
Développement d'une plateforme de simulation dynamique du bâtiment.
Financement ANR (projet Dynasimul) – Co-encadrement avec Christian Inard

A.3.3. Encadrements de stages de master en recherche

- [15]. Antoine CEZERA (École d'ingénieur EIGSI, La Rochelle). 04/2016 – 08/2016
Analyse des paramètres d'optimisation multicritères pour la réhabilitation des logements collectifs et méthodologie pour la prise en compte des systèmes énergétiques
- [16]. Cécile TASSEVIL (M2 DTU, Denmark Technical University et SupMeca Paris). 02/2014 – 08/2014
Simulation thermique dynamique avancée et étude microclimats
- [17]. Alexaki PETROULA (M2 ENSE3 Grenoble). 03/2013 – 09/2013
Study of the energy performance of buildings at a district scale
- [18]. Wilfried GAUDRON (M1 GI3ER La Rochelle). 03/2013 – 05/2013
Typologies de maisons individuelles BBC – calculs de performance énergétique et coût
- [19]. Remon LAPISA (M2 GI3ER La Rochelle). 03/2011 – 08/2011
Étude numérique de l'impact des ouvrants en toiture sur les performances énergétiques d'un bâtiment industriel
- [20]. Wendy NUGROHO (M2 GI3ER La Rochelle). 03/2011 – 08/2011
Caractérisation expérimentales des propriétés thermo-optiques de revêtement de toitures terrasses et étude de l'impact de ces propriétés radiatives sur le bâti
- [21]. Mourad RAHIM (M2 Université de Belfort). 03/2011 – 09/2011
Module de thermique du bâtiment pour une plateforme automatisée d'aide à la conception des enveloppes

A.4. Diffusion scientifique

Au-delà des cours et conférences invités (8) et de la rédaction de chapitres d'ouvrages collectifs (7) au niveau national et international, j'ai participé à différents séminaires et tables rondes sur mes thèmes de recherche (non répertoriés ici), ainsi qu'à des collaborations et expertises détaillées ci-après.

A.4.1. Expertises pour des instances nationales et étrangères

- Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME – France) : **1** projet AMI (Appel à Manifestation d'Intérêt pour la rénovation et la construction de bâtiments)
- Agence Nationale de la Recherche (ANR – France) :
1 projet HABISOL (2010), **1** projet SEED (2012), **1** projet MONU (2013)
- Fonds de la Recherche Scientifique (FNRS – Belgique) :
1 projet (2012), **2** projets (2013)
- Comités de sélection de MCF (France) :
2 CoS en 2010, **2** CoS en 2011, **1** CoS en 2012, **1** CoS en 2013, **1** CoS en 2015, **1** CoS en 2016
- Éditeur revue ESSD (Environmental Science & Sustainable Development, ISSN: 2357-0849)
<http://www.ierek.com/press/index.php/ESSD/about/editorialTeam>
- Reviews pour des revues internationales :
Principalement dans *Energy and Buildings*
"Acknowledgment of Reviewers for 2011" (2012). *Energy and Buildings* 49, 648–651.
Reviews pour d'autres revues depuis :
Solar Energy, Solar Energy and Materials, Indoor and Built Environment, International Journal of Low-Carbon Technologies, International Journal of Thermal Sciences, Energy Efficiency, Applied Energy, Energies, Sustainable Cities and Society, Building And Environment, ...

- Reviews d'articles pour des conférences internationales et nationales :
SFT (2012, 2013, 2014), Building Simulation (Chambéry-2013), AIVC Conference (Athènes-2013), IC2UHI (Venise-2014), IBPSA France (2012, 2014, 2016), ClimaMed (2015), IC2UHI (Singapour-2016), FICUP (Galapagos-2016)

A.4.2. Participation à des comités de normalisation

Expert scientifique dans le comité de normalisation européen CEN/TC 254/WG 16 'Roof reflectivity' (représentant français pour l'AFNOR) – depuis septembre 2012

7 experts désignés (Allemagne, Danemark, Italie, Grande-Bretagne, Suisse, France)

Rôles exercés : participation aux réunions, liens avec les normes existantes (US) et travaux et résultats expérimentaux.

A.4.3. Collaborations internationales pour des actions labellisées

- Essais inter-laboratoires européens pour la caractérisation de propriétés radiatives de matériaux de construction en grandes et courtes longueurs d'onde (2012 – 2013)

11 laboratoires européens

6 pays (Grande-Bretagne, Italie, Grèce, France, Suisse, Allemagne).

Les résultats ont été publiés et communiqués

Rôles exercés : essais au laboratoire, contribution à la rédaction des rapports

Sur cette base j'ai participé à la mise en place d'une démarche de labellisation et au manuel de référence du European Cool Roofs Council (ECRC - <http://coolroofcouncil.eu/prp.php>) :

Initial Product Rating Manual - Technical Committee - V1_July 2013 (26 p.)

- Mise en place d'une procédure de labellisation pour des stations de vieillissement naturel pour la labellisation des matériaux de toiture (depuis 2012) - travaux du European Cool Roofs Council (ECRC - <http://coolroofcouncil.eu/prp.php>).

3 laboratoires européens candidats, environ 20 participants actifs.

Rôles exercés : responsable du groupe de travail au sein du comité technique, rédaction d'une préversion du document de référence : *Programme for weathering test-farm measurement* (2013) – non publique.

A.5. Responsabilités scientifiques

A.5.1. Contrats européens

- Projet Européen MED-MAIN, MATériaux Intelligents (2015) pour la CMA06 (Chambre des métiers Alpes Maritimes)

Développement de cours et supports pédagogiques à plusieurs niveaux (standards et avancés) sur les mesures pour lutter contre les îlots de chaleur urbains.

Coordination scientifique LaSIE : E. Bozonnet / Participants : C. Inard, M. Doya

Rôles exercés : bibliographie et développement de supports en anglais, traduction et réalisation de formations en français, gestion administrative et financière.

- Projet européen REPUBLIC-MED (Mars 2014 à Juin 2015) pour le compte d'AViTeM (Agence des Villes et Territoires Méditerranéens Durables)

Prestation de services dans le cadre du projet Européen REPUBLIC-MED (REtrofitting PUBLIC spaces in Intelligent MEDiterranean Cities) - <http://republic-med.eu>

Participants : M. Doya, A. Gros, C. Tassevil, E. Bozonnet

Rôles exercés : modélisations avancées de transferts multi-échelles dans le bâtiment et son environnement proche portant sur 3 bâtiments et 2 espaces urbains de la Métropole Nice Côte

d'Azur (MNCA). Mise en place des outils de modélisation avancée Solene, TRNSYS+CONTAM, analyse paramétrique sous python, QuicUrb et EnviBatE pour le quartier.

- Projet européen – Intelligent Energy COOLROOFS (du 09-2008 au 03-2011)

Responsabilité scientifique LaSIE : E. Bozonnet / Participants: M. Doya, F. Allard, A. Scuzc partenaires NATIONAL AND KAPODESTRIAN UNIVERSITY OF ATHENS, Technological Educational Institute of Crete, PERDIKIS BROS CO., Municipality of Kessariani, Brunel University, Greater London Authority, SIPEA HABITAT, Italian National Agency for New Technologies, Energy and the Environment, Regional Province of Trapani - Sector for Land Environment Natural Resources, ECOBIOS, Federation of European heating and air-conditioning associations (REHVA), Athena Consulting Group.

Rôles exercés : Responsable et animation du WP2 (sur 6) pour la mise en place d'un comité européen pour la standardisation de cette technique, recrutement et suivi d'un postdoc (1 an), expérimentations in-situ, modélisation, rédaction et traduction de rapports, identification des partenaires clés, communication scientifique et technique, suivi administratif et financier.

- projet Européen – Intelligent Energy EEED (2005-2007) Electronic European Buildings Directive

Établir un outil de formation professionnel interactif accompagnant la mise en place de la Directive Européenne sur la Performance énergétique des Bâtiments (Directive 2002/91/CE – EPBD). J'ai aussi participé à la coordination du projet, le LEPTAB étant responsable du Work Package 1 qui consiste à définir les besoins de formation au niveau européen

A.5.2. Contrats nationaux

- Projet ADEME RENOIR, Réhabilitation ÉNergétique Optimisée et IntégRée en logement collectif (2015-2016)

Développer une méthode de conception intégrée orientée BIM dans les opérations de réhabilitation en logement collectif, sur la base de méthodes d'optimisation intégrant à la fois le coût global et la performance énergétique.

Coordinateur projet : E. Bozonnet

Partenaires : LaSIE, CSTB, TIPEE

Rôles exercés : Coordinateur scientifique du projet, animation du groupe de travail en étroite collaboration avec les projets ANR COSIMPHI et ADEME RUPHELLA, encadrement post doctoral pour la mise en œuvre d'un prototype opérationnel de simulation économique-énergétique, gestion administrative et financière.

- Projet ANR COSIMPHI (ANR-13-VBDU-0002), CO-Simulation Multi-Physique Interactive (2014-2017)

Responsable scientifique LaSIE : E. Bozonnet / Coordination (CSTB)

Partenaires : CSTB, TRIBU Energie, CEA, G2ELAB, ENSA-LRA, LaSIE

Rôles exercés : Responsable de la mise en place de la cosimulation éco-énergétique et suivi d'un post-doctorant (B. BRANGEON), développements d'un prototype d'optimisation, gestion administrative et financière.

- projet ICU (Ilots de Chaleur Urbains - 2013)

Financé par le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, auquel participe également le Ministère de la Santé et le Ministère de l'Égalité des Territoires et du Logement. Ce projet visait à évaluer le degré de sensibilisation à la contrainte des îlots de chaleur urbain (ICU) en période chaude et sa prise en compte par les organismes qui influent sur la localisation et la conception des établissements accueillant du public sensible aux évaluation globale du Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) et à fournir un exemple d'étude d'évaluation susceptible d'être répliqué sur d'autres

thèmes. Pour répondre à ces objectifs, une enquête a été menée auprès des acteurs locaux compétents (Direction Générale des Services d'agglomération, élus locaux, bureaux d'études, services santé ...etc.) dans dix agglomérations françaises.

Participants et coordination : A. Dhalluin & E. Bozonnet

- Projet ANR VegDUD (ANR- 09-VILL-0007) - Le rôle du végétal dans le développement urbain durable, une approche par les enjeux liés à la climatologie, l'hydrologie, la maîtrise de l'énergie et les ambiances. (4,5 ans du 01-2010 au 04-2014),

Responsable scientifique LaSIE : E. Bozonnet / Participants : R. Belarbi, C. Inard, R. Djedjig

Partenaires:IRSTV - FR CNRS 2488 ; IFSTAR - Nantes ; Plante & Cité – Angers ; LPGN UMR CNRS 6112 - Université de Nantes ; EPHYSE INRA – Bordeaux ; ONERA/DOTA – Toulouse ; GAME/CNRM URA CNRS 1357 – Toulouse ; CSTB – Nantes ; IRSN – Cherbourg ; CASA – Lyon ; LSIT UMR CNRS 7005 – Illkirch ; LTHE UMR CNRS 5564 université Grenoble ; CESBIO UMR CNRS 5126 – Toulouse ; LIENSs UMR CNRS 6250 - université de la Rochelle

Rôles exercés : Responsable de la tâche 5 (sur 6), Codirection de thèse (R. DJEDJIG), développement de modèles hygrothermiques pour le bâtiment, suivi scientifique, gestion administrative et financière.

- Projet ANR VENISE (ANR-12-VBDU-0007), vecteur air pour une conception ou rénovation optimisée des bâtiments nZEB (2012-2017)

Responsable scientifique : C. Inard, Coordination LaSIE

Partenaires : EDF (ENRBAT), CSTB, CETE Ouest, ALLIE'AIR, ATLANTIC, ENSAS, AMUP

Rôles exercés : mise en place et suivi de la démarche de modélisation et des méthodes d'optimisation.

- Projet ANR DYNASIMUL (ANR-06-PBAT-004-01 - du 04-2007 au 08-2010),

Responsabilité scientifique LEPTIAB : C. Inard et E. Bozonnet / Participant : A. Sempey

Rôles exercés : méthodologies de couplages d'outils de STD et modeleurs thermiques, suivi scientifique (A. SEMPEY - post-doc 1 an) et administratif.

- projet PUCA – URBAT (2005-2006), approche méthodologique de la construction durable en milieu urbain : le microclimat urbain et son impact environnemental sur les constructions.

Coordination scientifique : F. Allard et E. Bozonnet

Partenaires : CERMA et LASH

Rôles exercés : Coordination scientifique et administrative, développement d'une base de données documentaire commune et état de l'art sur l'interaction entre microclimat urbain et morphologie urbaine.

A.5.3. Contrats régionaux et autres

- Projet CPER/FEDER Bâtiment durable – Performance environnementale de l'échelle de l'occupant à celle du cadre bâti et urbain (2016-2019)

Responsables du programme : F. Allard / Responsable de l'axe : C. Inard

Thème : Aide à la planification de nouveaux quartiers

Responsable du thème : E. Bozonnet

Rôles exercés : définition et gestion du thème de recherche, recrutement d'un doctorant.

- Projet EPA-Marne / programme Ecocité (2016-2017)

Étude du microclimat urbain du quartier développé dans le cadre de l'aménagement du Cluster DESCARTES

Participants Tipee/LaSIE : M. Doya, E. Bozonnet, A. Gros, F. Battezzati

Rôles exercés : supports pour le développement et la mise en œuvre des outils de simulation EnviBatE et d'indicateurs agrégés de calcul de performance à l'échelle du quartier.

- Entreprise SOPREMA / Université de la Rochelle (2016 à 2017)
Techniques de rafraîchissement passif en site urbain – guide et simulations thermiques
Responsabilité scientifique : E. Bozonnet et P. Salagnac
Participants LaSIE : M. Abadie, M. Kaboré, R. Lapisa
Rôles exercés : définition et pilotage du programme d'étude en accord avec SOPREMA, recrutement et suivi de post-doc, développements de modèles, suivi scientifique et rapports.
- Entreprise PROGEMI / Université de la Rochelle (2011-2015)
Développement d'un outil de conception et d'aide à la décision éco-thermique des bâtiments d'habitation
Responsabilité scientifique : E. Bozonnet et C. Inard
Rôles exercés : développement d'un prototype de simulation intégré à l'outil de métré de l'entreprise, module d'optimisation multicritère, gestion administrative et financière.
- PPG Retail EUROPE (2014)
Étude sur l'influence de diverses configurations d'émissivité thermiques appliquées aux parois intérieures d'un bâtiment
Participants LaSIE : M. Doya, C. Tassevil, E. Bozonnet
Rôles exercés : Mise en place des modèles, suivi et analyse des travaux de simulation et rapports techniques.
- Entreprise SOPREMA / Université de la Rochelle (3 ans de 2010 à 2012)
Caractérisation des produits de toiture et modélisation de bâtiments industriels et commerciaux
Responsabilité scientifique : E. Bozonnet et P. Salagnac / Participants : R. Belarbi, A. Trabelsi, L. Clerjaud
Rôles exercés : définition d'un programme d'étude en accord avec SOPREMA, recrutement et suivi de 2 post-doctorants (2 ans), développements de modèles, suivi scientifique et rapports.
- Projet IRSTV Clifurbain-MEIGEVILLE (IRSTV/Pays de Loire - 2007 à 2010), Modélisation Environnementale Intégrée et GESTION durable de la Ville – Impact du réchauffement climatique sur le microclimat urbain et la demande énergétique des bâtiments
Responsabilité scientifique LEPTIAB : E. Bozonnet et C. Inard / Participant : T. Denes
Partenaires : CSTB, ECN
Rôles exercés : méthodes de couplage d'outils de STD (Trnsys) et de modèles sol micro-météo (développés à l'ECN), et traitements SIG pour les données du quartier, suivi du post-doc (T. DENES) et suivi administratif.
- CTMNC (2009) – Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction
Toitures rafraichissantes « cool roofs » - état de l'art
Participants : M. Doya, P. Salagnac, E. Bozonnet
Rôles exercés : Documentation et suivi de projet.
- EDF / Université de la Rochelle (2000-2002)
Développement de Sim_Zonal et mise à disposition du code source
Responsabilité scientifique : E. Wurtz – Contrat LEPTAB
Rôles exercés : développements en C++ du code de calcul et intégration d'un modèle de ventilo-convecteur, développement du module de calcul de confort thermique, co-encadrements de stages de recherche master (R. DANIELI 2001 et S. CONCEIÇÃO 2002) et 3 stagiaires de licence informatique.

A.5.4. Responsabilités de réseaux thématiques ou de fédérations

- Laboratoire commun LaSIE/EDF 4evLab – Co-responsable de l'axe de recherche *Modélisation des bâtiments dans leur environnement urbain* avec Mathieu Schumann (EDF) depuis 2016
- Institut de recherche en sciences et techniques de la Ville (FR CNRS 2488 – IRSTV)
170 chercheurs, 22 laboratoires, 15 établissements.
Rôles exercés : Depuis 2012 coordinateur de l'équipe (PRF) Microclimat et Énergie
En binôme avec Katia Chancibault (IFSTTAR) depuis 2014
<http://www.irstv.fr/fr/microclimat-urbain-et-energie>
Participation aux réunions de directoire élargi

A.5.5. Organisations de congrès nationaux / internationaux

- **Comités scientifiques**
Internationaux : FICUP 2016 (Quito-Galapagos, 2016), IC2UHI (Venise, 2014)
Nationaux : IBPSA 2016, 2014, ...
- **Comités d'organisation et reviews dans des conférences**
IBPSA France (tous les 2 ans), FICUP 2016 (Quito-Galapagos, 2016), ICOME (La Rochelle, 2016), SFT (La Rochelle, 2015), IC2UHI (Venise, 2014), Building Simulation 2013 (Chambéry), École de printemps SIMUREX (2010, 2012 et 2015)
- **Chairman dans des congrès internationaux et nationaux**
IC2UHI (Singapour, 2016), ICOME (La Rochelle, 2016), IBPSA France (Champs-sur-Marne, 2016), SFT (La Rochelle, 2015), IBPSA France (2014), IC2UHI (Venise, 2014), Building Simulation 2013 (Chambéry, France), CLIMA2013 (Prague, République Tchèque), PALENC 2010 (Rhodes Island, Grèce)
- **Responsable de la journée thématique** *Études aérodynamiques multi-échelles appliquées au bâtiment*, la Rochelle, mai 2011, 70 participants.
Mise en place du comité d'organisation, invitations des orateurs, budget, communication.

A.5.6. Responsabilités dans des sociétés savantes

- European Cool Roofs Council (ECRC - Bruxelles) / Environ 60 membres en Europe, 11 administrateurs (Board).
Rôles exercés : Administrateur (Board : <http://coolroofcouncil.eu/contactus.php>).
Élu depuis 2011 – suivi 1 réunion/mois (tél.) – 2 assemblées générales/an
- International Building Simulation Performance Simulation Association
(IBPSA - www.ibpsa.org) Affiliations dans 28 pays. Environ 250 membres en France.
1 conférence nationale/2ans, internationale/2ans, journée thématique/2 ans.
Participation au bureau de l'affiliation française (<http://ibpsa.fr/>) - Responsable / communications de l'association (newsletters, site, ...) - Membre des comités scientifiques et d'organisations conférences

A.6. Activités pédagogiques

Au-delà de mon expérience professionnelle d'enseignement en lycée professionnel, puis de monitorat et d'ATER, je suis intervenu dans des cours liés à mes travaux de recherche (listés en A.2.7) et dans le département génie civil de l'université de la Rochelle. Mes activités liées à l'enseignement m'ont également amené à m'investir dans différentes responsabilités décrites ci-dessous.

A.6.1. Responsabilités liées à l'enseignement

- Responsable de la formation LICENCE PROFESSIONNELLE gestion de chantiers et sécurité en génie climatique 2011-2014. 15 à 20 étudiants/an
- Référent et coordonnateur pour les sites Internet du [département génie civil](#) (2006-2013) et du laboratoire [LaSIE](#) (depuis 2006).
- Membre du jury de recrutement des professeurs en lycée professionnel de Génie Civil équipements techniques et énergies (2007-2012) : rédaction de sujets du concours, corrections, jury d'admissibilité et d'admission.

A.6.2. Charge d'enseignement

COURS : environ 265 h/an équivalents TD à l'université de la Rochelle

Portant principalement sur l'introduction au génie civil (L1), l'hydraulique des réseaux (LP et M1), la topographie (L2), la thermique du bâtiment (LP), la modélisation thermique dynamique du bâtiment (M2), la qualité environnementale et la gestion des déchets de chantiers (LP).

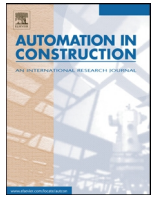
Annexe B - REPRODUCTION D'ARTICLES

Chardon, S., Brangeon, B., Bozonnet, E., & Inard, C. (2016). Construction cost and energy performance of single family houses: From integrated design to automated optimization. *Automation in Construction*, 70, 1–13. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.06.011>

Djedjig, R., Bozonnet, E., & Belarbi, R. (2015). Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 86, 93–103. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.057>

Lapisa, R., Bozonnet, E., Abadie, M. O., & Salagnac, P. (2013). Cool roof and ventilation efficiency as passive cooling strategies for commercial low-rise buildings – ground thermal inertia impact. *Advances in Building Energy Research*, 7(2), 192–208. <http://doi.org/10.1080/17512549.2013.865559>

Bozonnet, E., Musy, M., Calmet, I., & Rodriguez, F. (2015). Modeling methods to assess urban fluxes and heat island mitigation measures from street to city scale. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10(1), 62-77. <http://doi.org/10.1093/ijlct/ctt049>



Construction cost and energy performance of single family houses: From integrated design to automated optimization



Serge Chardon, Boris Brangeon, Emmanuel Bozonnet*, Christian Inard

Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE UMR CNRS 7356), University of La Rochelle, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 July 2015

Received in revised form 27 May 2016

Accepted 21 June 2016

Available online xxxx

Keywords:

Building integrated design
Building energy optimization
Construction cost optimization
Genetic algorithms
Single house design
Multiobjective optimization
Building information model
Interoperability
Semantic BIM

ABSTRACT

The single family home market is facing increasing challenges in managing environmental issues. The required objective of building energy performance can be achieved by limiting extra cost, integrating building design, and using the most appropriate and readily available materials. However, standard computations, such as the French building energy code used here, require vocational expertise that involves managing separate processes and numerous design variables. The design is therefore restricted to well-known techniques, especially for small constructions. In this paper, the usual stakeholder constraints and possible developments in design practice are considered through the use of real product databases and vocational tools to calculate construction costs. In the first stage, which takes into account cost and energy demand, an integrated approach to building envelope design is detailed, including a semantic system to automate the process. Then an optimization method (a genetic algorithm) is proposed to assess energy performance and the cost of the building envelope. This process is illustrated as a case study for a single family house. The results highlight various optimal solution domains specific to the case study, which can be further managed through a decision support system.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Computer simulation in construction management has undergone significant development over the last few decades and is now widely used for decision support in the design stage of construction projects. Computer simulations are used for many purposes such as energy performance assessment, acoustic studies, structural calculations, facility management, life cycle analyses, architectural drawing, cost assessment, and project management and construction scheduling. Computer aided design has led to the development of specific digital representations of buildings for each assessment purpose. The convergence of these data representations progresses via an integrated representation known as a Building Information Model (BIM). At present, environmental regulations and the constraints inherent in maintaining a competitive edge are pushing designers to embrace an integrated design approach [1]. In this context, the design process needs to be a collaborative effort between all stakeholders. To enforce this integrated design approach, an EU funded education project, IDES-EDU, was set up to define the main concepts and develop cross-disciplinary expertise in integrated energy-efficient building design [2].

From a technical standpoint, the IFC standard (Industry Foundation Classes), which is an open data format, was set up to enable each expert to work on the same BIM. This avoids time consuming data exchanges between different BIMs. While BIMs have been widely studied [3], the use of this format is still not common practice in the building industry and has not yet fulfilled all expectations [4]. The holistic purpose of a standardized BIM makes it a complex data format to handle. BIM managers are needed, particularly to properly operate the BIM throughout the construction projects, and sometimes during its entire life cycle. Semantic web and ontology rules have recently emerged and have given interesting results in the handling of these complex formats by enabling semi-automatic browsing in different BIMs and databases. A brief description is given in this paper of how they were used to simultaneously browse two databases: a cost database and a manufacturer database. These semantic and ontology rules were subsequently used to set optimization design variables.

Although having several experts working jointly may be appropriate for large construction projects, this is not suitable for small projects such as a single family detached house. In France, this sector comprises around 3500 companies and each produces between ten and a few hundred houses per year, which represents 65% of the market of all newly built detached houses [5]. The design aspects of this construction sector are numerous: designing house models, dealing with material suppliers, managing construction companies, searching for clients and evaluating construction costs. Traditionally, these companies have outsourced

* Corresponding author at: LaSIE, University of La Rochelle, Avenue Michel Crépeau, 17000 La Rochelle, France.

E-mail address: emmanuel.bozonnet@univ-lr.fr (E. Bozonnet).

specific skills such as energy performance assessment. Similarly to bigger companies, they are facing challenges resulting from the changes in building regulations and are also in need of some sort of integrated design to monitor all design criteria simultaneously during the design stage. Specific integrated design tools exist, such as the ADR tool used and detailed in Section 2.2 [6]. The ADR software computes building cost automatically, allowing quick geometry changes and providing a detailed cost assessment for the organization of the construction work. This vocational tool has been developed to include energy performance assessment and has been coupled with the French building regulation core calculation program.

Although this integrated design approach makes it easier, economically and technically, to obtain appropriate compromise solutions, it is very unlikely to give optimal solutions. The number of design variables that can be changed to improve the design, also called the design space, is simply too large to be fully explored. Instead, designers rely on their experience to improve building design with regards to their performance criteria, namely cost and energy performance here. Over the past two decades, automated optimization has been developed in building research to provide further help in decision making by determining optimal solutions [7]. It has been proven that this development gives substantial help in decision making, especially when several objective functions are considered [8]. Although various building simulation tools have optimization modules included, this method is still rarely used in building design practice. The reasons mentioned by experts include: a lack of fully integrated optimization and building simulation tools, a time consuming process of setting up both the optimization algorithm and the building model, and a lack of awareness among stakeholders of the optimization potential in building design [9]. In this paper, an approach is proposed to overcome these limitations in design and construction of single family (SF) houses. The proposed method is based on a Non Sorting Genetic Algorithm (NSGA2) that has been coupled to the integrated design tool for multi-objective optimization. A case study is presented of a cost and energy performance optimization of a SF house to illustrate the full methodology and highlight its promise with respect to building design. The methods used to build the integrated design tool and couple it with an optimization algorithm rely on data exchange using a simple building energy model (BEM) and ontology rules, respectively.

2. Energy performance and construction cost software for houses

2.1. Energy performance and building regulations

Reducing energy consumption in buildings is an important part of the European Union's 2020 climate and energy package (2009, <http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020>) with the main targets being a 20% reduction in energy consumption as compared to 1990 levels, a 20% rise in the share of renewable resources in the overall energy mix, and a 20% energy efficiency improvement by 2020. In the building sector, these environmental objectives were translated first in the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), voted in 2002, which requires substantial energy saving measures to be implemented for all new buildings and a certification scheme to be in use by 2012 [10]. A recast of this directive (EPBD-Recast) was voted in 2010 that requires net zero energy buildings to be the norm for all new buildings in the member states by 2020 [11].

In France, the EPBD has been transposed for new buildings in the RT2012 building regulation [12], which sets energy performance and thermal comfort requirements. These requirements are among the most ambitious of all member states, with a primary energy consumption requirement for heating, cooling, domestic hot water, lighting and auxiliaries of 50 kWh/(m².yr) for residential buildings and 70 kWh/(m².yr) for office buildings [13]. Rather than use simple thermal indexes calculated from the steady state and average U-values, RT2012 relies on an hourly calculation [14]. The calculation uses a transient simulation method called TH-BCE [15] and assesses the overall energy performance and thermal comfort of the building according to the climate zone. Three regulatory indexes are assessed:

- ✓ Primary energy consumption (*CEP*)
- ✓ Summer indoor conventional temperature (*TIC*), which is used to characterize hot period thermal comfort
- ✓ A standard index for building envelope thermal performance (*BBIO*)

The *BBIO* index is the first performance assessment index in French building regulations. *BBIO* is calculated using only the building envelope performance. It is called bioclimatic performance in the regulations [12] and is independent from the actual HVAC and other system

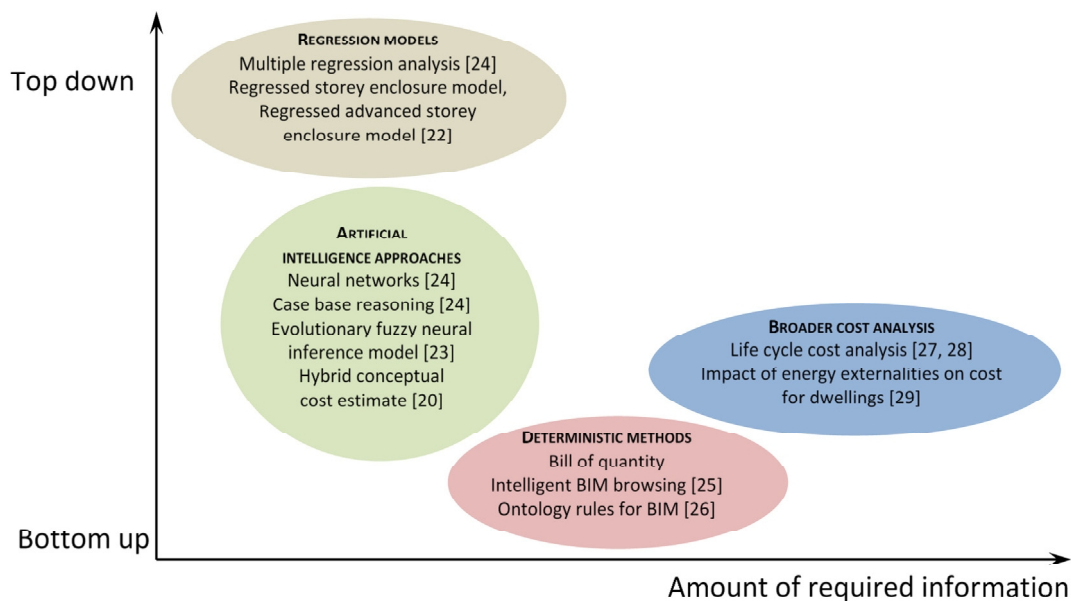


Fig. 1. Building cost assessment methodologies.

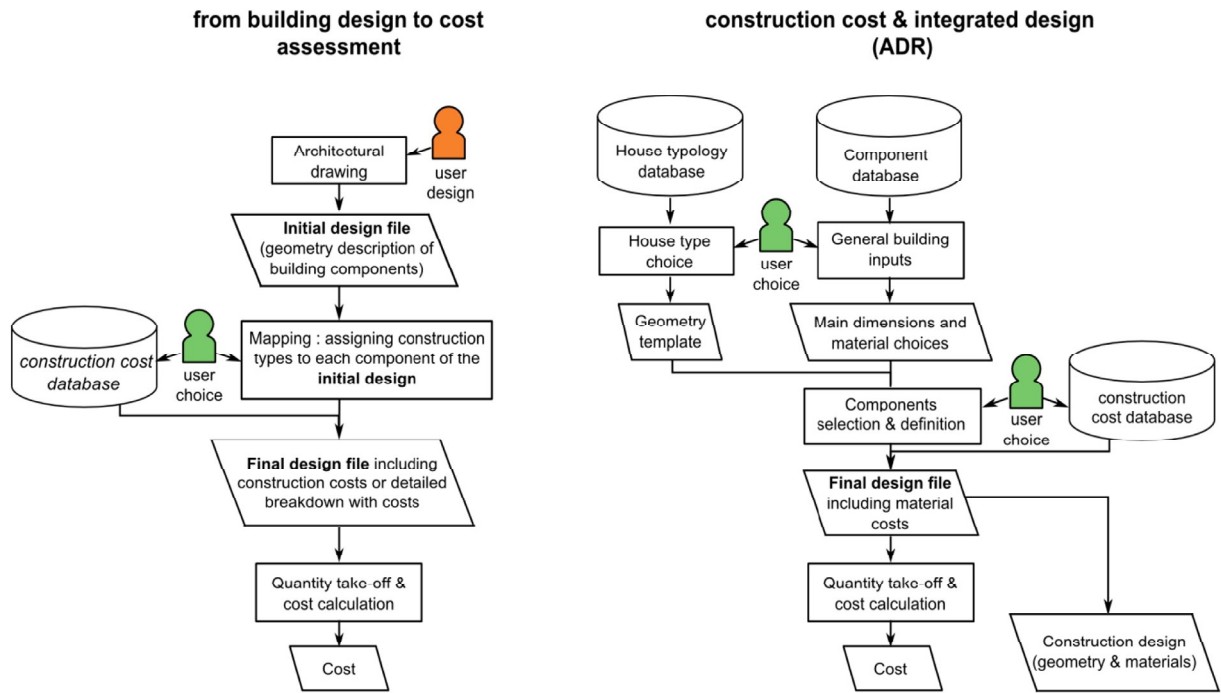


Fig. 2. Comparison between typical bottom up construction cost assessment and the ADR tool.

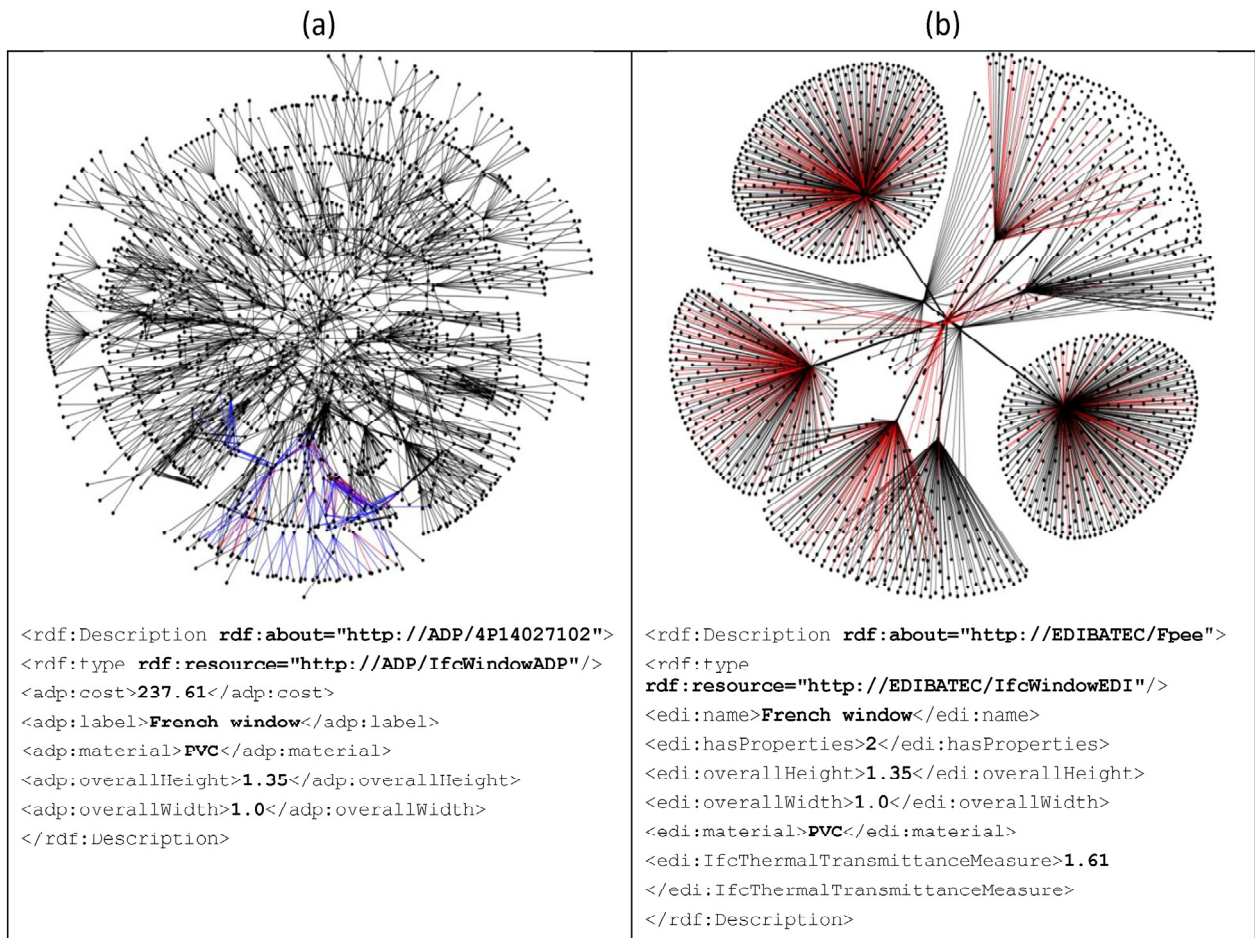


Fig. 3. Example of database representation for construction cost (a) and a manufacturer's physical characteristics for a window (b), with the highlighted example of an RDF describing a window in a cost database with an RDF/XML representation.

performances. *BBIO* is defined in the regulation as a dimensionless number which is actually obtained from weighted energy values: the building heating energy needs Q_{heating} kWh/(m².yr), the cooling energy needs Q_{cooling} kWh/(m².yr) and the lighting energy needs E_{lighting} kWh/(m².yr) [12]. All the energy needs are computed from an hourly time step calculation provided by the regulation core program. In order to obtain energy needs, standard theoretical systems are defined for HVAC and lighting. *BBIO* is a weighted aggregated index expressed without units obtained using Eq. (1):

$$BBIO = 2.Q_{\text{heating}} + 2.Q_{\text{cooling}} + 5.E_{\text{lighting}} \quad (1)$$

This dimensionless energy index is limited by a regulatory maximum value which is adjusted with the climate and the building size [12]. For example, the maximum *BBIO* value for a typical house in our case study location is 65.

In order to assess these energy performance indicators (*BBIO*, *CEP*, *TIC*), and before considering the cost assessment methods, it is necessary to introduce building assessment studies. Over the past 50 years, several building energy software have been developed and a large number of comparative studies have been published. In this context, a very interesting review on the capabilities of building energy performance simulation programs was carried out by Crawley et al. [16]. More recently, Coakley et al. [17] reviewed methods used to calibrate building energy simulation models with measured data. Similarly, Zhao and Magoulès [18] compared a large variety of complex and simplified methods used to predict whole building energy consumption (including lighting, HVAC systems, and occupant behavior). Fumo carried out a

review of the basics of building energy estimation, including calibration and validation, based on a classification of building energy simulation models [19].

Following these thermal simulation developments and to reconcile differences between the various models, the French authorities now provide software developers with a building calculation core program that already contains the TH-BCE methodology. Hence, software developers only need to make a user interface for this core program. For detached house builders, the assessment of the *BBIO* regulatory building envelope energy index early in the design stage is becoming increasingly critical as it is the key stage in the energy performance of a building envelop. Indeed, one of the requirements of the building regulations is that the building envelope energy index is assessed and validated before an application for a building permit can be submitted, whereas primary energy consumption and thermal comfort only have to be validated once the construction is finished. In this study, the regulatory core program was interfaced for the building envelope energy index (*BBIO*) calculation and cost calculation using a vocational tool for single houses called ADR.

Unlike regular transient building simulation tools (e.g., EnergyPlus or TrnSys), many input parameters are reglementary such as building occupancy, weather data and temperature set points. In the case of SF houses, assuming a monozone thermal model, simulation takes from a few seconds to a minute to complete, depending on the complexity of the building. On the one hand, the automatic definition of standardized data simplifies the simulation work. On the other hand, a lot of construction and system input data, which have to be set by an energy expert, are required to run the model. As the level of performance required is

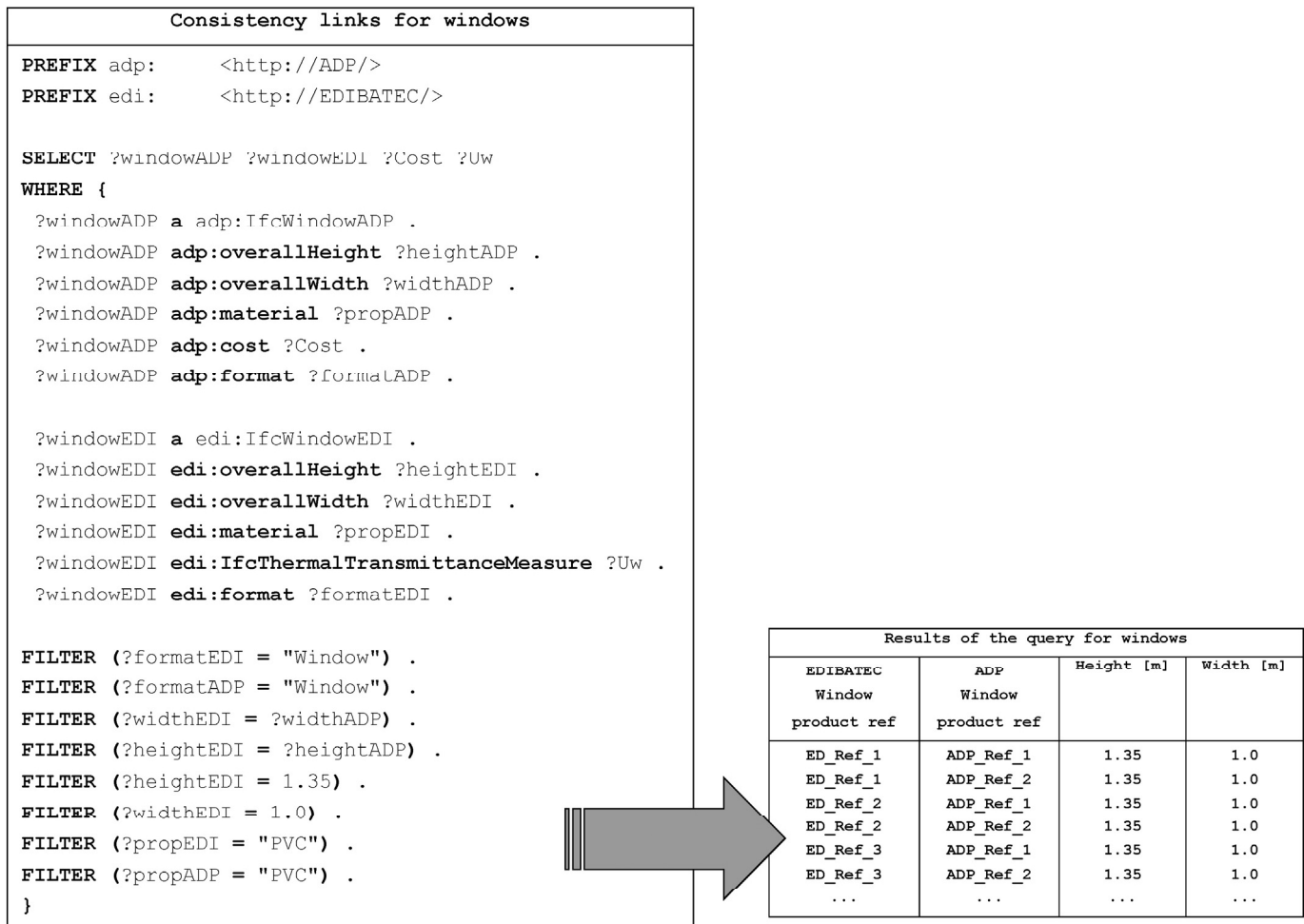


Fig. 4. RDF Query Language (Jena-SPARQL) and results.

increasing, it is becoming much more difficult to predict whether a design complies with the regulations without a complete calculation. This has been an issue for the detached house sector, where typically companies do not have an in-house energy expert and so feel that they have lost control of the design of their buildings. To limit the amount of input data, our approach is based on simplifications that rely on predefined house typologies and product databases where all the thermophysical properties are preset, as explained in Section 3.

2.2. Building cost assessment and integrated design development (ADR tool)

2.2.1. Cost assessment methods

Cost can be assessed in various ways and for different purposes during the design stage of construction projects. In the early design stages, cost has to be evaluated to determine the project's feasibility and to make a reasonable bid. These early cost estimates are usually made without much information on the project and rely mostly on the designers' experience. A common quick estimation method is to use a per square meter cost ratio (building gross area). For stakeholders who often have a limited range of house typologies, such approximations, also called single-unit rate methods [20], may provide reasonable estimates based on past projects. For larger and more individuated projects, such simple methods may give results that are far removed from the actual construction cost. More advanced techniques that use additional dimension information have been developed. James [21] proposed an estimation method based on all building component surfaces that uses a specific weighting for each type of surface depending on its relative cost (i.e. a basement would receive a higher weighting than a wall because of excavation costs). More recently, regression models have been developed to estimate building cost. Cheung and Skitmore [22] proposed two types of regression models, inspired by James' work. The goal is to find simple variables that could be used as best building cost predictors based on historical data. These two regression models were developed for offices, private housing, nursing homes and schools. Some examples of predictors used are average floor area

Table 1 Comparison of inputs for a window in the NBDM and BEM_R formats.

Window inputs in NBDM	Surface, Orientation, Slope, Type (window or bay window), Joinery opening type, Number of window casements, Number of glazing, Window daylight ratio, U-value, Window positioning, Window management, Type of shadings, Shading management
Window inputs in BEM _R	Surface, Orientation, Slope, U-value vertical with shutters, U-value vertical without shutters, U-value horizontal with shutters, U-value horizontal without shutters, Noise exposure, Type of local, Direct solar gain value without shutters, Longwave solar gain value without shutters, Additional solar gain values without shutters, Direct solar gain value with shutters, Long wave solar gain value with shutters, Additional solar gain values with shutters, Direct light transmittance without shutters, Diffuse light transmittance without shutters, Direct light transmittance with shutters, Diffuse light transmittance with shutters, Window management in winter, Window management in summer, Window management in spring and autumn, Window opening parameters in winter, Window opening parameters in autumn and spring, Window opening parameters in summer.

for the superstructure, average floor basement area, number of stories, average story height and average perimeter for towers and podiums.

These models are adapted for early cost estimates as they require little knowledge of the building design. They are referenced as top-down models. Various other types of models have been developed more recently to provide better building estimates in early design stages, and use artificial intelligence methods such as Neural Networks (NN), Case-Based Reasoning (CBR), Fuzzy Logic (FL) or Genetic Algorithm (GA). These models are based on comparisons of the building with a database of already completed projects. Cheng et al. [23] developed an estimating model based on NN, FL and using a GA to optimize the NN parameterization. The neural network was trained on a database containing 23 building projects and two estimators were generated: an "overall" estimator based on 10 identified variables and a more complex "category cost" estimator using 45 variables. Kim et al. [24] compared estimating models based on regression analyses, neural networks and case based reasoning. Case based reasoning uses a "similarity function" to determine how similar to previous projects the current project is in order to estimate the construction cost of the current project. All these comparisons can be made on many variables such as dimension, location, type of structure, type of finishing, and systems involved. The more detailed the elements of comparison are, the more accurate the estimate is expected to be.

More precise cost analyses can be carried out later in the design process. These are based on "bill of quantities" where the quantity of each

Cost and energy performance integrated design

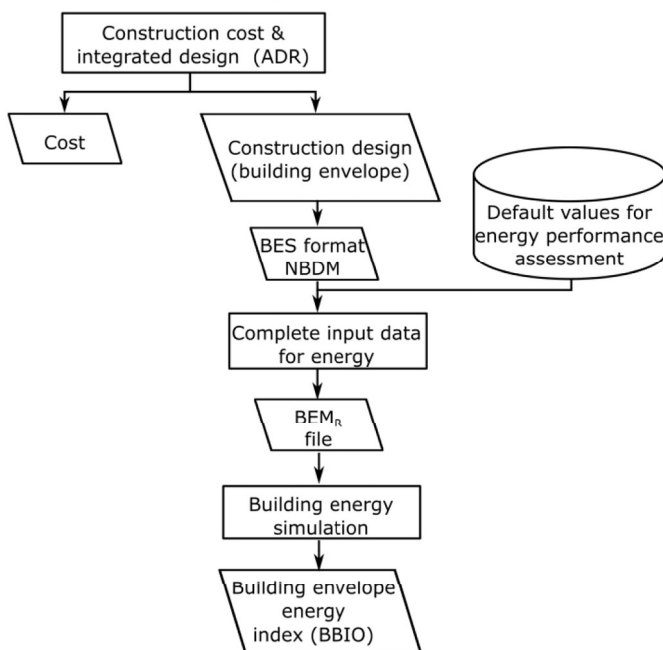


Fig. 5. Cost and energy performance integrated design solution.

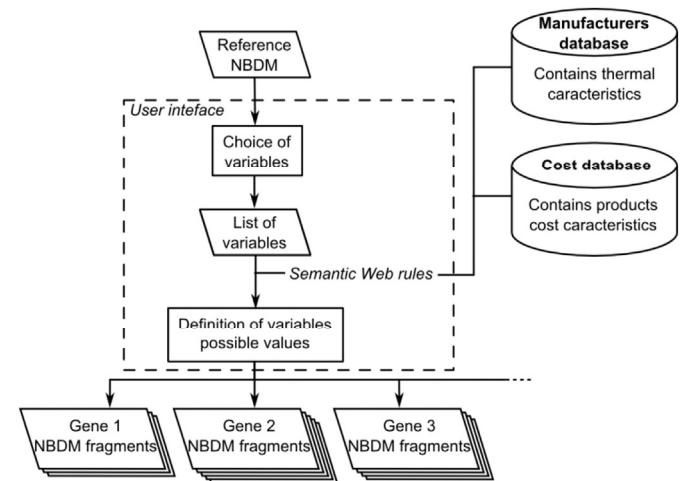


Fig. 6. Definition of design variables.

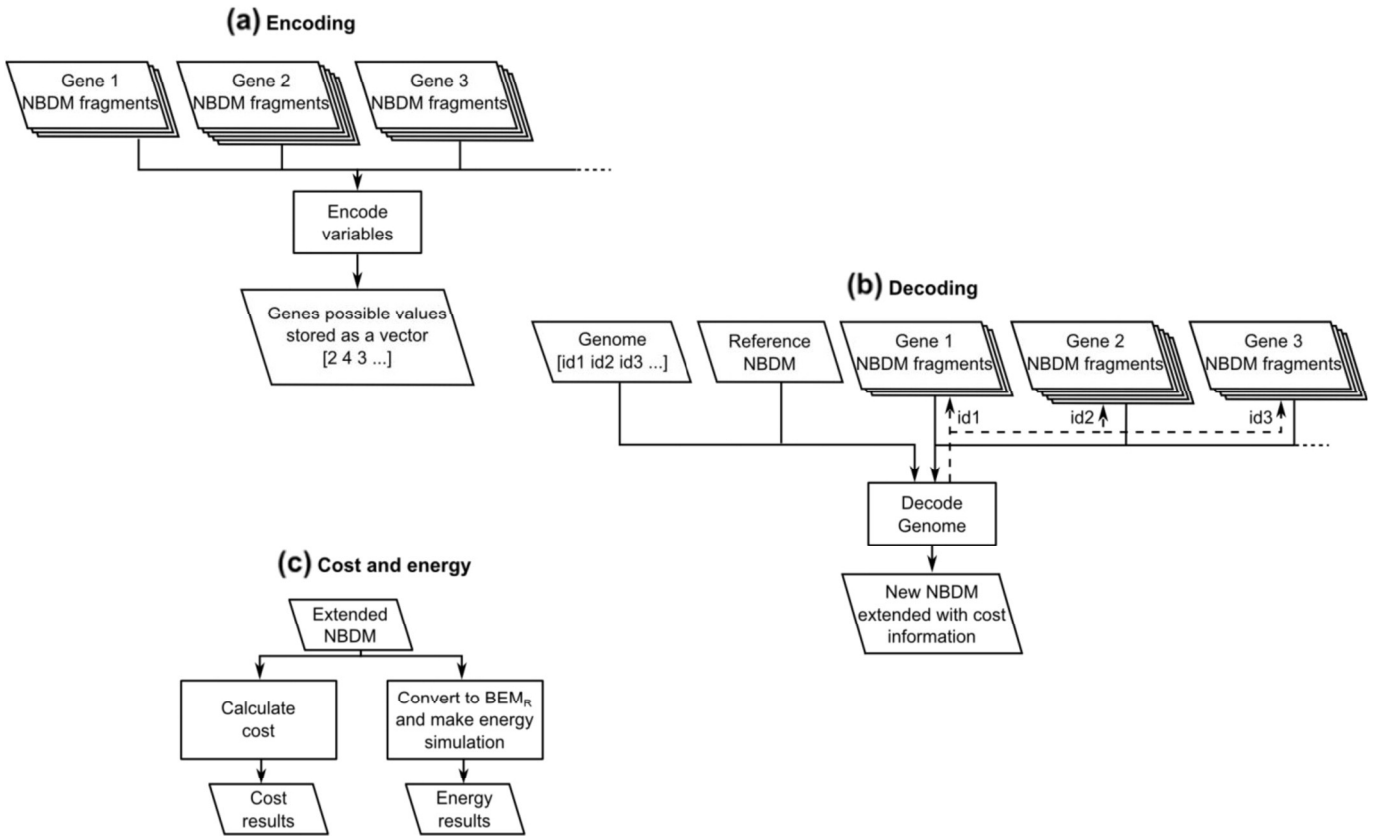


Fig. 7. (a) Encoding procedure, (b) decoding procedure, (c) cost and building envelope energy performance evaluation process.

material is assessed. The construction cost is calculated by multiplying each quantity by the unit cost of the materials, including labor costs that are usually taken from vocational unit cost databases. Kim et al. [20] developed a hybrid model for estimating large building projects where either a bill of quantity approach or a historical approach can

be chosen. These assessments are generally time-consuming as the number of quantities to be assessed is huge and requires an analysis of architectural sketches and/or detailed building floor plans. Recently, some intelligent BIM processing methods have been developed to automatically obtain the quantity takeoff [25,26]. These more detailed

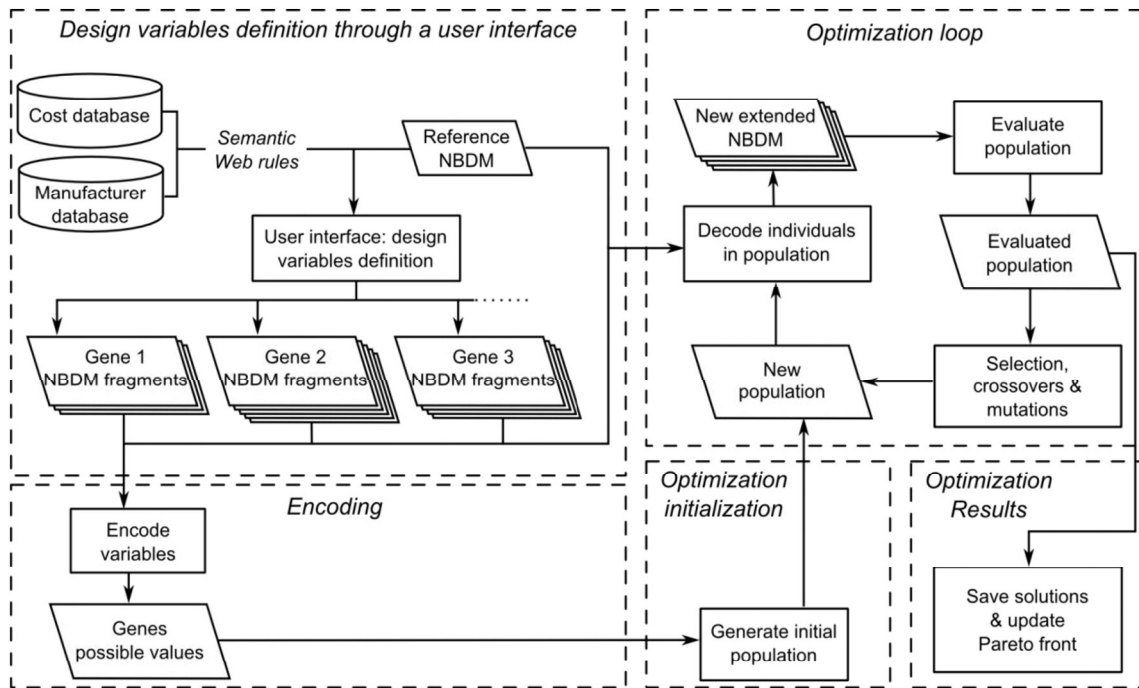


Fig. 8. General diagram of the optimization process.

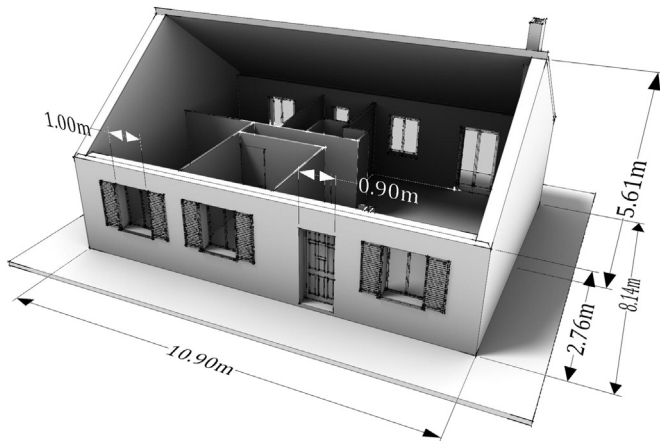


Fig. 9. House sketch (reference case).

methods are referenced as bottom-up methods. Finally, some broader cost analyses can be made such as life cycle cost (LCC) analyses [27, 28] or environmental externalities cost assessments [29]. These analyses require additional data concerning product life cycles and environmental impacts and are intended to provide more information for decision making with respect to overall cost and environmental impacts. Fig. 1 provides a visual representation of various cost assessment methods classified by amount of information required and estimation type (bottom-up versus top-down).

2.2.2. An integrated design tool for cost estimation

The first stage of this study was to render interoperable our vocational construction cost tool (ADR). The methodology of the tool, an integrated building design and cost calculation, is described here and compared to a conventional bottom-up approach (see Fig. 2). The ADR tool [6] is intended for house designers and was developed in 1985. This vocational tool combines the advantages of both top-down and bottom-up approaches as building cost can be estimated using the bill of quantity method with little manual data entry (Fig. 2, right). This is achieved using predefined building design templates, building components and predetermined rules. First, a house template is chosen and an initial building design is generated. Then, some general project information is entered such as main building dimensions and construction typology for the walls, floors, and insulation. Next, some refinements are suggested for predefined building components to finalize the user design. For a typical house, the first building component would be the lowest floor, like a crawlspace or slab-on-grade, then the ground floor and the floors above. Building components also consist of other building elements such as windows, staircases and roofs. These building components are associated with some predefined methods so that the overall building design (detailed plan and components) and quantity takeoff evolves as the building components are selected. Inserting a window, for instance, will automatically deduct the wall layers to be removed in the building design and in the quantity takeoff. Once all the

components are selected and defined, the final cost and detailed quantity takeoff are provided for the user.

The creation of building components and house databases is specific to each local construction company and is carried out as the software is installed. The cost database also needs to be defined initially by the building company so that actual products and labor costs are used. The rules used for quantity takeoff may also need to be adjusted from one company to the other depending on the type of construction used. Using this integrated tool, companies are able to combine early and final design stages, as in the first stage this enables companies to adapt houses to their clients' wishes; the cost is computed simultaneously and can also be discussed. Moreover, passing orders to suppliers is simplified as the bill of quantity gives a detailed breakdown of the materials. The tool also contains management modules to allow interactions with employees and subcontractors.

3. Interoperability and methods developed for integrated design and optimization

The previously described integrated tool approach requires manual inputs which are linked to the building envelope design. The effectiveness of the tool is mainly based on specific links and the level of descriptions in relation to the field of expertise. In the same way, the database structures are adapted and predefined values are often available to simplify the design process whenever data are missing during the initial stages of the building design. The challenge here is to automate and to make this process interoperable.

For building energy calculation, other levels of description and component information are needed (e.g., U-value, solar transmission, building operation and occupancy) which are usually managed with other data structures and not automatically interoperable. Automated processing of input concerning the properties of materials has been proposed by Kim et al. [30], who have developed a semantic system that uses a BIM (an IFCXML file). The convergence of technologies related to process dematerialization in the construction sector (design, construction, maintenance, management) and the use of BIMs facilitates multi-physical modeling and integrated design. These interactions remain a challenge as using multi-criteria simulations such as the energy-economic-environmental optimization of a structure requires interoperability between domain-specific databases and various building descriptions. Ontology rules are a promising way to handle these issues as they allow semi-automatic browsing in different databases and BIMs. Initial developments and their implementation are presented here for input data management.

3.1. Ontology rules for interoperability and semi-automatic database browsing

3.1.1. Resource description framework (RDF) and web ontology language (OWL)

The semantic web initiative was motivated by problems related to heterogeneous data formats in collaborative settings between systems.

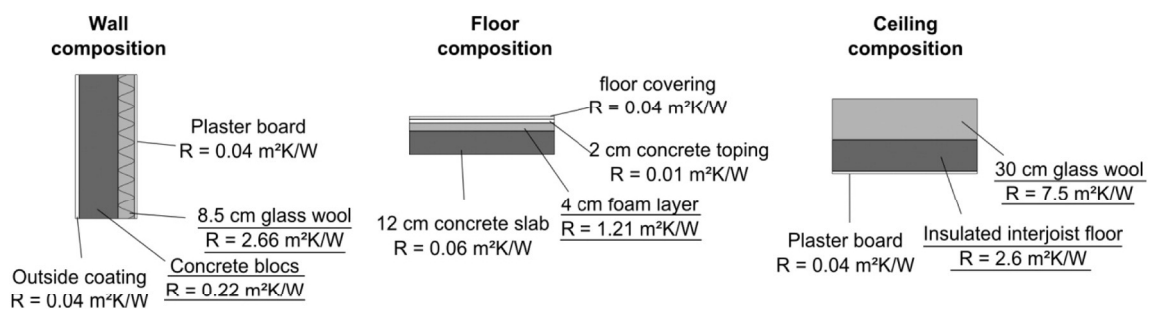


Fig. 10. Materials used in the reference case.

Table 2
Type of window of the reference case.

	Window type 1	Window type 2	Window type 3
Height	1.35 m	0.95 m	2.15 m
Width	1 m	0.6 m	1.2 m
Number	3 facing North 2 facing South	1 facing North	1 facing North

Although it has been suggested that XML has put an end to the problems of interoperability, the aim of the semantic web is to improve the ease of interpretation of possibly incomplete and disseminated information. This approach also standardizes the way in which this information is exchanged between software components. To achieve this, several new approaches and technologies have been developed [31,32]. The semantic web is defined by two specifications: the Resource Description Framework (RDF) and the Web Ontology Language (OWL). The RDF is a form of intelligent semantic web. RDF is used to connect the resources together or define relationships between them. These statements are often referred to as RDF triples, consisting of a subject, a predicate and an object, consequently implying directionality in the RDF graph (e.g. $\langle \#1234 \rangle \langle \text{is a} \rangle \langle \text{Window} \rangle$). Each concept and relation has a Unique Resource Identifier (URI) assigned to it. If there are two identical URIs, their semantics are also considered identical. However, it is impossible to reason and conduct automated reasoning on models with the RDF format. This problem can be solved by using the OWL format, which is the language for defining Web ontology structures. Based on the RDF and written in the generic XML markup language, the OWL format can be used to specify what a computer can understand. The primary purpose of an ontology is to model a combination of data in a given domain. An OWL may include descriptions of classes, properties and their instances. All these rules can be found in the OWL synopsis of the W3C recommendations [33].

3.1.2. Building component rules for automated property definitions

In this paper, ontology rules were used to browse a product database containing properties related to energy calculation and a cost database containing information related to semi-automatic and simultaneous cost assessment. A range of rule sets was developed with the Jena Rules Engine [34]. These rule sets revealed the implicit information associated with the use of databases. Each rule set contains rules that can be applied to RDF graphs in order to infer a cost or information

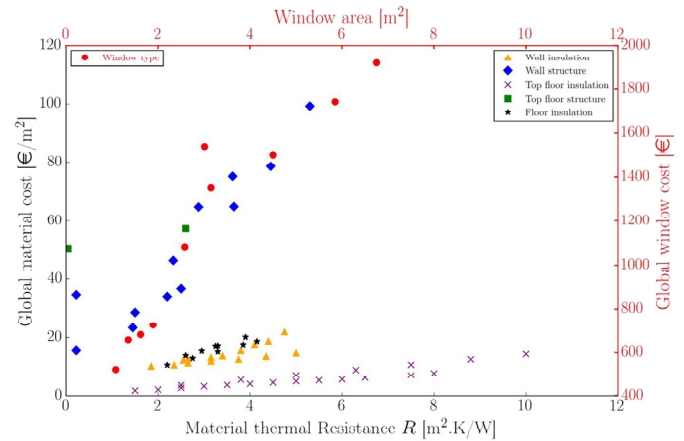


Fig. 11. Design variable cost variations.

concerning the materials. Here, these rules were related to the construction cost and the manufacturer's specifications, including the physical characteristics.

Fig. 3 is a radial map of the hierarchical tree structure (Graph-theoretical data structures) of two databases: statistical construction costs (Fig. 3a) and the manufacturer's specifications (Fig. 3b). This representation highlights the structural difference for two specific approaches to the same physical entities. The tree with links (edges) and code examples for window products will be explained later.

The graphs consist of dots for each physical entity (nodes), and the links between the nodes are the edges. This construction cost database has a complex tree but few nodes (Fig. 3a) as the entities are split into several sub-nodes which have the same ancestors but not necessarily the same parents. For example, for a complete definition of a window product there is one node for the installation mode, one for each small support element and labor cost, and one for the number of multiple glazings and sashes. The manufacturer's database (Fig. 3b) has a simpler tree structure with much more nodes as each node corresponds to a single product and includes all its characteristics. For example, for the window products represented here (the external nodes) there are single parent nodes which are the providers. This graphic representation of databases is completed with the rule sets to associate nodes and in practical terms to automate the use of the database. It is faster to process

Table 3
Design variables properties (thickness e , overall thermal resistance R , thermal bridge heat loss coefficient ψ , window overall thermal conductance U_w).

	Type	Properties	Number of possible values
Wall insulation	Glass wool Expanded polystyrene	e from 6 to 16 cm e from 8 to 14 cm	15
Wall structure	Concrete blocks Concrete blocks with thin joint 10 different types of insulated masonry	R from 0.22 to 5.35 m ² K/W	12
Top floor insulation	Glass wool Cellulose wadding	e from 8 to 32 cm e from 10 to 40 cm	20
Top floor structure	Light wooden floor Insulated hollow core slab floor	$R = 0.04$ m ² K/W $\psi = 0.04$ W/mK $R = 2.6$ m ² K/W $\psi = 0.33$ W/mK	2
Floor insulation	Expanded polystyrene Mineral wool	e from 3 to 9 cm e from 3 to 9 cm	10
North bay window	PVC French window 1.35 m × 0.8 m, 1.35 m × 1.0 m, 1.35 m × 1.2 m, 1.35 m × 1.4 m Sliding window PVC 2.25 m × 1.4 m, 2.25 m × 1.8 m, 2.25 m × 2.4 m, 2.25 m × 3 m PVC French window 2.25 m × 1.4 m, 2.25 m × 1.8 m	U_w from 1.3 to 1.61 W/m ² K	10
North windows	Same as North bay window type	Same as North bay window type	10
South windows	Same as North bay window type	Same as North bay window type	10

Table 4
Parameters of the NSGA2 algorithm.

Parameters	Values
Function to be optimized	Building envelope energy performance (<i>BBIO</i>), Global Cost Construction
Size of the population of individuals	12
Number of generations to be computed	300
Mutation probability	50%
Crossover probability	50%

associated data and answer queries with these predefined relationships between objects than by using costly SQL links. Fig. 3b highlights an example of data and an ontological representation for window products. In Fig. 3a, the structure of the window cost data is colored red for PVC windows and blue for the others. In Fig. 3b the related PVC windows are colored red.

The objective of this research is to create a consistency link between these databases. The semantic reasoner creates logical RDF information using the rules of consistency to provide a common data model to extract the information (geometry, physical quantities). For example, geometry attributes are stored in databases with the *overallHeight* and *overallWidth* tags, whereas the U-values for windows are stored with

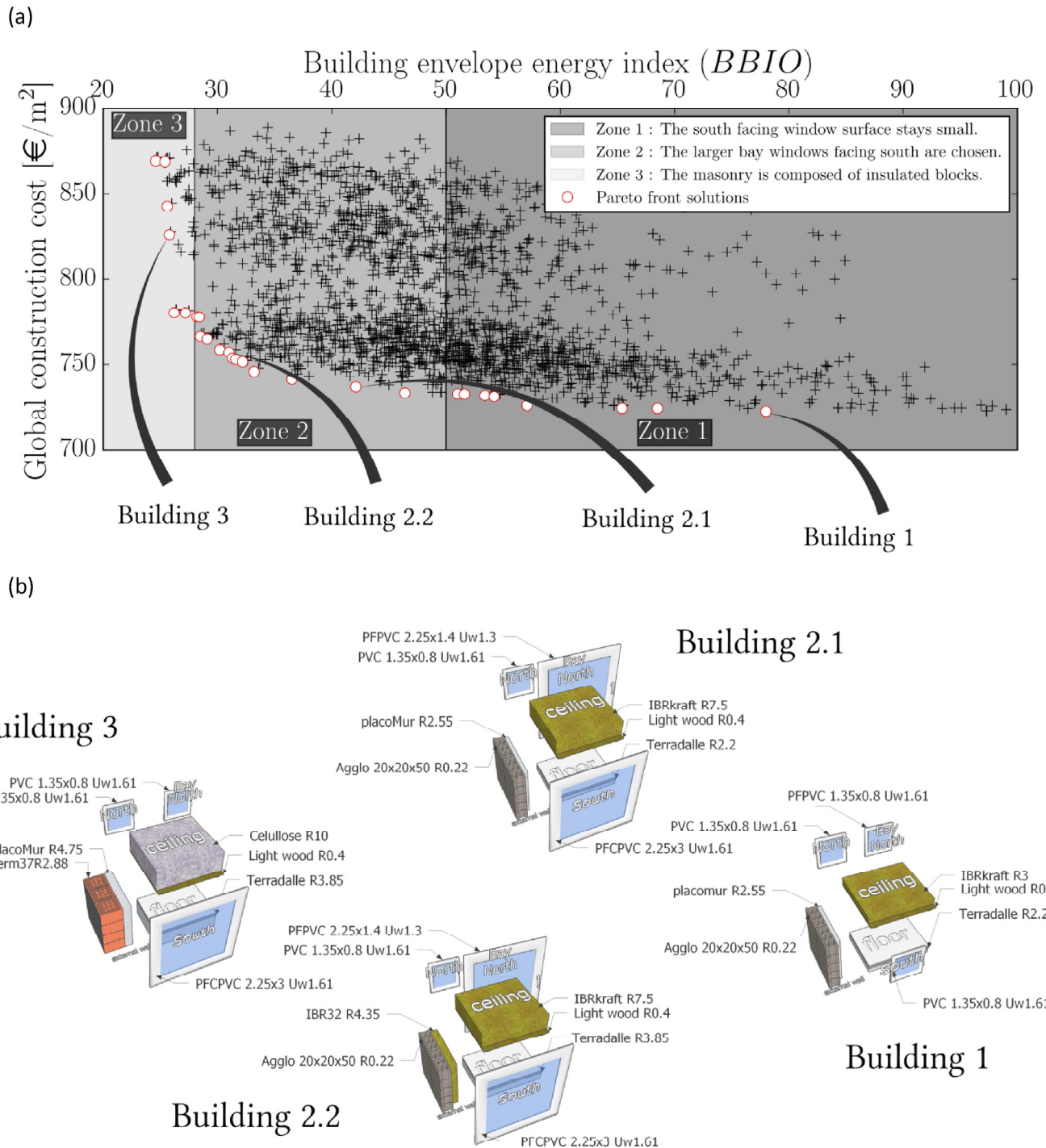


Fig. 12. (a) Building envelope energy index vs. construction cost results and (b) construction detail illustrations for 4 optimal solutions.

the *IfcThermalTransmittanceMeasure* tag. The better these links are defined, the greater the consistency between the heterogeneous databases. As the databases do not have similar levels of detail, the risk of applying too many links is that one of the databases does not provide corresponding products. We developed a SPARQL endpoint based on the ARQ query engine [35], which supports the SPARQL query language. An example of the RDF Query Language (SPARQL) is described in Fig. 4. This rule browses the databases in the RDF format and can link external windows with similar heights, widths and joinery type (here PVC, represented in red). The semantic reasoner applies this rule and the result is stored in an output file that lists the related products (Fig. 4).

3.2. Adding energy performance assessment to the integrated design tool

The vocational ADR tool was coupled to the regulatory energy performance assessment software as described in Fig. 5.

The building design data used with the ADR tool was not created to be directly accessible from another program, but a partial export to a file was developed. The approach was to use a building energy model (BEM) called Neutral Building Data Model (NBDM) as an intermediate extensible format (XML) for storing the additional inputs related to energy simulation. This NBDM is a standard format which can be used in different energy simulation software (e.g., TrnSys). It was chosen mainly for its simplicity compared to other formats like GbXML. In contrast, the regulatory energy model needs a more detailed BEM, referred to as BEM_R in this paper. The creation of BEM_R from simplified NBDM data was achieved using default values and databases. For example, the required detailed solar properties for the windows (i.e. BEM_R data for windows) were simplified in NBDM data and completed with predefined values which were assessed from tabulated values as a function of the glazed area and the number of glazings, among other parameters. Thus, only 13 input data were required to describe the window in the NBDM format, while 25 parameters were needed in the BEM_R , as shown in Table 1.

The method was tested and the results on a reference case showed a variation of less than 10% with the building envelope energy index when comparing the simplified approach to a more comprehensive approach that required entering detailed values directly into the energy simulation program. This integrated design tool reduces computing cost and increases building envelope energy performance simultaneously with little input data. It can be used at all design stages of house-building projects. Initial estimates will use a preset BIM adjusted to the project dimensions and already defined components and materials. This estimate can be made in a few minutes. Later in the design process, each building component and material can be redefined more precisely as design choices are made. During the entire design process, cost and energy performance can be monitored jointly to provide substantial help for decision making. The following section describes how automated optimization was added to the process to further improve decision making for house design.

3.3. Optimization process

Optimization in building design has been widely studied for the past two decades. Genetic algorithms were found to perform well as compared to other algorithms for such problems [9,36,37]. A non-sorting genetic algorithm (NSGA2) was chosen to carry out the multi-objective optimization in this study. These evolutionary algorithms are based on Darwin's principle of evolution. A population of individuals submitted to a hostile environment evolves through generations under the natural selection law. The general idea is that the fittest individuals have more chance to survive and reproduce, and hence to transmit their genes to the next generation. After several generations, the population is fitter than the initial one. Gene mutation is added to the process and so new individuals can also evolve.

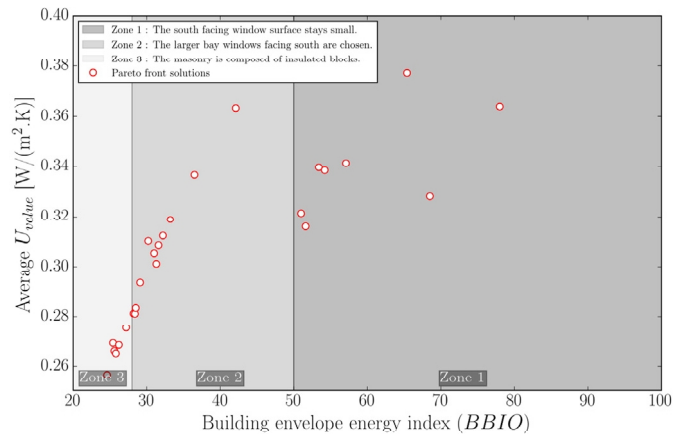


Fig. 13. Building envelope energy index (BBIO) vs Average U-value of the Pareto front solutions.

The algorithm, first invented in 2002 [38], was implemented in a Python package called Deap [39]. The following sections detail how the algorithm has been adapted to tackle the problem at issue here. Four parts of programs are described: a definition of design variables, encoding, evolutionary process, decoding and evaluation. The last section shows a general diagram of the interactions between the optimization algorithm and the other programs.

3.3.1. Defining design variables and encoding

In order to initiate the optimization process, the design variables have to be defined. Because of the possible complex definition of a design variable (e.g. a window as represented in the previous section), a specific user interface was developed to browse the initial NBDM file and select the design variables. Another program was developed to navigate simultaneously in the cost and energy characteristics databases to define alternatives for each of the variables selected. For a window, this would correspond to selecting several window types in the databases. Both databases have different levels of detail, meaning that the correspondance between them is not fully automated. The interoperability of NBDM browsing and the databases was achieved through ontology rules, as described earlier in Section 3.1. Each alternative variable is then stored in a fragmented NBDM file which contains both cost and thermophysical characteristics. Fig. 6 shows a diagram of these two initial stages which generate a definition of the genes.

Once the design variables are chosen, a representation of the value of the variables has to be chosen. This stage is called encoding and allows a generic manipulation of design variables for the optimization process. An integer representation is defined here since all design variables are

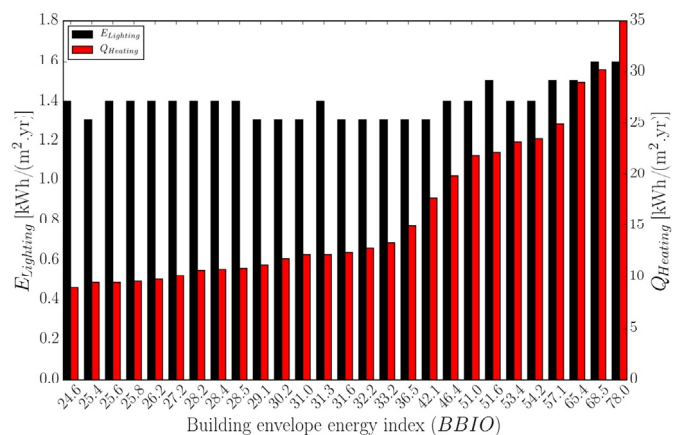


Fig. 14. Building envelope energy index BBIO vs energy demand for heating and artificial lighting of the Pareto front solutions.

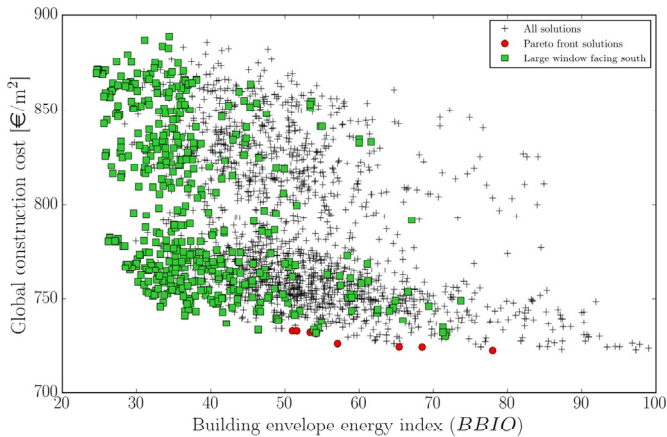


Fig. 15. Large window facing south (green circles). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

discrete. A choice of values for the variables, called a solution or an individual, is represented by a vector which is also referenced as the individual's genome. Each integer contained in the vector is called a gene or index. The possible gene values have to be determined before the optimization algorithm is started as they are used by the mutation and initial population generation operators. A vector is generated, including all gene integer values, and this vector is assigned to an indexed NBDM fragment file. The process is shown in Fig. 7(a). The first gene, for instance, can take an integer value of 0, 1 or 2, corresponding to the three indexed NBDM fragments.

3.3.2. Evolution process

The evolution process is directed by the principles of selection, reproduction and mutation of a population of individuals. In the case of single objective genetic algorithms, selection is based on the objective function values, also called fitness values. The fittest individuals have the highest chance of being selected for reproduction and can be selected more than once. Reproduction consists of generating a new population from the selected individuals. Their genes are combined to form a new population. Finally, some individuals are mutated by modifying some of their genes. After a given number of generations, the population is composed of fitter individuals than the initial one. For NSGA2, a new fitness function is created.

3.3.3. Decoding and evaluation

In the decoding process here, the NBDM was reconstructed from a given genome. The genome enabled a selection of the appropriate NBDM fragments corresponding to each gene. The program then made

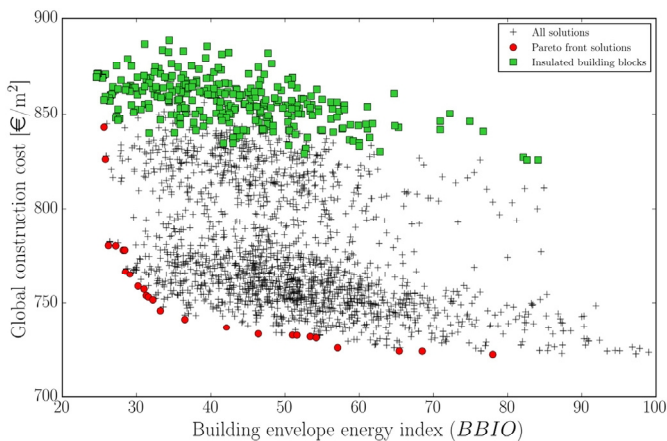


Fig. 16. Insulated building blocks (green circles). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

the changes in the reference NBDM. Fig. 7(b) shows how the decoding program interferes with the corresponding NBDM fragments. Then, in the evaluation process, the objective functions (here cost and energy performance) were computed (see Fig. 7(c)). The extended NBDM was automatically processed using a cost function that was specifically developed for automated optimization studies. The cost function only accounts for the optimization design variable costs and not for the entire house construction cost. It is determined by the structure of the cost database used, which includes materials, labor and extra cost aggregated through the process to a single cost per m² for walls and a unit cost for windows. The energy performance assessment was achieved by converting the NBDM file to a BEM_R, as explained in Section 3.2.

3.3.4. General diagram

Fig. 8 shows a diagram of the complete optimization process. The design variables were first defined and encoded. The optimization process was then initialized by generating a predefined number of random individuals called a population. From the second generation, NSGA2 operators, namely selection, crossover and mutation were applied to the population to generate a new population. Each individual of the population was decoded into a new extended NBDM, evaluated and stored in a file from which a Pareto front was determined. The process was repeated for a predefined number of generations, and for each generation the solutions were added to the result file and the Pareto front updated.

Several elements were added to decrease the optimization time. Distributed computing was used since it allows the simultaneous evaluation of N individuals on a laptop computer with N processors. In the following case study, we used an eight core computer with generations of 12 individuals. The objective functions can be evaluated for each individual independently in parallel, including the most time-consuming calculation, i.e. thermal simulation, and this was done for eight individuals simultaneously. Section 4 presents an optimization case study to show the benefits of the methodology with regards to house design.

4. Case study

4.1. Reference case and settings

4.1.1. House description

A case study was defined to clarify the use of the methodology developed in this paper. The reference case was a single family house of about 76 m² net internal floor area located in La Rochelle, on the west coast of France. This climate is classified by Köppen as marine west coast [40], with 2068 heating degree days (base 18 °C) and 21 cooling degree days (base 22 °C). The house was composed of a single floor, as shown on Fig. 9. In this case study, the optimization focused on building envelope cost and energy performance. The energy performance of the envelope was based on the minimization of the energy demand index $BBIO$ (previously defined). The composition of the walls and the type of window of the reference house are detailed in Fig. 10 and Table 2, respectively. The underlined parameters correspond to the design variables considered for optimization.

4.1.2. Databases and design variables

A cost database for France was used for this study [41]. All costs include labor and are regularly updated and determined statistically for typical construction products. This cost database gives a generic description of products and does not include all thermophysical characteristics. So, a second database containing these thermophysical data and maintained by the EDIBATEC association [42] was used, as described in Fig. 6. Both databases were made interoperable using ontology rules, as described in Section 3.1, and thermal characteristics were assigned to costs for the corresponding products. All design variable values are summarized in Table 3 and Fig. 11. The defined design space thereby comprised 72 million possible solutions ($15 \times 12 \times 20 \times 2 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10$).

The cost of the products used here varied consistently with their dimensions (see Fig. 11). The quantity of wall materials was directly linked to the width of the walls and therefore to their thermal resistance; in contrast, the cost of wall materials varied mainly with wall surface for a given thermal resistance.

4.2. Results and discussion

4.2.1. Optimization results

In order to fit the optimization parameters, the optimization loop was run multiple times to check the convergence of the algorithm. Setting the number of generations to 300 and the number of individuals per generation to 12 gave a good compromise between computation time and accuracy of the Pareto front approximation (see Table 4 for parameter values). A higher number of generations and individuals did not significantly improve the Pareto front. Fig. 12 shows a plot of the building envelope energy index and cost values calculated for all the solutions of one optimization. In this particular case, 2689 different solutions were evaluated, which took 27 min to complete (Intel Core i-7 2.40 GHz laptop). The red dots correspond to the individuals located on the Pareto front determined by the algorithm.

Several observations can be made from the optimization results. Here we will focus on the optimal solutions, located on the Pareto Front. The results show three different zones for these solutions, as highlighted on Fig. 12. In all zones, the energy performance improved with the thickness of the insulation material in the walls, roof and floor. Zone 1 is characterized by solutions where the south facing window surface is small. The cost is rather low, mostly because a square meter of wall is cheaper than a square meter of window. In Zone 2 larger bay windows facing south were chosen and the energy performance improved compared to Zone 1. For instance, the solution with the smallest *BBIO* in Zone 2 had two 2.25 m × 3 m bay windows facing south. This suggests that, for the La Rochelle climate, the solar gains due to a large south facing window surface counterbalance the increase in thermal losses due to a large glazed area. This is confirmed in Fig. 13, where the average U-value of the solutions located on the Pareto front are plotted against the building envelope energy index (*BBIO*). The average U-value of the solutions increased from Zone 1 to Zone 2 because of the large windows, while the energy performance improved (energy index decreased). Finally, Zone 3 corresponds to the most energy efficient solutions where maximum window surfaces facing south were chosen and the masonry was composed of insulated blocks. The level of insulation and thus the energy performance therefore improved, while the cost increased significantly due to the use of insulated building blocks compared to traditional concrete blocks.

Further analysis of the Pareto front solution in terms of the energy demand, shown in Fig. 14, highlights the low variation in lighting compared to the prevalent impact of the heating energy demand. This low variation is also linked to the simplified pre-defined values of windows, as detailed in Section 3. Indeed, the impact of the energy index was checked prior to the experiment, although further details on windows and lights could have been considered for the lighting studies with the same methodology and specific interoperability rules. Furthermore, there was no mechanical cooling system, as demanded by the building regulations for dwellings in La Rochelle.

5. Discussions

This method can be effective in different ways, helping decision making at various design stages of house construction projects. In the early design stages, useful guidelines can be obtained using the optimization process which could not be obtained using a simplified approach. In this particular case, for instance, focusing only on average U-values is not sufficient to ensure an energy efficient design since the south facing window surface should also be considered as a design priority. Insulated building blocks, on the other hand, did not perform well as they only

provided a small improvement in energy performance at a relatively high cost. Extending this method to a more advanced design stage is now feasible as the use of the most detailed product database would allow us to attain the final level of definition of the project. This would then ensure the best set of compromises when taking into account either better energy performance or lower costs. Finally, this approach can be used to see how particular products perform. For instance, in Fig. 15, the solutions with the largest windows (2.25 m × 3 m) facing south are highlighted in green colored dots. Most solutions with a low *BBIO* index had these types of windows, confirming that a larger window surface facing south is of great importance if a high energy performance is required. The solutions with the most insulating building blocks ($R = 5.3 \text{ m}^2\text{K/W}$) are plotted in green on Fig. 16. All these solutions were above the 800 €/m² mark, which also confirms that, although they can give good energy performances, they remain very expensive as compared to other products. In terms of the design process, such information could give substantial help to building designers by providing information on the limits of a product in a specific construction context. For example, in our case study for an energy index above 50, large south facing windows are not ideal and lower cost solutions may provide a similar energy performance. On the contrary, for an energy index below 50, large south facing windows become necessary.

When using a trial and error procedure, determining zones where a particular product or a combination of products becomes interesting is much more difficult. Indeed, even if the design procedure can be simplified with an integrated design tool, the number of possible combinations increases exponentially with the number of design variables (72,000,000 possible combinations for this simple case). This is especially true when considering more objectives in the design process, such as primary energy consumption, thermal comfort and life cycle analyses.

6. Conclusion

This paper has proposed two processes to improve house design practices. The first consists in providing a flexible cost and energy performance integrated tool usable at all design stages. This was implemented by coupling regulatory building energy assessment software to an existing vocational tool for cost assessment. Interoperability was based on a simple building energy model (NBDM) to transfer information from the vocational ADR tool outputs to the regulatory energy assessment program. Pre-setting building geometries, building components and materials means that assessing house cost and energy performance can be achieved with little input data.

The proposed automated system, using a semantic process and ontology rules, was used to browse heterogeneous databases. Predefined rules avoid time-consuming manual entries and input errors - these errors are frequent, especially for the numerous building energy parameters. Compared to conventional procedures, this yields more time-efficient and reliable solutions. However, a relatively large amount of preliminary work has to be done to define the overall semantic system, which needs to be regularly enriched with new products and typologies. The standardized data and ontologies used in this study enable efficient work sharing. Moreover, interoperability was required for the optimization procedure.

A second process, which added an optimization algorithm to the integrated design tool, was investigated. An automated process to determine cost and detailed physical input data was developed. A multi-objective NSGA2 optimization algorithm was used and a user interface created to help set the optimization design variables. The results for a case study showed the importance of maximizing solar gains if the aim is high energy performance. The optimization showed promise with regards to house design practices. This process gave valuable clues to how each design variable performs and this may be an effective help in decision making. The perspectives of this work include adding more objective functions and design variables to take into account

more design criteria in the optimization process. These could be primary energy consumption, thermal comfort or life cycle analysis criteria as overall construction cost and building envelope energy performance may not be sufficient to provide efficient house designs.

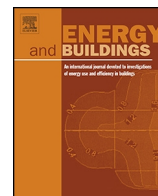
For the simulation runtime in this case study and the 72 million possible solutions, the Pareto front was approximated in less than 30 min using a multiprocessing on a single computer. The runtime increased compared to the few seconds necessary for conventional simulations. Still, the main time-consuming job was the study initialization, which may be more efficient with the previously defined interoperability using data entries. Finally, compared to a traditional design with a few alternatives, the Pareto front gave a more general overview of possible solutions with more reliable knowledge on the impact of design variables. To integrate this approach efficiently into the stakeholders' decision-making process, these complex results may require further tools such as a decision support system (DSS). The proposed prototype tool is consistent with the increase in standard BIM processing using IFC standards and web services. Its current developments are focusing on links with the BIM architecture work and the interactions with stakeholders in terms of new constraints for refurbishment.

Acknowledgments

The authors would like to thank the PROGEMI development company, the French National Research and Technology Association (ANRT 2012/0361), the French Research National Agency (ANR), and the French Agency for Environment and Energy Management (ADEME) for their support. This work was developed in the scope of the research projects "Multi-Physical and Interactive CO-Simulation" (COSIMPHI ANR-13-VBDU-0002) and "Refurbishment of collective housing with ENergy Optimization and IntegRated approach" (RENOIR 1504C0118).

References

- [1] G. Löhnert, A. Dalkowski, W. Sutter, Integrated Design Process – A Guideline for Sustainable and Solar-Optimised Building Design, International Energy Agency (IEA) - Task 23, Berlin, Germany, 2003 (http://task23.iea-shc.org/data/sites/1/publications/IDPGuide_internal.pdf).
- [2] C. Brunsgaard, P. Dvořáková, A. Wyckmans, W. Stutterecker, M. Laskari, M. Almeida, et al., Integrated energy design – education and training in cross-disciplinary teams implementing energy performance of buildings directive (EPBD), *Build. Environ.* 72 (2014) 1–14, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.10.011>.
- [3] R. Volk, J. Stengel, F. Schultmann, Building information modeling (BIM) for existing buildings – literature review and future needs, *Autom. Constr.* 38 (2014) 109–127, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>.
- [4] R. Miettinen, S. Paavola, Beyond the BIM utopia: approaches to the development and implementation of building information modeling, *Autom. Constr.* 43 (2014) 84–91, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2014.03.009>.
- [5] CSTB, Innovative Solutions for Refurbishment of Single Family Houses, Solutions Innovantes Pour la réhabilitation Des Maisons Individuelles, Toward Factor 4 Buildings, Vers Des bâtiments Facteur 4 (2013) (<https://boutique.cstb.fr/Product/solutions-innovantes-pour-la-rehabilitation-des-maisons-indivuelles>).
- [6] PROGEMI, Software for single family house builder, Logiciel pour les Constructeurs de maisons individuelles, 2015 <http://www.progemi.fr>, (accessed July 28, 2015).
- [7] C. Becchio, P. Dabbene, E. Fabrizio, V. Monetti, M. Filippi, Cost optimality assessment of a single family house: building and technical systems solutions for the nZEB target, *Energy Build.* 90 (2015) 173–187, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.050>.
- [8] C. Diakaki, E. Grigoroudis, N. Kabelis, D. Kolokotsa, K. Kalaitzakis, G. Stavrakakis, A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency in buildings, *Energy* 35 (2010) 5483–5496, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.012>.
- [9] S. Attia, M. Hamdy, W. O'Brien, S. Carlucci, Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design, *Energy Build.* 60 (2013) 110–124, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.016>.
- [10] Directive 2002/91/EC of the European Parliament of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings, *Off. J. Eur. Communities (L 1/65)* (2003) (<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32002L0091>).
- [11] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), *Off. J. Eur. Communities (2010) (L 153/13)*, http://www.eceee.org/policy-areas/buildings/EPBD_Recast/EPBD_recast_19May2010.pdf.
- [12] French thermal building regulation RT2012 – Arrêté du 26 Octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments, <http://www.rt-batiment.fr2010>.
- [13] M.-C. Roger, R. Remesy, Y. Menager, S. Le Guen, EPBD Implementation in France – Status at the End of 2012, Implementing the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), ADENE 2012, pp. 181–190 (<http://www.buildup.eu/sites/default/files/content/CA3-National-2012-France-ei.pdf>).
- [14] C. Feldmann, French building regulation sets 50 kWh/m²a a limit for primary energy, *REHVA J.* 29–32 (2013).
- [15] CSTB, (Annex to the building regulation for approval of the Th-2012 BCE calculation method - official Journal 201114), Annexe à l'arrêté portant approbation de la méthode de calcul Th-2012 BCE - bulletin officiel 201114, 2011 http://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/fiches/BO201114/met_20110014_0100_0007%20annexe.pdf.
- [16] D.B. Crawley, J.W. Hand, M. Kummert, B.T. Griffith, Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs, *Build. Environ.* 43 (2008) 661–673, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>.
- [17] D. Coakley, P. Raftery, M. Keane, A review of methods to match building energy simulation models to measured data, *Renew. Sust. Energy. Rev.* 37 (2014) 123–141, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>.
- [18] H. Zhao, F. Magoulès, A review on the prediction of building energy consumption, *Renew. Sust. Energy. Rev.* 16 (2012) 3586–3592, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.049>.
- [19] N. Fumo, A review on the basics of building energy estimation, *Renew. Sust. Energy. Rev.* 31 (2014) 53–60, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.040>.
- [20] H.-J. Kim, Y.-C. Seo, C.-T. Hyun, A hybrid conceptual cost estimating model for large building projects, *Autom. Constr.* 25 (2012) 72–81, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.04.006>.
- [21] W. James, A new approach to single price rate approximate estimating, *RICS J.* (1954) 810–823.
- [22] F.K.T. Cheung, M. Skitmore, Application of cross validation techniques for modelling construction costs during the very early design stage, *Build. Environ.* 41 (2006) 1973–1990, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.09.011>.
- [23] M.-Y. Cheng, H.-C. Tsai, W.-S. Hsieh, Web-based conceptual cost estimates for construction projects using evolutionary fuzzy neural inference model, *Autom. Constr.* 18 (2009) 164–172, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2008.07.001>.
- [24] G.-H. Kim, S.-H. An, K.-I. Kang, Comparison of construction cost estimating models based on regression analysis, neural networks, and case-based reasoning, *Build. Environ.* 39 (2004) 1235–1242, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.02.013>.
- [25] Z. Ma, Z. Liu, BIM-based intelligent acquisition of construction information for cost estimation of building projects, *Procedia Eng.* 85 (2014) 358–367, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.561>.
- [26] S.-K. Lee, K.-R. Kim, J.-H. Yu, BIM and ontology-based approach for building cost estimation, *Autom. Constr.* 41 (2014) 96–105, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.020>.
- [27] A. Dziadosz, The influence of solutions adopted at the stage of planning the building investment on the accuracy of cost estimation, *Procedia Eng.* 54 (2013) 625–635, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.057>.
- [28] H. Islam, M. Jollands, S. Setunge, Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings—a review, *Renew. Sust. Energy. Rev.* 42 (2015) 129–140, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.006>.
- [29] M.R. Gaterell, M.E. McEvoy, The impact of energy externalities on the cost effectiveness of energy efficiency measures applied to dwellings, *Energy Build.* 37 (2005) 1017–1027, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.12.004>.
- [30] K. Kim, G. Kim, D. Yoo, J. Yu, Semantic material name matching system for building energy analysis, *Autom. Constr.* 30 (2013) 242–255, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.11.011>.
- [31] P. Pauwels, D. Van Deursen, R. Verstraeten, J. De Roo, R. De Meyer, R. Van de Walle, et al., A semantic rule checking environment for building performance checking, *Autom. Constr.* 20 (2011) 506–518, <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2010.11.017>.
- [32] J. Beetz, J. van Leeuwen, B. de Vries, IfcOWL: a case of transforming EXPRESS schemas into ontologies, *AI EDAM* 23 (2009) 89–101, <http://dx.doi.org/10.1017/S0890060409000122>.
- [33] World Wide Web Consortium (W3C), <http://www.w3.org/>.
- [34] The Apache Software Foundation, Apache Jena, <https://jena.apache.org2015>.
- [35] The Apache Software Foundation, ARQ - a SPARQL processor for Jena, <http://jena.sourceforge.net/ARQ2015>.
- [36] R. Evins, A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design, *Renew. Sust. Energy. Rev.* 22 (2013) 230–245, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.004>.
- [37] A.-T. Nguyen, S. Reiter, P. Rigo, A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis, *Appl. Energy* 113 (2014) 1043–1058, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.061>.
- [38] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Trans. Evol. Comput.* 6 (2002) 182–197, <http://dx.doi.org/10.1109/4235.996017>.
- [39] F.-A. Fortin, F.-M. De Rainville, M.-A. Gardner, M. Parizeau, C. Gagné, DEAP: Evolutionary Algorithms Made Easy 13 (2012) 2171–2175 (<http://www.jmlr.org/papers/volume13/fortin12a/fortin12a.pdf>).
- [40] M.C. Peel, B.L. Finlayson, T.A. McMahon, Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11 (2007) 1633–1644, <http://dx.doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- [41] BatiActu, ADP - A French construction cost database, L'Annuel des Prix, 2015 <http://www.annueldesprix.com/>, (accessed April 22, 2015).
- [42] EDIBATEC, EDIBATEC association, <http://www.edibatec.com2015>.



Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program



Rabah Djedjig^{a,b,c}, Emmanuel Bozonnet^{a,b,*}, Rafik Belarbi^{a,b}

^a LaSIE, La Rochelle University, Avenue Michel Crépeau, 17000 La Rochelle, France

^b IRSTV, FR CNRS 2488, 1 rue de la Noë, BP 92101, 44321 Nantes, France

^c LERMAB, Université de Lorraine, Institut universitaire de technologie Henri Poincaré de Longwy, 186 rue de Lorraine, 54400 Cosnes-et-Romain, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 April 2014

Received in revised form

26 September 2014

Accepted 29 September 2014

Available online 8 October 2014

Keywords:

Green roof

Green wall

Building performance simulation

Experimental measurements

Coupled dynamic models

ABSTRACT

In this paper, a newly developed heat and moisture transfer model for green envelopes is integrated in a transient building simulation program (TRNSYS) in order to investigate its dynamic performances coupled with a multizone building code. On the one hand we focus on the understanding of the coupled heat and mass transfers between green envelopes and the building; and on the other hand we study the model accuracy to assess the vegetation impacts together with building design. At first, the model reliability is verified through experimental comparisons during a summer period. Then, the developed simulation tool is used to assess the impacts of green walls on building energy performance. Since this model involves different hygrothermal transfer phenomena, the detailed numerical model results are analyzed to determine the weight of each phenomenon: evapotranspiration, shading effect and additional thermal resistance of green roof or wall. The results highlight the thermal benefits in summer and winter, especially for the west walls. The analysis of the different transfer mechanisms show that the foliage shading reduces the surface temperature variation whereas the evapotranspiration ensures the passive cooling when the water availability is sufficient.

© 2014 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

To reduce buildings energy consumption various innovative construction techniques can be employed. Among these techniques, green roof and green walls are increasingly used in new construction projects. Green roofs effectively contribute to urban reconciliation ecology [1] and provide solutions for several environmental problems stemming from buildings. In addition, green roof strategy is not only a solution for new built projects but also for retrofitting [2–4]. Pulselli et al. [5] have evaluated, in energy terms the direct and indirect environmental resource appropriation by green walls and found that living walls and grass walls systems can achieve a condition of comprehensive sustainability in 25 years lifetime.

Green roofs, living walls and green façades can be valuable for building energy performance and for urban microclimate mitigation [6–8]. They reduce the temperature peaks of external surfaces

of buildings envelope in summer [9–13]. Green envelope modules affect the heat transfer through the building envelope layers. Several experimental studies seek out quantifying the heat gains and losses from green envelopes, especially green roofs [10,14–17]. Several studies estimate that green roofs reduce significantly the building's cooling load during summer [18–20]. Santamouris et al. [21] found that a green roof reduce the energy demand up to 6–49% for the whole building when the major impact is observed for the last floor. Regarding the heating loads, the effects of green roof were not significant in this study. Other studies highlight similar trends but with different energy impacts due to various building configurations and different climates. When green walls are studied, a lot of parameters need to be considered such as the walls orientation [22] and the water content distribution within the green wall, from top to bottom [12,23].

However, the heat and moisture transfer through the vegetated building envelope depends on its thermal insulation, on the radiative properties of external surfaces and on thermohydric properties of the vegetation species and growing medium of green roofs and green walls. According to a study of Wong et al. [14] on a five-story commercial building located in Singapore, the variation of the green envelope parameters (vegetation and growing media) has a non-negligible impact on the annual energy consumption which

* Corresponding author at: LaSIE, La Rochelle University, Avenue Michel Crépeau, 17000 La Rochelle, France. Tel.: +33 5 46 45 85 46; fax: +33 5 46 45 82 41.

E-mail addresses: emmanuel.bozonnet@univ-lr.fr, ebozonnet@univ-lr.fr (E. Bozonnet).

can range between 0.6 and 14.5%. Hence, it is necessary to develop models able to assess the complex hygrothermal behavior of vegetated envelopes in different climates under various configurations. Several green roof models have been published over the last fifteen years [24–28]. Besides, there are fewer simulation works on the green walls impact on energy performance. Green walls were often modeled only through their shading effects [29,30]. Building simulations (with TAS) of Wong et al. [31] were performed to determine the vertical greening systems effects on thermal comfort and energy consumption. However, the influence of greening systems on buildings was modeled only through shadings coefficient linked to the leaf area index. Recently, Scarpa et al. [32] develop a living wall mathematical model that accounts for different features of living walls. Validation against field measurements for two different kinds of living walls have been carried out.

Olivieri et al. [33] have study the thermal behavior of an extensive green roof during the summer. Subsequently, a simplified numerical model based on experimental data was established in order to calculate the thermal resistance of the roofing during summer. The model aims to assess the energy performance of green roofs on the basis of three variables: the leaf area index, the height of the plants and the thermal conductivity of the substrate. However, this approach is valid for a given roof in summer with a given climate and the results cannot be generalized to other seasons according to Moody and Sailor [34].

In order to assess the thermal incidence of vegetated envelopes on building energy performance, reliable models of green envelope modules should be coupled to the detailed building model. D.J. Sailor has developed and integrated a green roof model [25], based on the Army Corps of Engineers' FASST vegetation models [35] into the EnergyPlus building energy simulation program. The model was compared with a monitored green roof in Florida. Although the diurnal temperature variations were only about 10 °C, the average bias of the simulation was 2.9 °C with an RMSE of 4.1 °C. It is true that such numerical deviation may be due to incorrect inputs for the model parameters, but the reason may be also due to the simplifying assumptions of the green roof model. A more recent work [36], accomplished at the University of La Rochelle has yield to the integration, into TRNSYS, of a green roof model [37] based on Sailor's model and enhanced with a water balance. A comparative study of temperature and heat flux evolution through green roofs and conventional roofs allowed the assessment of the green roofs thermal impact and some parametric studies.

In this paper, an improved model of green envelope, previously developed and compared to experimental studies at the university of la Rochelle [28], is adapted to the building simulation software TRNSYS. The developed model takes into account the major thermal, aeraulic and hydric phenomena and overcomes certain limitations and assumptions of previous modeling approaches that assume quasi-steady state heat transfer and neglect the effect of water transfer on heat transfer. This new TRNSYS type can be applied in both green roofs and green walls modeling by introducing the proper meteorological inputs and adjusting the model to each technique and their specific implementation.

2. Model development

Following a review [28] of green roof models, a new model has been developed to improve the thermo-hydric modeling of the green modules by considering the coupling mechanisms of heat and mass transfer. Modified resistances to heat and vapor transfers have been proposed; taking into account the radiative characteristics, the physiological and the thermophysical properties of the green modules constituents and their change according to the water availability. The developed model was compared under

various weather conditions with experiments (July 2011) in La Rochelle (France). Predicted surface temperature and water content evolutions were in good agreement with experimental data. The parametric studies highlighted the effect of the saturation ratio on the temperature peaks and clarified the role of evapotranspiration in passive cooling.

This green envelope model requires the climatic data at the external side, and, at the internal side, the bottom substrate temperature or the conducted heat flux to the building structure. The actual impact on the building energy performance has to be computed by coupling the model to the thermal building model on this internal side. In the following sections the model equations are summarized and its coupling with the multizone building model is detailed.

2.1. Green envelope model

The model [28] considers coupled heat and mass transfer phenomena through the green module. The leaf canopy is characterized by the coverage ratio (σ_f), the leaf area index (F) and semitransparent radiative properties. The substrate is a porous medium characterized by its water content and thermophysical properties depending on this later [38]. The model equations establish the heat balances on the leaf canopy and on the substrate surface (see Fig. 1). The energy balances include the main heat fluxes; namely the shortwave radiations (solar irradiance I_s [W m^{-2}]) and longwave radiations (temperatures [K] of sky T_{sky} , of foliage T_f and substrate T_g), sensible heat fluxes (H_f and H_g [W m^{-2}]) and latent heat fluxes (L_f and L_g [W m^{-2}]). These latent and sensible fluxes (H and L) are evaluated using a resistance scheme (r_a , r_s , r_c and r_{sub} [s m^{-1}]) given in reference [28]) that opposes heat and vapor transfer and that incorporates the aerodynamic resistance, the stomatal resistance, and the resistance to the diffusion of heat and vapor from the soil surface throughout the leaf canopy.

The heat balance of the foliage can be expressed by unit area:

$$\begin{aligned} (\rho c_p)_f d_f F \frac{dT_f}{dt} = & \sigma_f [(1 - \tau_s - \rho_s) (1 + \tau_s \rho_g) I_s \\ & + F_{sky,f} \varepsilon_f \sigma (T_{sky}^4 - T_f^4) + \varepsilon_{fg} \sigma (T_g^4 - T_f^4)] \\ & - H_f - L_f \end{aligned} \quad (1)$$

where T_a is the ambient temperature, $(\rho c_p)_f$ and d_f are, respectively, the specific thermal capacity and the average leaf thickness. The radiative coefficients τ_s , ρ_s , ε_f , ρ_g , $F_{sky,f}$ and σ are, respectively, the foliage shortwave transmittance, the foliage shortwave reflectance, the foliage emissivity, the soil reflectance, the sky view factor and the Stefan-Boltzmann constant.

The sensible heat flux H_f and the latent heat flux L_f through the foliage are given by the following equations:

$$H_f = F \frac{(\rho c_p)_a}{r_a} (T_f - T_a) \quad (2)$$

$$L_f = F \frac{(\rho c_p)_a}{\gamma (r_a + r_s)} (p_{v,f,sat} - p_{va}) \quad (3)$$

similarly, the energy balance on the substrate surface is given as follows by unit area:

$$\begin{aligned} -\lambda \omega_g \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = & \sigma_f [(1 - \rho_g) \tau_s I_s] + (1 - \sigma_f) [(1 - \rho_g) I_s] + \\ & \sigma_f \varepsilon_{fg} \sigma (T_f^4 - T_g^4) + (1 - \sigma_f) F_{sky,g} \varepsilon_g \sigma (T_{sky}^4 - T_g^4) - H_g - L_g \end{aligned} \quad (4)$$

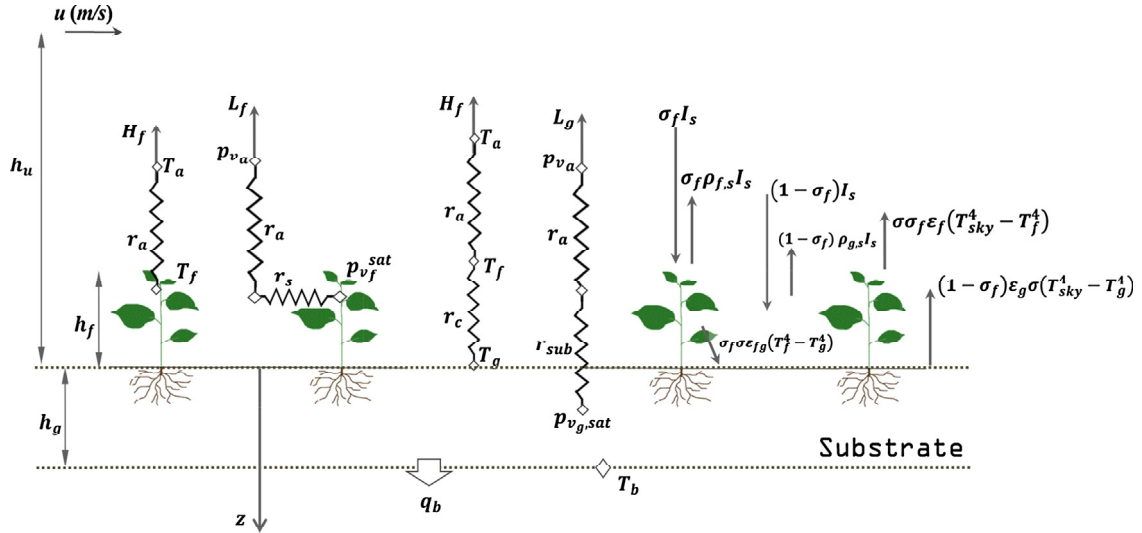


Fig. 1. Main modeled heat fluxes on a vegetated envelope module and corresponding heat and vapor transfer resistances.

where λ_{ω_g} [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$] is the thermal conductivity of the substrate. The sensible heat flux H_g and the latent heat flux L_g are given by the following equations:

$$H_g = \frac{(\rho c_p)_a}{(r_c + r_a)} (T_g - T_a) \quad (5)$$

$$L_g = \frac{(\rho c_p)_a}{\gamma (r_{sub} + r_a)} (p_{v_{g,sat}} - p_{v_a}) \quad (6)$$

where p_v [Pa] is the partial vapor pressure and γ is the thermodynamic psychrometric constant.

The heat transfer through the substrate layer is modeled by the one-dimensional heat Eq. (7) in which the thermophysical properties are calculated by accounting for the change in the volumetric water content ω_g . The change in this later is determined over time by means of the water balance expressed in Eq. (8):

$$(\rho c_p)_{g,\omega_g} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{\omega_g} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (7)$$

$$\rho_w \Delta z \frac{\partial \omega_g}{\partial t} = P + A - D - E \quad (8)$$

$$E = \frac{(L_f + L_g)}{l_v} \quad (9)$$

where ρ_w is the water density [kg m^{-3}]; Δz is the substrate depth; l_v is the water specific latent heat of vaporization of water [J kg^{-1}]; P, A, D and E are, respectively, the rainfall, the watering, the drainage and the evapotranspiration rates [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]. The evapotranspiration E [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$] is equal to the sum of the evaporated water from the substrate and the transpired vapor from the vegetation.

For the inner side boundary condition, we can write:

$$-k_{\omega_g} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \varphi_b \quad (10)$$

where the heat flux φ_b [W m^{-2}] is calculated by other TRNSYS components taking into account the multi-layers of the building envelope. It may correspond to the heat conducted through the outer side of the envelope structure if the substrate is in direct contact with it. If there is an air layer that separates the green module of the building envelope, φ_b may correspond to the heat exchange by conduction/convection and infrared radiation on the inner surface of the green wall substrate to which is added the latent heat

transfer within the air layer. In that case, we model the heat balance in the air layer by the following terms:

$$\varphi_b = \frac{T_b - T_s}{R_{th}} + \bar{h}_m (p_{v_{b,sat}} - p_{v_a}) \quad (11)$$

where (b) subscript refer to the inner side of the substrate layer, (s) subscript refer to the outside surface of the building. R_{th} [$\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$] is the thermal resistance of the air layer, \bar{h}_m [$\text{W m}^{-2} \text{Pa}$] is a mean coefficient for vapor transfer from the air layer to the ambience, $p_{v_{b,sat}}$ and p_{v_a} are, respectively, the vapor pressure at the temperature T_b and the partial vapor pressure of the ambient air.

2.2. Coupling with multizone building model

In order to assess the thermal effect of green envelopes on building energy demand, the model described here briefly has been integrated into TRNSYS simulation tool. This software has a graphical user interface that provides intuitive creation of simulations by dragging and dropping available library components. Each component has defined number of inputs, outputs and parameters. Thereafter, the outputs of each component are connected to the inputs of other ones in order to make up a physical system. The TRNSYS module Type 56 models detailed multizone building by nodal approach. In this model, each room stands for one airnode as a homogenous thermal zone for which are specified the internal gains (occupants, equipment, etc.), the ventilation and the infiltration rates, the glazing and the walls orientations. The thermal zones are linked by several multilayer walls with different thermophysical properties. The layers are characterized by their specific thermal conductivities and thermal inertia. The external surfaces exchange heat with the surrounding environment by short- and longwave radiations and by forced and natural convection. Hence, the software is able to calculate the thermal loads of heating and cooling for each zone and for the entire building through annual simulations. The developed green module model, written in Python programming language, is coupled to the multizone building model component (Type 56) through a new TRNSYS Type named *VegEnvelope* (see Fig. 2).

For each time step, the coupling of the models requires compliance with boundary conditions that link the *Trnsys VegEnvelope* Type to the multizone building module. The inputs of *VegEnvelope* are the heat flux φ_b from the building wall and the meteorological data: ambient air temperature T_a [K] and relative humidity RH [%], wind velocity U [m s^{-1}], fictive sky temperature T_{sky} [K] and total

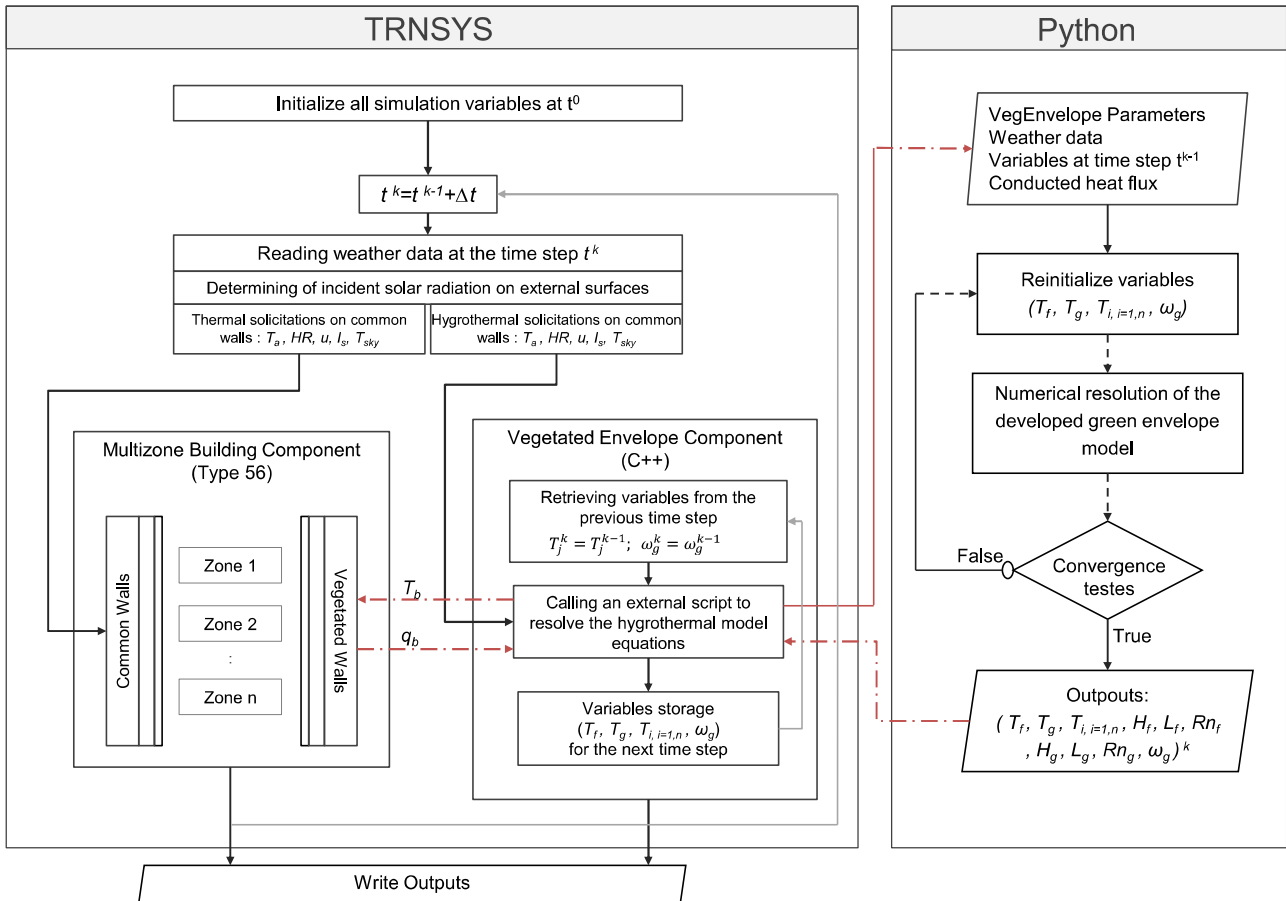


Fig. 2. Coupling Type 56 multizone building model to the new green envelope TRNSYS component within the TRNSYS simulation tool environment.

shortwave irradiance I_s [W m^{-2}]. The outputs are the sensible heat fluxes H_f and H_g , the latent heat fluxes L_f and L_g , and the radiative fluxes on the foliage and on the substrate surfaces. The green envelope component computes also the substrate water content which may be fixed or variable according to watering and rainfall rates. The parameters of the new *Type* specify all the thermohydric properties of plant leaves and porous substrate that are required to run simulations. The plant characteristics are, mainly, the fractional vegetation coverage (σ_f), the leaf area index (F), the leaf canopy height (h_f), the foliage extinction coefficient for shortwave radiation and the minimum stomatal resistance ($r_{s,\min}$). The substrate is characterized by its depth (h_g), its minimum and maximum water capacities and the corresponding minimum and maximum thermal conductivities in addition to its apparent density and solar reflectivity.

3. Experimental comparison

3.1. Green wall experimental bench

The predictions of vegetated module's impacts on buildings have to be compared to experimental data in order to verify the accuracy of the model coupling in the software. Here, we use measurements carried out on the outdoors reduced scale buildings *ClimaBat* [7,39] (scale 1:10) which has been used to validate [28] the green module model. Two of these buildings have green roofs and one has a green wall system on the west façade, see Fig. 3. The successive buildings rows form a set of urban canyons. The temperature evolution at several measurement points inside the green roofs and the green wall layers is monitored using a set of sensors

connected to a datalogger. This datalogger records the air temperature evolution, the humidity variations and radiative fluxes in all specific spots of the experimental platform.

The main thermophysical and radiative properties of the experimental bench were measured with the purpose of introducing them in the numerical simulation to perform more precise comparisons. The canyon streets have an aspect ratio of about 1.2 with a height of 1.2 m. The concrete walls are 5 cm thick with a thermal conductivity of 2.36 ± 0.1 [W m K^{-1}], a thermal capacity of 915 ± 0.05 [$\text{J kg}^{-1} \text{K}$] and a density of 2150 [kg m^{-3}]. The green wall growing medium consists of Chilean sphagnum of 15 [cm] thick and is fixed on a metal grid that forms a weakly ventilated air layer of 5 [cm.] The maximal value of measured volumetric water content in a sphagnum module sample was 75%. We note here that the thermophysical properties of such substrate depend strongly on the volumetric water content (ω_g) [40] and this should be taken into account in the numerical simulations. The green wall is watered twice a day by an automatic drip watering system. So the volumetric water content does not change much over time and its mean value is around 75%. Last but not least, the solar reflectance of the white facade is 0.6, the pavements reflectance is 0.36 and the apparent green wall reflectance is spatially heterogeneous since it varies between 0.15 and 0.30 depending on the nature of the considered surface (vegetation species and fractional vegetation coverage).

3.2. Experimental evaluation of numerical results

In order to verify the accuracy of the model integration to the building simulation software, we compared the predicted green wall impact on the west façade temperature with measurements.

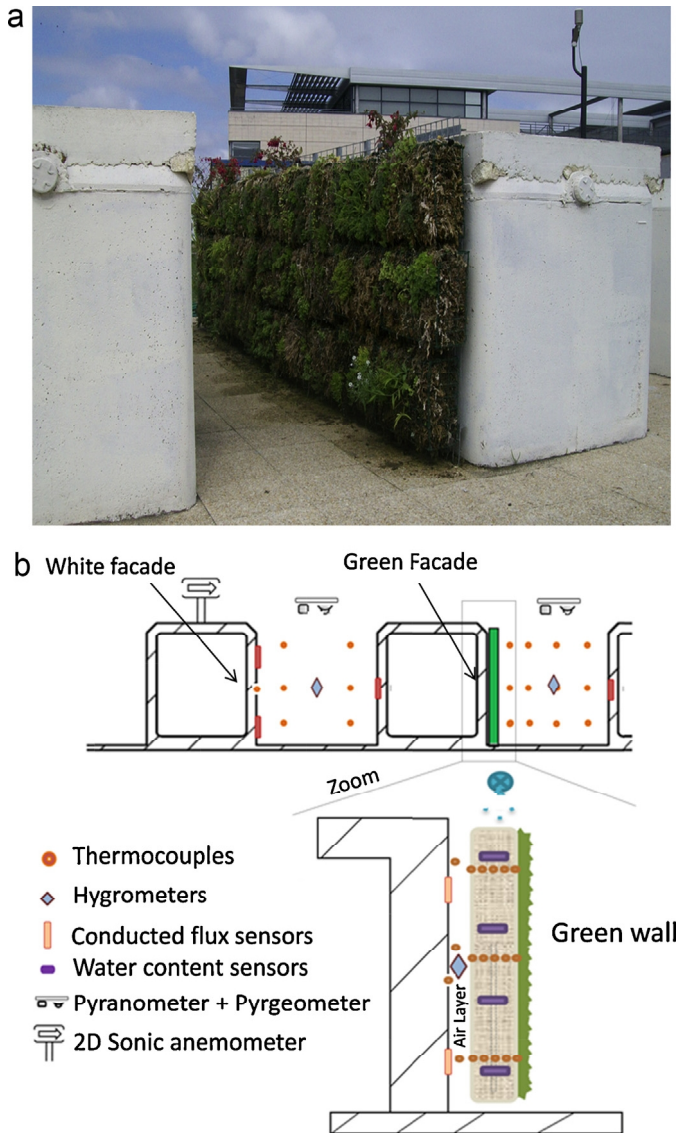


Fig. 3. Experimental bench ClimaBat and the location of some installed sensors.

It is obvious that the façade temperature, which is originally exposed to solar radiation during the evening, would be mitigated by the green wall module. The meteorological data measured on 5 min intervals on the experimental site were averaged with an hourly time-step and then introduced as climatic thermal loads; see Fig. 4(a). The meteorological inputs, defined in the model section, are obtained from these meteorological measurements except T_{sky} [K] that is calculated thanks to longwave irradiance measurements. Horizontal longwave irradiance is measured; then the beam and diffuse irradiances are computed by the program according to Perez Model [41] for tilted surfaces.

In order to consider, at best, the radiative trapping occurring in the street canyons, the solar masks formed by the neighboring buildings are taken into account. Whereas there is no beam radiation on the west facade before noon, the opposite white facade reflects a significant part of their total irradiance. So the total irradiance on the west facade could be increased by the reflected irradiance part which is assumed to be equal to the product $\rho_{s,\text{white}} \times F_{e-w} \times I_{s,\text{east}}$. Where $\rho_{s,\text{white}}$ is the solar reflectance of the white east facade, F_{e-w} is the view factor between the opposite east and west facades and $I_{s,\text{east}}$ is the shortwave irradiance on the east facade (without interchange). Same effects

are considered in the afternoon for the opposite façade, east oriented.

Fig. 4(b) shows comparison of simulated temperature evolution with measurements for the reference white facade and for the facade with the green wall. The corresponding real meteorological data used in the simulation is shown on the upper graph Fig. 4(a). For most days, numerical predictions are in good agreement with experimental measurements. The average bias of the simulation during the month of august was 0.22°C for the vegetated facade with a mean-root-square error of 1.42°C . The bias is relatively small compared to results presented by Sailor [25] for the EnergyPlus implementation of the Army Corps of Engineers' FFAST vegetation models [35]. The average deviation for the reference building (white facade) is 0.81°C with RMSE of 2.75°C ; these are greater than those of the green wall simulation. Furthermore, it can be seen on Fig. 4 that the white façade and the green façade temperatures are very well predicted during the same periods and for various meteorological conditions. Then, the model deviation does not seem to be specific to the green envelope model *VegEnvelope* and could be due to the TRNSYS simulation.

4. Comprehensive study of green envelopes effects on buildings

4.1. Impacts of a green walls on building energy performances

The green envelope component *VegEnvelope* is used here to evaluate the thermal impact of green walls on buildings, as there are fewer available results compared to green roofs. The case study is a three story full scale building, see Fig. 5, comparable to the experimental bench *ClimaBat* [39]. The walls are made of 20 cm cinder block and the roof and ceilings made of 12 cm concrete. The east facade and the west facade have glazing surfaces that represents 20% of the floor area. The air infiltration rate is set at 0.6 ACH; the building is unoccupied, so no internal gains are considered. The solar absorptivity of the roof and the reference façades are 0.5. The building is assumed to have an infinite length and isolated; so neither solar masks nor confined street effect are modeled. To assess the thermal incidence of green walls on this building, both the east and the west façades are vegetated. The green walls substrate depth is 12 cm and its saturation ratio is fixed at 60% as it is supposed to be well watered. The vegetation coverage ratio σ_f is set at 1 and the leaf area index F is set at 4. As the green walls' thermal effects depend on the climate, the simulations are presented for two different climates: La Rochelle (France), where the climate is oceanic and Athens (Greece) which enjoys a Mediterranean climate.

Annual dynamic thermal simulations were performed for the studied building for both climates. The cooling system operates from May to September and the heating system is turned on from October to April. The cooling temperature is set at 26°C and the heating temperature is set at 19°C during day and 15°C during night. The calculated cooling and heating loads are compared for the reference building and for the same building covered with the green walls, see Fig. 6. The cooling energy demand of the air conditioning system is not computed here; indeed it depends on this cooling thermal load, but also on the latent loads and the COP of the system.

The green walls reduce both cooling and heating loads for both considered climates, see Fig. 6. During summer, there is no very high cooling load in La Rochelle city; the maximum monthly load is less than $3 [\text{kWh m}^{-2}]$. Despite this, the energy demand reduction is significant, as the cooling load of the vegetated building is only one half of the reference building's one. For Athens city, the decrease rate of energy load is almost the same. However, under very hot Athens climate, the cooling load is much more important (up to 14.4 kWh m^{-2} on July). Thus, the absolute energy savings

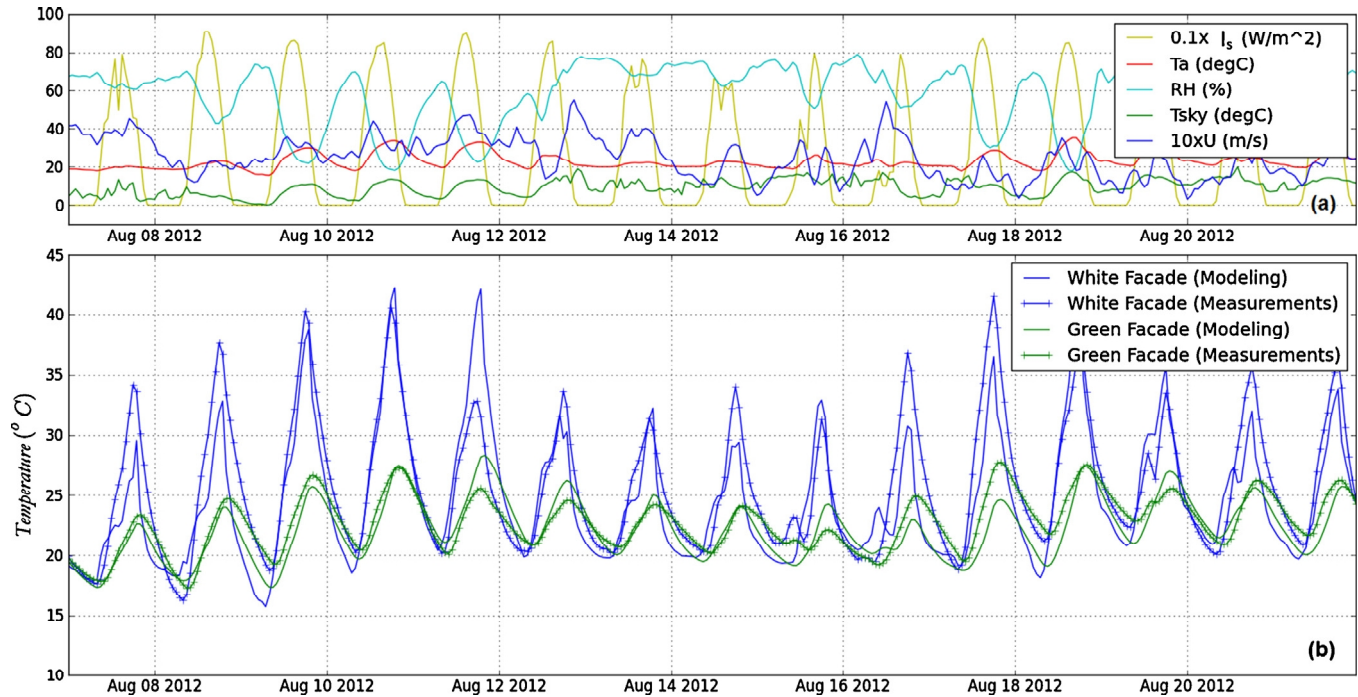


Fig. 4. (a) Main meteorological data measured in August 2012 and used in TRNSYS for validation; (b) comparison of simulated temperature evolution with measurements for the reference white facade and for the vegetated facade oriented to the west.

due to the green walls are greater although the relative savings are lower than the calculated one in La Rochelle city (50.6% for in La Rochelle vs. 37.3% in Athens). During heating period, the green walls provide additional thermal insulation and decrease thermal losses through the vegetated walls. However, heating loads are reduced less compared with cooling loads. Indeed, the simulation results show that green walls reduce heating load by 11.9% in La Rochelle and reduce it by 8.7% in Athens. Further parametric studies should be conducted in order to determine the thermal impact of green walls on realistic buildings and to determine the energy savings potential depending on systems efficiencies and their energy sources.

Considering the mean indoor operative temperature, compared (Fig. 7) for the building located in Athens city, it appears that the

wall high temperatures lead to higher operative temperatures than the cooling set point of 26 °C for indoor air temperature. Moreover, the operative temperature (T_{op}) in the vegetated building remains up to 1.5 °C lower than the T_{op} of the reference building. Therefore, the summer thermal comfort is improved whereas the cooling demand is reduced.

The thermal effects of wall orientation on green facades are studied through parametric simulations for the first floor of the previous building located in La Rochelle and Athens. The building windows are removed from the model in order to avoid comparisons errors due to glazing orientation effects.

The transmitted heat flux from facade surface, covered or not by a green wall, to the room is compared on Fig. 8 for four orientations. For all orientations, the heat flux magnitude variations on the green facades are smaller (for heat gains and heat losses) compared with the reference (bare) facades. The use of the green wall gives the maximal heat flux reduction for the most critical orientations, which are, respectively, the west and the south orientations. On the contrary, the use of green walls on the facades oriented either to the east or to the north has the lowest thermal impact. While the maximal heat flux on the west bare facade exceeds, by almost $250 W m^{-2}$, the maximal flux on the bare north facade, the difference between the green façades do not exceed $50 W m^{-2}$.

The impact of green walls tested for these four orientations on the operative temperature is shown on Table 1. The table presents the maximum, the mean and the minimum values of simulated operative temperatures during July and August for the buildings located in La Rochelle and Athens with different orientations. The operative temperature is chosen to be analyzed as it affects the thermal comfort within the building. On this table we see that the green wall reduces the maximum operative temperature between 2.7 and 4 °C depending on the climate especially for the facade oriented to the west. The minimum operative temperature is slightly lowered for the hot climate of Athens and for the west façade in La Rochelle. In La Rochelle, the use of green walls on the other orientations increases somewhat the minimum operative temperature. It can be explained as they do not reduce enough the heat gains;

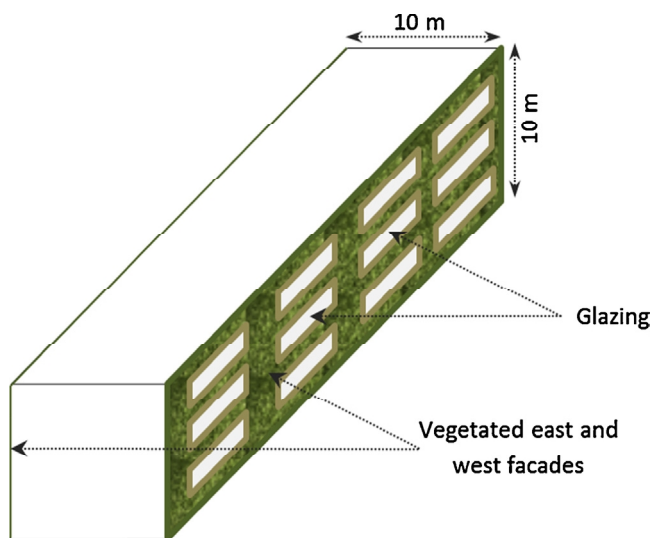


Fig. 5. Three story building studied for green walls incidence evaluation on energy demand.

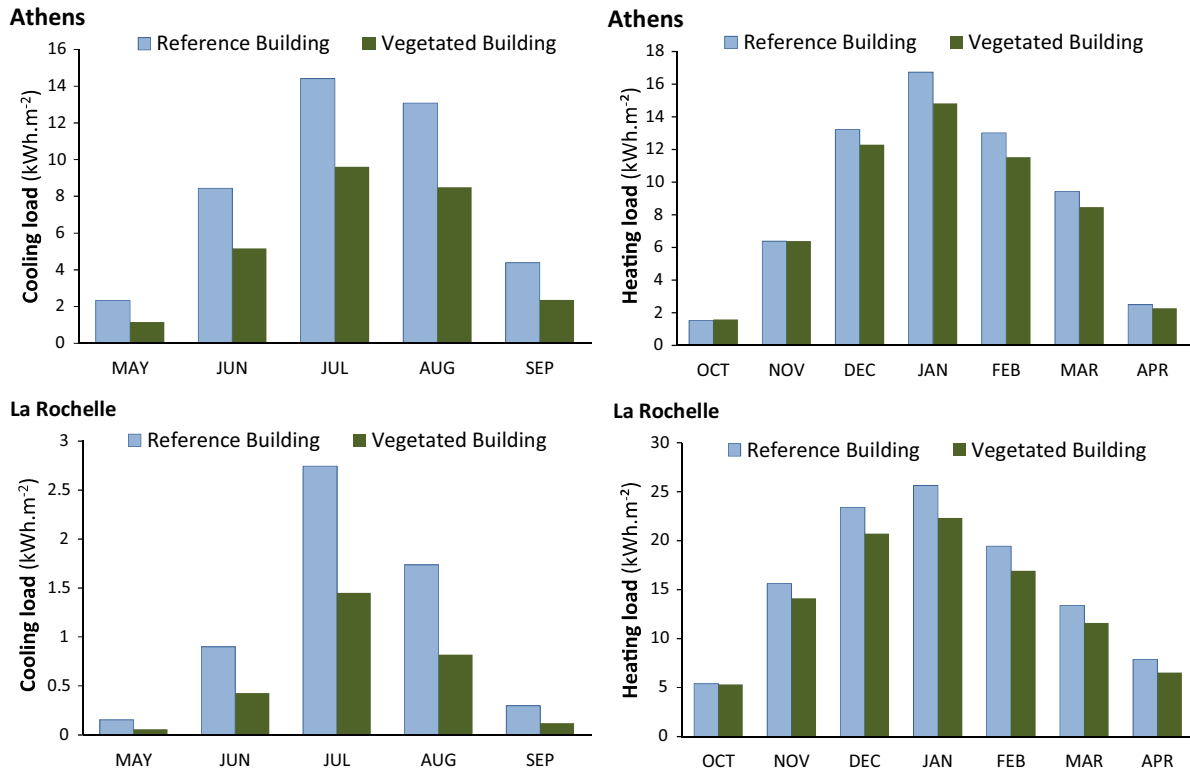


Fig. 6. Comparison between cooling and the heating thermal loads for the reference building and for the vegetated building in La Rochelle (France) and in Athens (Greece).

yet they reduce the heat losses through the green walls. At last, there is a reduction of the mean operative temperature by 1 to 2 °C depending on the climate.

4.2. Role of the substrate, the foliage shading and the evapotranspiration in the thermal behavior of green envelopes

It has been shown that green roofs and green walls decrease the heat flux on the vegetated parts of the building envelope. When the building envelope is vegetated the additional green envelope layers decrease the thermal transmittance of the building envelope.

Moreover, the shading effect of the foliage and the evapotranspiration process decrease significantly the surface temperature. The additional thermal resistance, the shading and the evapotranspiration effects operate together and their specific effects are coupled and difficult to separate. Indeed, the evapotranspiration affects the substrate's water content and consequently the thermophysical properties of the vegetated component. Then, the overall thermal transmittance of the wall is modified. Besides, the increase of the shading effects should involve higher coverage ratios or higher leaf area index *F*. However, higher foliage density involves more plant transpiration and less soil evaporation.

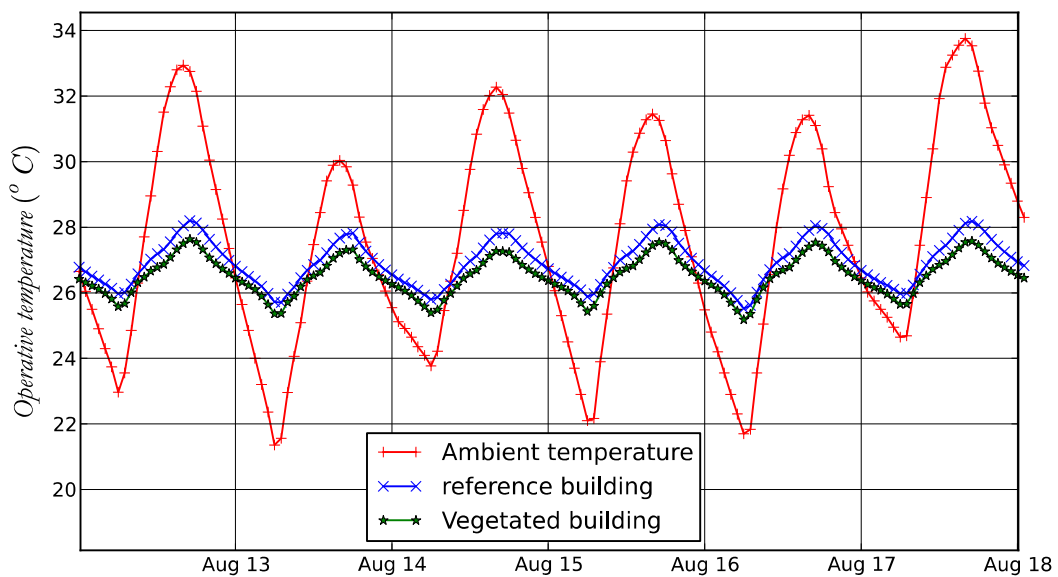


Fig. 7. Building mean indoor operative temperature variations for the reference building and for the vegetated building.

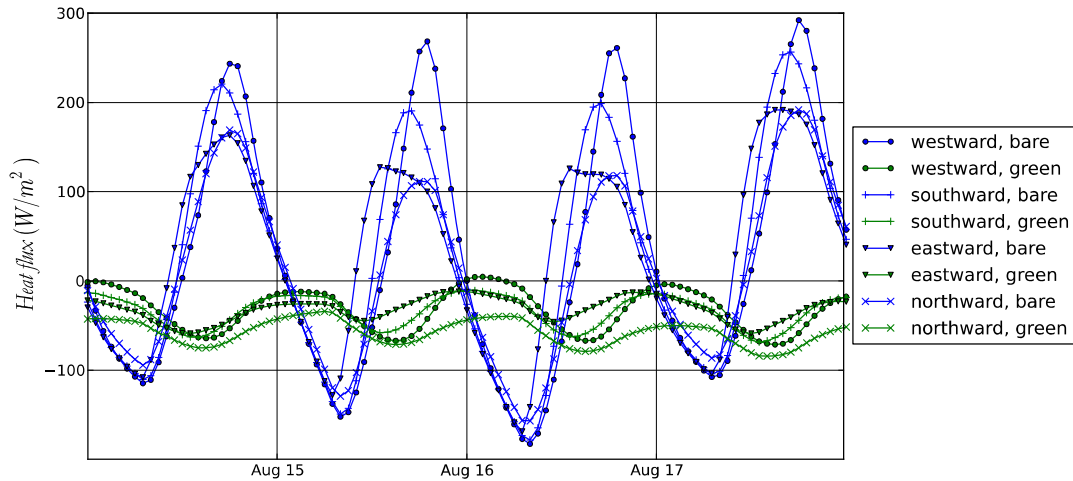


Fig. 8. Comparison of transmitted heat flux to the building located in La Rochelle through bare facades or vegetated facades according to various wall orientations.

So this will change the surfaces temperature and affect the sensible and the longwave heat fluxes. In this section we present some numerical parametric studies on the building located in La Rochelle. A green roof is simulated here with the purpose of determining the contribution of the thermal effects described below.

Four configurations of roof coating have been studied, see Fig. 9:

- The first configuration (noted 'REF') is the reference concrete roof with an albedo of 0.7.
- The second (noted 'SUB') involves only the additional thermal resistance of the substrate layer that is assumed to be half-saturated.
- The third case (noted 'LAI') includes the leaf canopy with corresponding radiative and sensible effects. In these two latter configurations, the evapotranspiration is disabled so as to separate their respective effects.
- The last case (noted 'ETP') contains all the green roof thermal effects including the evapotranspiration process.

The results of these four configurations are analyzed through both the temperature of the sealing membrane T_b [K] and the heat flux transferred inside φ_{in} [$W m^{-2}$], see Fig. 9. These variables are often used in green roofs experimental and

numerical studies [9,42] to analyze the impacts on building thermal performance.

The evolutions of the temperature T_b and the heat flux φ_{in} are compared Fig. 10 for the 4 configurations described above. Although the roof with the additional substrate layer has greater thermal resistance, it reaches up to 45 °C in summer days whereas the reference roof's temperature does not exceed 30 °C and remains closer to the ambient temperature T_a . This increased surface temperature (without evaporation effect) is due to the higher solar absorptance of the substrate and its heat capacity compared to the reference roof. Consequently, the heat gains through the roof increase and night heat losses decrease. This corresponds to the area under the $\varphi_{in, SUB}$ curve, see Fig. 10(b), which is higher for positive values and lower for negative values than the $\varphi_{in, ref}$ curve. The addition of the leaf canopy layer gives a significant reduction of the temperature variations peaks and amplitudes. Indeed, the temperature of the sealing membrane does not exceed 25 °C during the presented period and the amplitude of variations is only 3 °C. Simultaneously, the variations of the heat gains $\varphi_{in, lai}$ become less important and the heat gains due to solar radiation decreases, see Fig. 10(b), but the cooling effect remains almost the same since there is no evapotranspiration. Finally, by taking into account the transpiration and the evaporation terms, see Eqs. (3), (6) and (9) in the green roof energy balances, the temperature level decreases by

Table 1
Green wall impact on the operative temperature within the buildings located in La Rochelle and Athens cities depending on the facade orientation during July and August months.

Orientation	La Rochelle					
	T_{OP} max		T_{OP} mean		T_{OP} min	
	Bare wall	Green wall	Bare wall	Green wall	Bare wall	Green wall
West	25.05	21.87	20.53	19.49	17.05	17.21
South	24.68	21.99	20.46	19.37	16.83	17.01
East	24.81	21.96	20.48	19.47	16.90	17.40
North	24.08	20.71	19.95	18.46	16.48	16.59
Orientation	Athens					
	T_{OP} max		T_{OP} mean		T_{OP} min	
	Bare wall	Green wall	Bare wall	Green wall	Bare wall	Green wall
West	31.79	27.83	27.29	25.32	23.47	23.02
South	31.60	27.82	27.08	25.01	23.25	22.55
East	31.58	27.98	27.26	25.28	23.34	21.88
North	30.89	26.76	26.67	24.31	22.85	21.84

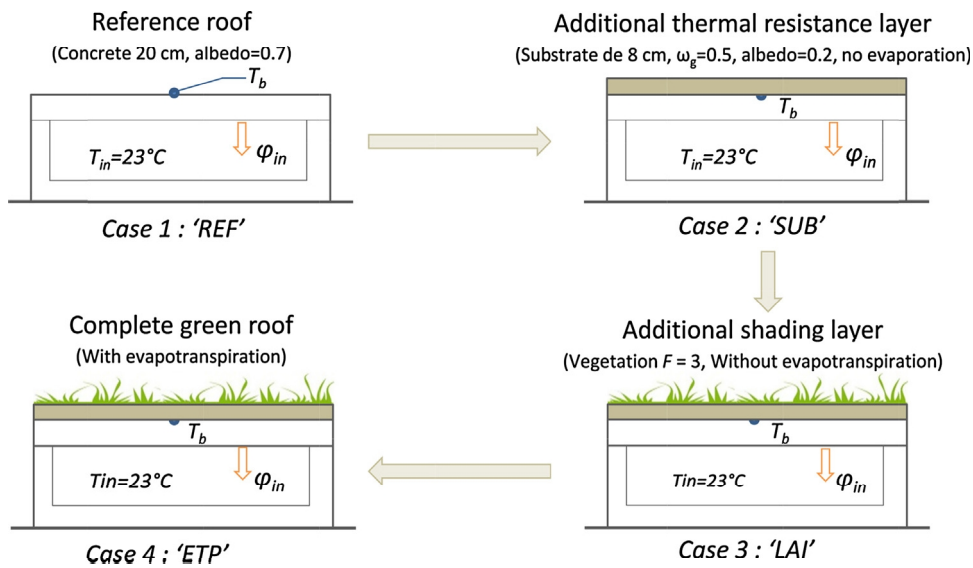


Fig. 9. Four case studies on the successively superimposed effects of the additional u -value, the shading and the evapotranspiration.

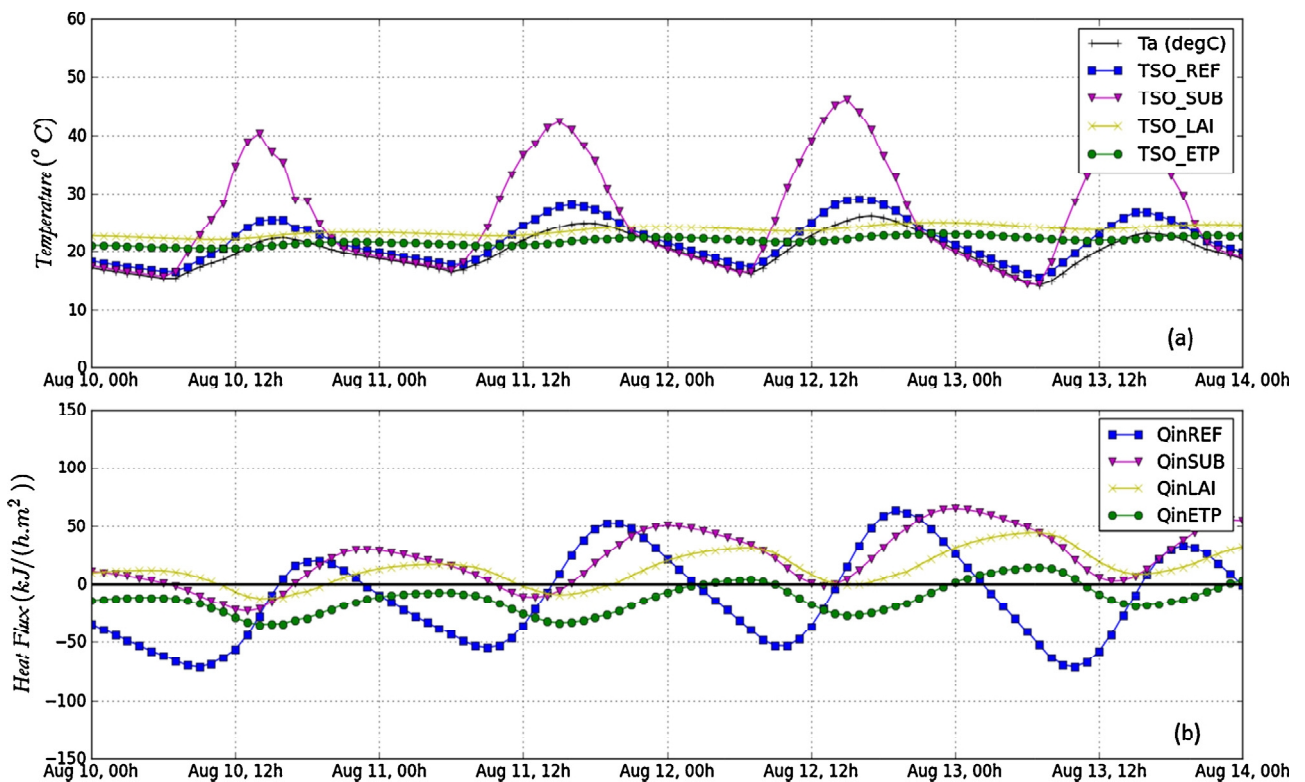


Fig. 10. (a) Comparison of the temperature evolution at the sealing membrane for the four studies configurations (b) Comparison of the heat flux transferred inside for the four studies configurations.

3°C without any change of temperature amplitude and heat gain variations. This temperature decrease provides more cooling effect as the area under the curve $\varphi_{in,ETP}$ is negative.

5. Conclusion

In this paper we have presented the integration into TRNSYS of a newly developed green envelope model. Coupled heat and mass transfer mechanisms are considered and validated in this model.

The coupled model with the building simulation software has been evaluated on an experimental green façade monitored on a building mockup. The numerical simulation results show a priori better agreement with experimental data than previous similar models. Actually, the average bias of the simulation through one summer month is only 0.22°C for the vegetated facade with a mean-root-square error of 1.42°C .

To assess the green walls impact on building energy performance, 2 case studies with and without vegetated east and west

facade have been studied for 2 different climates. It has been found that the green wall impact is more significant for hot climates since it reduces substantially the cooling loads and less the heating loads. However, unlike green roofs, green walls require an efficient management of water supply for irrigation. A parametric study dealing with the influence of the green wall orientation on its thermal effects has been also performed. It has been found that, for our reference temperate climate, the use of green walls on west facades leads to maximum cooling effects in summer time compared with the other orientations.

As a final point, a breakdown between the evapotranspiration effects, the shading effect and the additional thermal resistance of a green roof module is analyzed to figure out the different heat transfer mechanisms and their respective contribution to the commonly observed thermal effects. Thus, it has been shown that the additional substrate layer increases the inertia and the foliage shading reduces the diurnal peaks of temperature and that evapotranspiration reduces further the level of surfaces' temperature.

Given the large number of parameters specific to the different green wall, building and climate types that can be investigated, the work ahead is to perform a sensitivity analysis with the purpose of facilitating optimal use of green roofs and facades.

Acknowledgements

This work has been supported by the French Research National Agency on the reference ANR-09-Vill-0007-04 (project VegDUD) and the Poitou-Charentes Region project through the European Fund FEDER 2007-2013 no. 33586-2011 "Development of a platform for heat and moisture characterization of green roof components". We thank the landscape architect Brice Rodriguez (*Atelier du vegetal*) for his collaboration through the green wall system implementation.

References

- [1] R.A. Francis, J. Lorimer, Urban reconciliation ecology: the potential of living roofs and walls, *Journal of Environmental Management* 92 (2011) 1429–1437, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.012>.
- [2] H.F. Castleton, V. Stovin, S.B.M. Beck, J.B. Davison, Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit, *Energy and Buildings* 42 (2010) 1582–1591, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.004>.
- [3] S.J. Wilkinson, R. Reed, Green roof retrofit potential in the central business district, *Property Management* 27 (2009) 284–301, <http://dx.doi.org/10.1108/02637470910998456>.
- [4] O. Saadatian, K. Sopian, E. Salleh, C.H. Lim, S. Riffat, E. Saadatian, et al., A review of energy aspects of green roofs, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23 (2013) 155–168, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.022>.
- [5] R.M. Pulselli, F.M. Pulselli, U. Mazzali, F. Peron, S. Bastianoni, Emergy based evaluation of environmental performances of Living Wall and Grass Wall systems, *Energy and Buildings* 73 (2014) 200–211, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.034>.
- [6] A. Synnefa, A. Dandou, M. Santamouris, M. Tombrou, N. Soualakellis, On the use of cool materials as a heat island mitigation strategy, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47 (2008) 2846–2856, <http://dx.doi.org/10.1175/2008JAMC1830.1>.
- [7] R. Djedjig, E. Bozonnet, R. Belarbi, Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons, *International Journal of Low Carbon Technologies* (2013), <http://dx.doi.org/10.1093/ijlct/ctt019>.
- [8] M. Zinzi, S. Agnoli, Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region, *Energy and Buildings* 55 (2012) 66–76, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.024>.
- [9] A. Teemusk, U. Mander, Green roof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: a case study from Estonia, *Building and Environment* 44 (2009) 643–650, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.011>.
- [10] N.H. Wong, Y. Chen, C.L. Ong, A. Sia, Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment, *Building and Environment* 38 (2003) 261–270, [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00066-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00066-5).
- [11] H. Takebayashi, M. Moriyama, Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island, *Building and Environment* 42 (2007) 2971–2979, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.017>.
- [12] C.Y. Cheng, K.K.S. Cheung, L.M. Chu, Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls, *Building and Environment* 45 (2010) 1779–1787, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.005>.
- [13] E.A. Eumorfopoulou, K.J. Kontoleon, Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes, *Building and Environment* 44 (2009) 1024–1038, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.004>.
- [14] N.H. Wong, D.K.W. Cheong, H. Yan, J. Soh, C.L. Ong, A. Sia, The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore, *Energy and Buildings* 35 (2003) 353–364, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00108-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00108-1).
- [15] A. Niachou, K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, G. Mihalakakou, Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance, *Energy and Buildings* 33 (2001) 719–729, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00062-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00062-7).
- [16] Y.-J. Lin, H.-T. Lin, Thermal performance of different planting substrates and irrigation frequencies in extensive tropical rooftop greeneries, *Building and Environment* 46 (2011) 345–355, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.027>.
- [17] S. Onmura, M. Matsumoto, S. Hokoi, Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens, *Energy and Buildings* 33 (2001) 653–666, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00134-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00134-1).
- [18] Q. Chen, B. Li, X. Liu, An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate, *Energy and Buildings* 61 (2013) 298–307, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.030>.
- [19] H. Feng, K. Hewage, Energy saving performance of green vegetation on LEED certified buildings, *Energy and Buildings* 75 (2014) 281–289, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.039>.
- [20] P. La Roche, U. Berardi, Comfort and energy savings with active green roofs, *Energy and Buildings* 82 (2014) 492–504, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.055>.
- [21] M. Santamouris, C. Pavlou, P. Doukas, G. Mihalakakou, A. Synnefa, A. Hatzibiros, et al., Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece, *Energy* 32 (2007) 1781–1788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2006.11.011>.
- [22] K.J. Kontoleon, E.A. Eumorfopoulou, The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone, *Building and Environment* 45 (2010) 1287–1303, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.11.013>.
- [23] R. Djedjig, R. Belarbi, E. Bozonnet, Experimental study of a Green Wall System effects in urban canyon scene, in: CLIMA 2013–11th REHVA World Congress and the 8th international conference on indoor air, Prague, Czech Republic, 2013.
- [24] E.P. Del Barrio, Analysis of the green roofs cooling potential in buildings, *Energy and Buildings* 27 (1998) 179–193, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00029-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00029-7).
- [25] D.J. Sailor, A green roof model for building energy simulation programs, *Energy and Buildings* 40 (2008) 1466–1478, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.001>.
- [26] E. Alexandri, P. Jones, Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: comparison with experimental results, *Building and Environment* 42 (2007) 2835–2849, doi: 16/j.buildenv.2006.07.004.
- [27] P.C. Tabares-Velasco, J. Srebric, A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions, *Building and Environment*. (n.d.). doi:10.1016/j.buildenv.2011.07.019.
- [28] R. Djedjig, S.-E. Ouldoukhitine, R. Belarbi, E. Bozonnet, Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 39 (2012) 752–761, <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.03.024>.
- [29] C.Y. Jim, H. He, Estimating heat flux transmission of vertical greenery ecosystem, *Ecological Engineering* 37 (2011) 1112–1122, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.005>.
- [30] W.J. Stec, A.H.C. van Paassen, A. Maziarz, Modeling the double skin façade with plants, *Energy and Buildings* 37 (2005) 419–427.
- [31] N. Wong, A.Y.K. Tan, P.Y. Tan, N.C. Wong, Energy simulation of vertical greenery systems, *Energy and Buildings* 41 (2009) 1401–1408, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.010>.
- [32] M. Scarpa, U. Mazzali, F. Peron, Modeling the energy performance of living walls: validation against field measurements in temperate climate, *Energy and Buildings* 79 (2014) 155–163, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.014>.
- [33] F. Olivieri, C. Di Perna, M. D'Orazio, L. Olivieri, J. Neila, Experimental measurements and numerical model for the summer performance assessment of extensive green roofs in a Mediterranean coastal climate, *Energy and Buildings* 63 (2013) 1–14, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.054>.
- [34] S.S. Moody, D.J. Sailor, Development and application of a building energy performance metric for green roof systems, *Energy and Buildings* 60 (2013) 262–269, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.002>.
- [35] S. Frankenstein, G. Koenig, FASST Vegetation Models, US Army Corps of Engineers® Engineer Research and Development Center, 2004, (<http://stinet.dtic.mil/oai/oai?&verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA428989>) (accessed December 22, 2010).
- [36] I. Jaffal, S.-E. Ouldoukhitine, R. Belarbi, A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance, *Renewable Energy* 43 (2012) 157–164, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.12.004>.

- [37] S.-E. Ouldboukhite, R. Belarbi, I. Jaffal, A. Trabelsi, Assessment of green roof thermal behavior: a coupled heat and mass transfer model, *Building and Environment* 46 (2011) 2624–2631, doi: [16/j.buildenv.2011.06.021](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.021).
- [38] S.-E. Ouldboukhite, R. Belarbi, R. Djedjig, Characterization of green roof components: measurements of thermal and hydrological properties, *Building and Environment* 56 (2012) 78–85, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.024>.
- [39] M. Doya, E. Bozonnet, F. Allard, Experimental measurement of cool facades' performance in a dense urban environment, *Energy and Buildings* 55 (2012) 42–50, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.001>.
- [40] J.A. O'Donnell, V.E. Romanovsky, J.W. Harden, A.D. McGuire, The effect of moisture content on the thermal conductivity of moss and organic soil horizons from black spruce ecosystems in Interior Alaska, *Soil Science* 174 (2009) 646–651, <http://dx.doi.org/10.1097/SS.0b013e3181c4a7f8>.
- [41] R. Perez, R. Stewart, C. Arbogast, R. Seals, J. Scott, An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces: description, performance validation, site dependency evaluation, *Solar Energy* 36 (1986) 481–497, [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(86\)90013-7](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(86)90013-7).
- [42] K. Liu, J. Minor, Performance Evaluation of an Extensive Green Roof, *Presentation at Green Rooftops for Sustainable Communities*, Washington, DC, 2005.

Cool roof and ventilation efficiency as passive cooling strategies for commercial low-rise buildings – ground thermal inertia impact

Remon Lapisa, Emmanuel Bozonnet*, Marc Olivier Abadie and Patrick Salagnac

Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE FRE CNRS 3474), University of La Rochelle, LaSIE, Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle, France

Commercial low-rise buildings are often characterized by weak energy performances, and heat transfers through roof and ground are prevalent. The roof design and its opening system is a key factor of the thermal performance. Skylights and radiative properties of roof coating have a direct impact on solar gains, thermal losses and natural ventilation potential. The overall performance depends on the combination of these design parameters (solar reflectance and opening size), on the weather conditions and on the inertia given by the slab on the ground. The roof design performance depends on the ground which determines the dynamic behavior of these buildings. A generic case study is modeled and an extensive parametric study (about 840 annual simulations) is performed to point out these key parameters' impacts on energy demand and comfort. The combination of efficient roof techniques (skylights and cool roof) along with a high thermal inertia of the building can be an adequate passive cooling solution in summer, with a 99.8% drop in degree-hours above the discomfort temperature in summer. Nevertheless, we show that these passive strategies could not be totally efficient without taking care of the ground thermal inertia which account up to 58.6%.

Keywords: commercial building; thermal inertia; ventilation; cool roof; thermal building simulation

1. Introduction

With a growth of 1% per year, the world population estimated at 8.2 billion in 2030 will raise energy demand up to 87% (2006–2030) especially for non-Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) countries (IAE, 2008). The main part of energy use is dedicated to supply the building energy needs in urban areas. In France, 43.87% of the energy consumption in 2010 (Chiffres clés de l'énergie édition, 2012) is allocated for the building sector (71 Mtoe). A total of 20.9% of this energy is required by the tertiary and commercial sector (Rabai, 2012). The part dedicated to the tertiary sector has continuously increased, and is 15% higher than in 2001.

The present study aims at defining design key factors to improve the energy performance of commercial low-rise buildings by seeking to reduce the heating energy demand while providing thermal comfort in summer without a cooling system. The combination of cool roof to limit the solar heat gains through the roof and ventilation to reject the heat stored by the building is investigated here as passive cooling techniques to meet thermal comfort requirements in summer.

The main principle of cool roof is to reduce radiative heat gain by modifying its solar reflectance and thermal emittance. With this technique, roofs coated by high solar reflectance material

*Corresponding author. Email: ebozonne@univ-lr.fr

will reflect more solar radiation, while the absorbed heat is emitted to the sky due to high thermal emittance. There is a direct effect on the building cooling load reductions which can vary between 10% and 40% and, as underlined by Santamouris ([in press](#)), many studies have demonstrated the effect of cool roofs on urban heat island mitigation, especially for an albedo above 0.7. At the European level, as well as the Cool Roof Rating Council (CRRC) in the USA, a European Cool Roof Council (ECRC) was set up after several experiments that confirmed the interest of cool roof technology (Synnefa & Santamouris, 2012). The experimental and numerical results highlighted that cool roof technology reduces indoor temperature by 1.2–2°C, saves 10–40% of air conditioning energy and decreases heat island effect by 1–2°C depending on building characteristics and climatic conditions. Bozonnet, Doya, and Allard (2011) conducted a study for moderate climate in France which shows a result of 10°C roof surface mean temperature decrease, in summertime, due to cool roof technology. For Mediterranean climate regions, the cool roof application was found to be the most effective solution compared with increased insulation and other different cooling technologies such as windows improvement for a specific building study (Kolokotsa, Diakaki, Papantoniou, & Vlissidis, 2012; Romeo & Zinzi, 2013). In commercial buildings, using these techniques, the roof peak temperatures can decrease up to 42°C in summer (Akbari, Levinson, & Rainer, 2005; Xu, Sathaye, Akbari, Garg, & Tetali, 2012). In these studies, cooling energy demand was reduced up to 20 Wh/m²/day (52% of total energy requirement) and CO₂ emission decreased from 11 to 12 kg CO₂/m² of flat roof area.

Depending on the ambient temperature, natural and night ventilation can help to mitigate building overheating. A study conducted by Wang, Yi, and Gao (2009) indicated that night ventilation is an effective passive cooling technique, especially in the northern hemisphere. Night ventilation can reduce the average indoor temperature from 1.5°C to 4°C (Blondeau, Spérandio, & Allard, 1997; Geros, Santamouris, Tsangrasoulis, & Guarracino, 1999; Kubota, Chyee, & Ahmad, 2009; Shaviv, Yezioro, & Capeluto, 2001) according to the location, envelopes and building operation.

As for the roof, the large surface of the slab on the ground and the soil characteristics are key parameters in the energy balance and for the overall performance including the roof techniques for commercial low-rise buildings. Most studies focus on typical houses, but even in those studies the ground floor effect is not negligible; thus a study conducted by Labs, Shen, Huang, Parker, and Carmody (1988) on heat loss through a non-insulated floor showed that 10% of the energy losses are attributed to the floor for poorly insulated and up to 30% to 50% for well-insulated walls/roof buildings. Moreover, the ground is a key factor considering its thermal inertia potential for low-rise buildings which are often built with low inertia materials (mainly metallic construction). The study of a test cell (small building) by Aste, Angelotti, and Buzzetti (2009) showed a 10% difference in the heating loads between high and low thermal inertia envelopes. So the thermal performance will depend both on the thermal inertia (including shelving) and on the passive cooling techniques. Particular attention has to be paid to their combination as it has to be handled properly to reduce building energy consumption.

In this paper, we will demonstrate the effect of cooling strategies (cool roof and natural ventilation) on a typical case study of low-rise commercial buildings. The building energy demand and adaptive thermal comfort model is detailed in the following parts and takes into account all the main parameters with coupled heat and airflow transfers. Parametric analyses are performed to highlight the single and combined impacts of the cool roof, natural ventilation and ground/shelving thermal inertia.

2. Case study description and passive cooling strategies

2.1. Description of the typical commercial building

The study is carried out on a cube-shaped one-floor commercial building located in Mediterranean climate (Marseille, France, [Figure 1](#)).

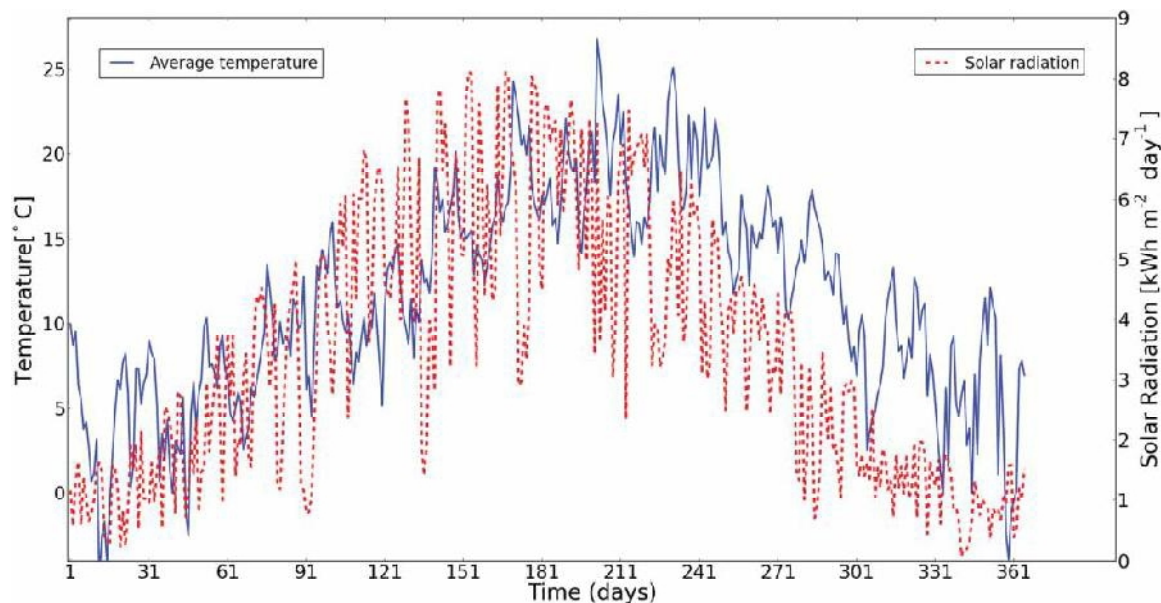


Figure 1. Climate of Marseille.

The building surface is a square of 36 m sides (Figure 2), its height is 6 m and its steel structure with a large flat roof surface is covered by 16 skylights, i.e. 2.4% (31.36 m^2) of the roof area.

The vertical walls (except the northern one) include 30 m^2 of windows. The vertical exterior walls are well insulated and have a total thickness of 30.5 cm (1.3 cm of gypsum, 14 cm of glass wool, 15 cm of rock wool and an outer steel cladding of 2 mm). The ground thermal inertia of the building is mainly due to the concrete slab (160 mm thick with no thermal insulation) which directly lies on sand. It is assumed that the commercial shelves occupy 10% of the building volume (787.9 m^3). It consists of cardboard (40%), liquids/oils (30%), metals (10%) and plastics (20%). A heating system is installed but no cooling system. To ensure fresh air renewal, a heat recovery ventilation (HRV) system provides 0.75 air changes per hour (ACH) during daytime. The occupancy period of this building is 07:00 am–10:00 pm every day except on Sunday.

2.2. Cooling strategies: cool roof and natural ventilation

A roof surface albedo of 0.3 is given for this reference building. For the parametric study, the cool roof strategy is studied through the modification of the roof coating albedo from 0.1 to 0.9. The high thermal emissivity (0.9) is considered constant.

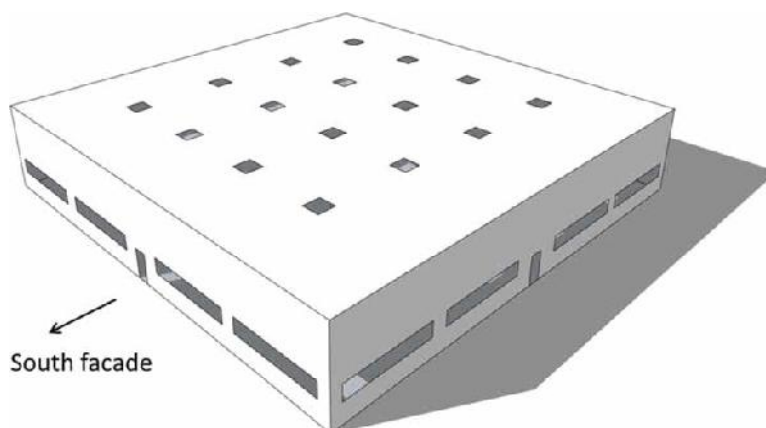


Figure 2. Geometry of the studied commercial building.

Natural ventilation is provided by opening some skylights and windows. This ventilation is carried out in summer during nights from 08:00 pm to 06:00 am only when the indoor air temperature is 2°C higher than the ambient temperature. Mechanical ventilation remains in operation during the summer and can be adjusted based on requirements.

3. Building models

The simulation of the commercial low-rise building has been performed using the coupling between the transient system simulation tool (TRNSYS) building model (Type 56) and the multizone airflow and contaminant transport analysis software (CONTAM) airflow model under the TRNSYS 17 simulation environment. As illustrated in Figure 3, the building is modeled as a unique zone (nodal approach) that interacts with the following main elements: the *Airflow Model* used to calculate the airflow rates through the openings and the envelope, the *Roof Thermal Model* to account for the cool roof radiative properties and the *Ground Thermal Model* to evaluate the heat transfer through the ground.

Two modeling levels have been used to calculate the heat transfer through the ground: the so-called one-dimensional model (1D) and the adiabatic one. Note that those models account for heat transfer only; no moisture transfer is considered here. These two models represent, respectively, a non-insulated ground slab and a high insulated ground slab.

The 1D model, illustrated in Figure 4, splits the ground below the concrete slab into two layers of the same soil. The first layer, modeled as a massive layer, accounts for thermal inertia and is defined as a wall in the TRNSYS building model. The second layer is modeled as a resistance layer, with no thermal inertia, and is referred to as the massless layer. As shown by Adjali, Davies, Rees, and Littler (2000), the temperature of the ground at a depth of 10 m can be considered independent of the building behavior. Consequently, the total thickness above the building has been set up to 10 m. The temperature at the lower boundary (T_{ground}) is calculated by the following relationship (Eckert & Drake, 1987; Kusuda & Bean, 1984):

$$T_{ground}(z, t) = T_m - T_a e^{-z \times \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \times \cos\left(\frac{2\pi}{365} \left(t - t_p - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}}\right)\right), \quad (1)$$

where T_m (°C) is the mean annual ground temperature; T_a (°C) the annual temperature amplitude at the ground surface ($z = 0$ m); z (m) the subsurface depth of soil; t the time of the

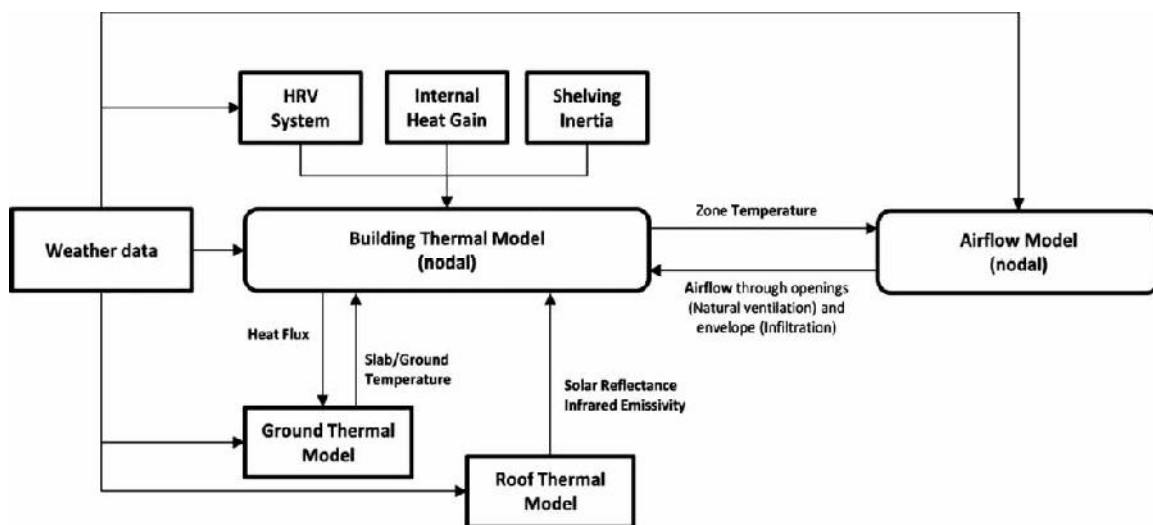


Figure 3. Schematic representation of the building energy simulation coupling process.

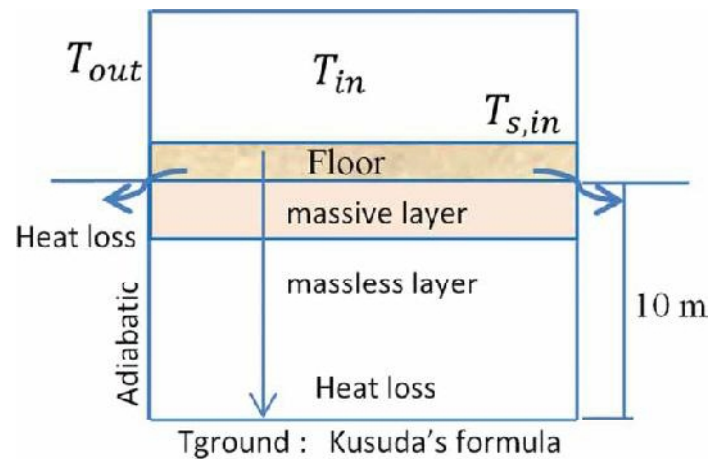


Figure 4. 1D model of ground heat transfer.

year (in days); t_p the phase constant of the day of minimum surface temperature and α (m^2/day) the thermal diffusivity of the soil.

A parametric study has been performed (Lapisia, Bozonnet, Abadie, Salagnac, & Perrin, 2013) to evaluate the smallest thickness of the massive layer needed to ensure a good representation of the ground thermal inertia. The proposed model with a thickness of 30 cm of massive layer gives proper results regarding the heat transfer through the ground and compared with a reference ground model, three-dimensional and more precise but with a greater computing time (McDowell, Thornton, & Duffy, 2009; Zhou, Rees, & Thomas, 2002).

A simplified model (adiabatic) is also used in order to characterize the effect of the ground thermal inertia on the building energy demand and comfort. For this model, there is no heat transfer below the concrete slab so that no ground thermal inertia is taken into account.

For both models, the cold bridges between the slab and outside are calculated according to the standards (EN ISO 13370, 2007)

4. Passive cooling potential of cool roof and natural ventilation

The parametric study is based on the previously defined reference building: low roof solar reflectance (0.3), operation of mechanical ventilation during the occupancy period only and closed skylights (no natural ventilation). In the following parts, the criteria for indoor overheating (based on operative temperature) during summer and occupancy hours are:

- The degree-hours (DH) above the adaptive summer comfort temperature defined by the standard EN-ISO-15251. DH ($^{\circ}\text{C h}$) drops are proportional to cooling energy gains required for a mechanically cooled building.
- The discomfort ratio based on the occupancy hour's ratio above summer comfort temperature (EN-ISO-15251).

4.1. Impact of cool roof

The temperature evolutions are compared (Figure 5), for three days in summer (1–3 August) using both ground heat transfer models and two roof solar reflectance values (0.3 for standard roof and 0.9 for cool roof): ambient temperature (T_{ambient}), roof surface temperature ($T_{\text{s-roof}}$) and indoor operative temperature (T_{op}).

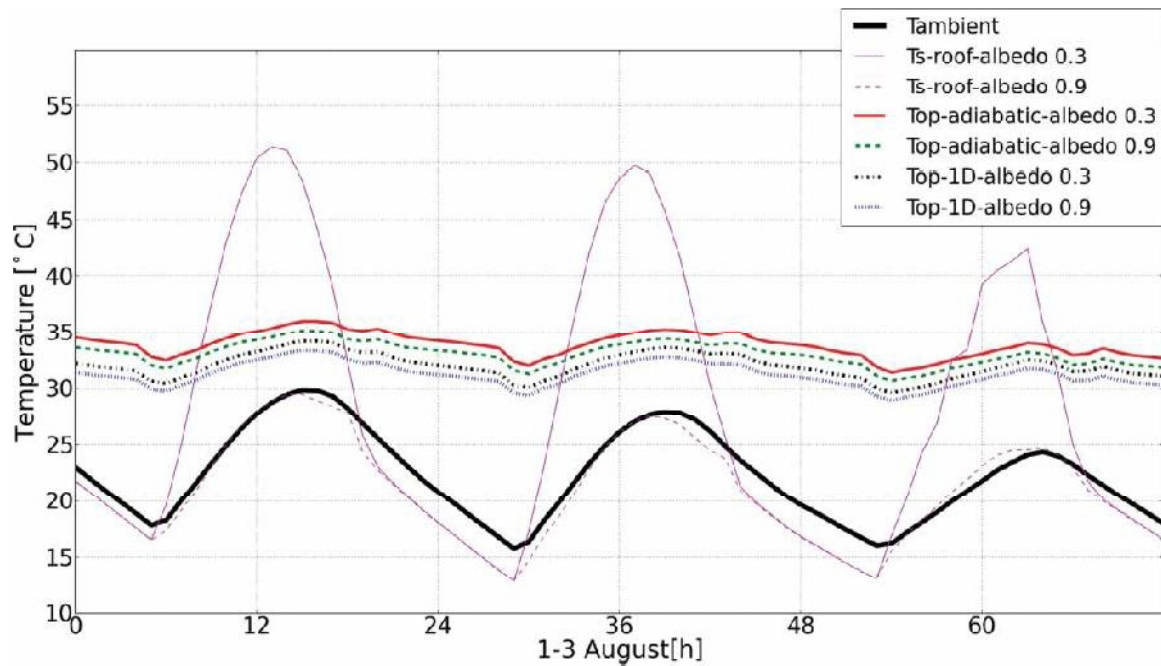


Figure 5. Ambient, operative and roof surface temperatures in summer.

The temperature peaks occur in the 12:00 am–03:00 pm interval. In the presence of a cool roof coating, the solar absorption decreases and the roof external surface temperature drastically drops by 22°C whereas the operative temperature is reduced by only 1°C. This comes mainly from the highly insulated roof that lessens the effect of very high temperatures at the external side. However, the ground thermal inertia impact, assessed from the differences between the 1D and adiabatic models, is more significant on the operative temperature with a difference of about 2.5°C (Figure 5) for all albedo values. This inertia effect and the heat transfers to/from the ground are facilitated by the lack of insulation below the slab which mitigates the indoor air overheating.

Figure 6 presents the cool roof effects evaluated with the previously defined summer comfort criteria (DH and discomfort ratio) for the building with or without ground thermal inertia (two ground models) and with or without shelving.

DH reductions of 46.8% for the ground-coupled building and 35.6% for the adiabatic one are observed for an albedo variation from 0.1 to 0.9 (Figure 6(a)). The ground thermal inertia participates in reducing the DH from 3060°C h to 1265°C h (58.6%) for the reference building (albedo of 0.3) and from 1970°C h to 673°C h (65.8%) for the building with the cool roof. On the other hand, shelving also absorbs a significant portion of the heat from the indoor air and reduces the DH value by about 24.2% compared with an empty building. For this type of well-insulated building, the ground inertia impact is really important, i.e. the ground insulation can reverse the benefits from an increased albedo.

Figure 6(b) presents the discomfort ratio versus albedo. A trend similar to the DH results is observed here with the exception of the shelving effect which does not have a significant impact on the discomfort ratio. This is due to the too small shelving thermal inertia; this result highlights the importance of the design and the minimal thermal inertia needed for summer thermal comfort.

The cool roof decreases the solar heat gains in all seasons and so the operative temperature in summertime for a passive cooling solution. For a mechanically cooled building, this would decrease the cooling energy demand. On the contrary, this technique can penalize the winter

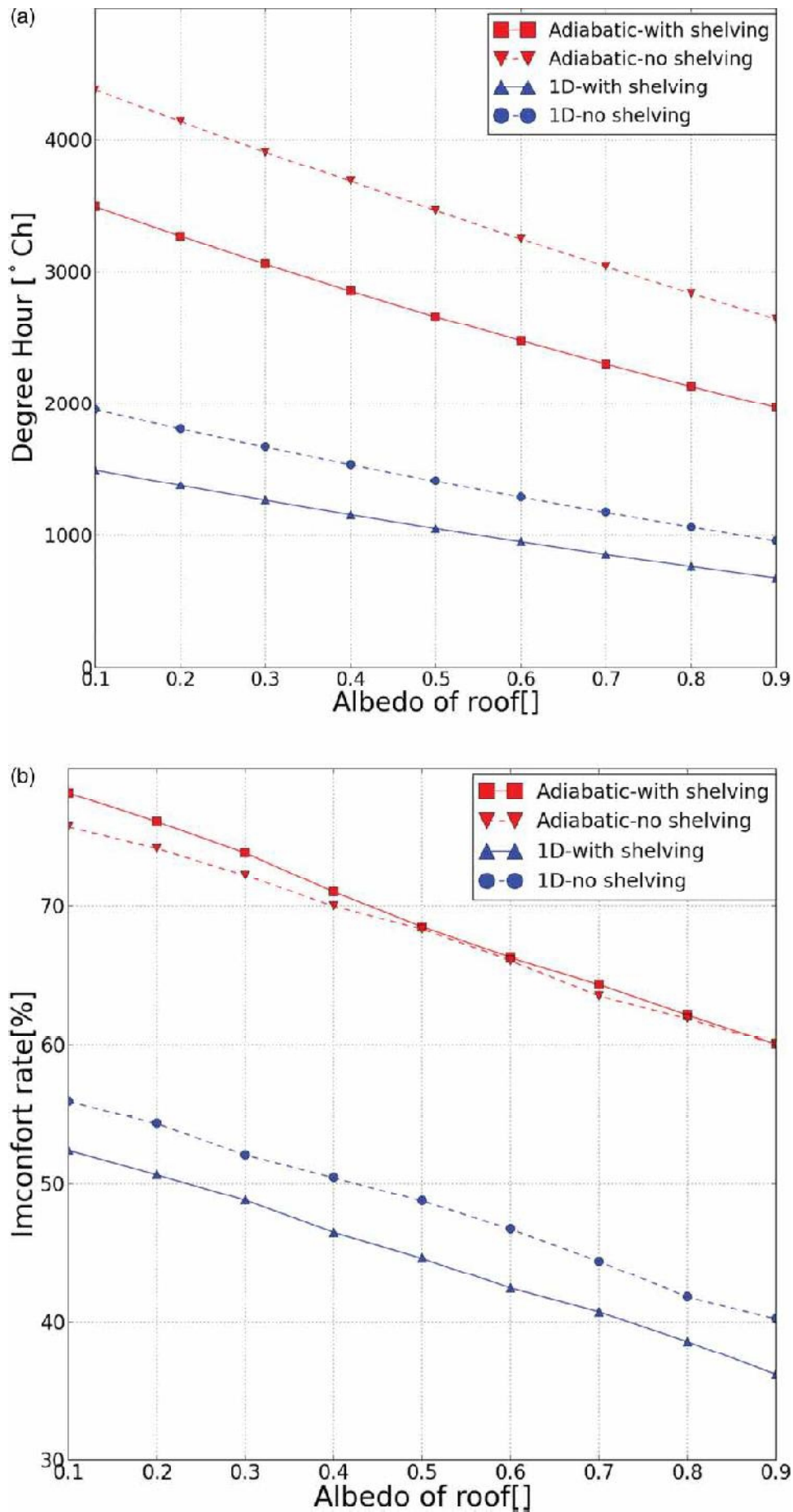


Figure 6. Effect of the roof albedo on (a) DH (°C h) and (b) discomfort ratio.

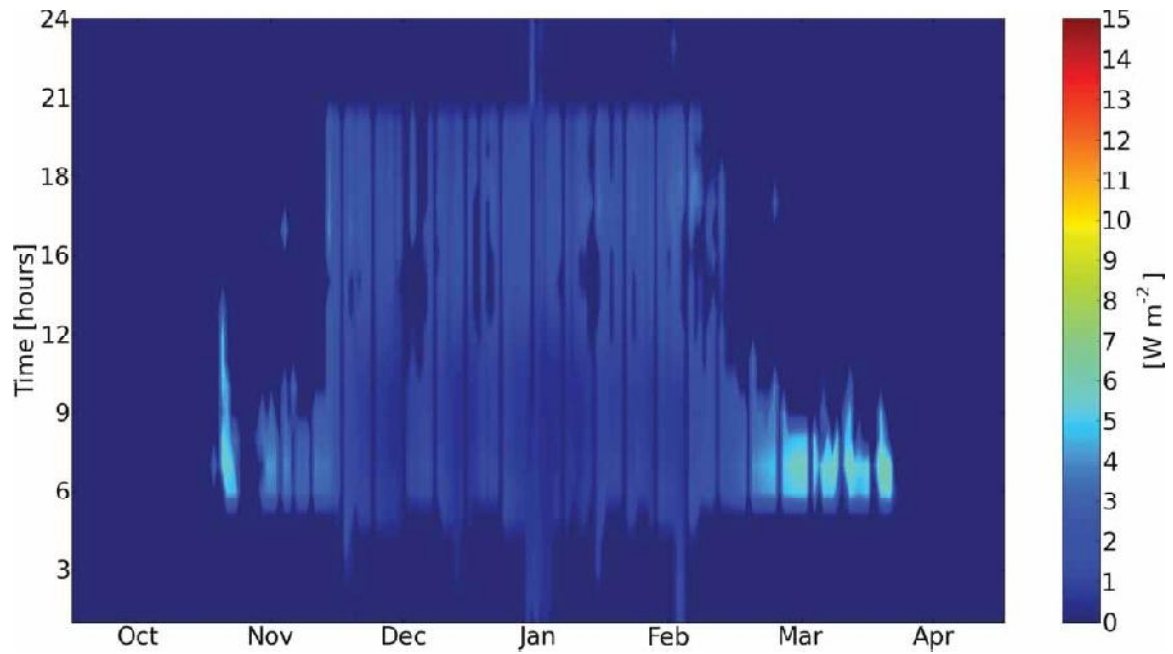


Figure 7. Heating load penalty due to the cool roof technique (W/m^2).

energy performance by decreasing the solar heat gains from the roof. Although the study focuses on passive cooling performances, in Figures 7 and 8 the overall effect on energy demand for winter and summer is analyzed in order to compare both heating demand penalty and cooling benefits.

Figure 7 presents the additional heating load needed during computation for each hour of the days, and especially for the occupancy period (06:00 am–10:00 pm). Note that this representation that gives a global view of the variability according to the hour of the day and for the whole year has been previously proposed by Foldbjerg and Asmussen (2013).

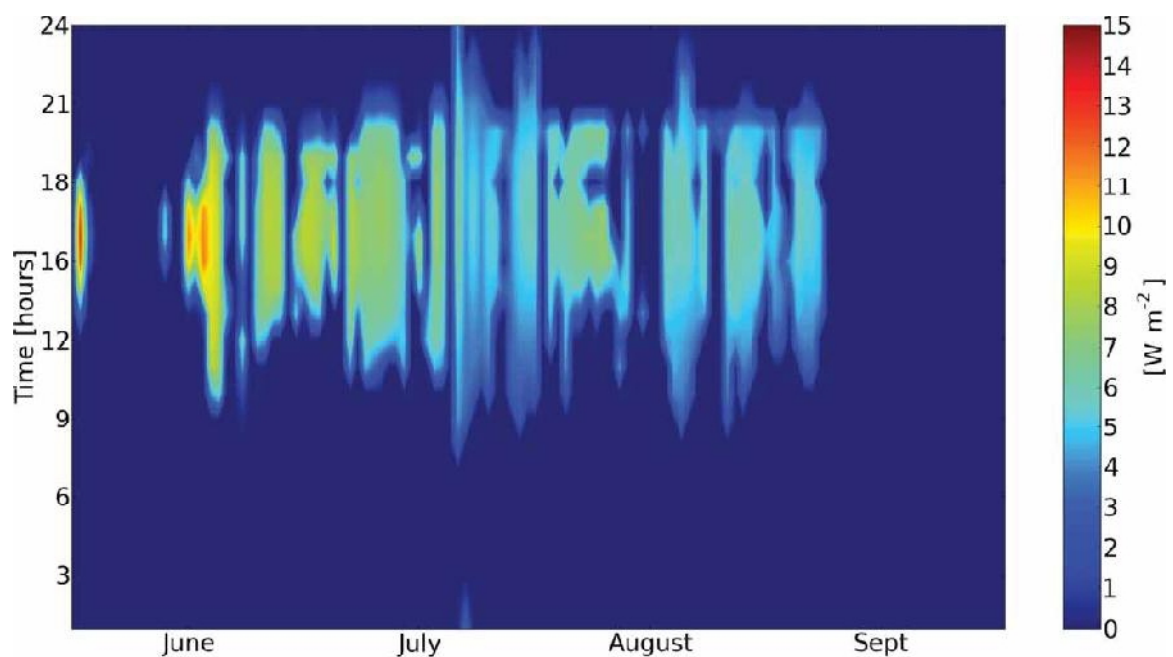


Figure 8. Cooling load saving due to cool roof technique ($\text{Wh/m}^2 \text{ years}$).

Although the heating period starts at the beginning of October until 21 May for the present geographical region (43.3° latitude), the heating system is actually operating at the beginning of November. During the months of November and March, the required additional heating energy is higher than for the rest of the winter. During these periods, the sun is still high in the sky and the potential heat gain from solar irradiation is higher on a horizontal roof. The high reflectivity of the cool roof lessens this heat gain. Between December and February, the solar angle is small and the sky is not always clear so that the solar heat gains are lower for both the cool roof and the reference one. We can conclude that the penalty on heating demand due to the cool roof is noticeable during mid-season but very low during winter. Because of the thermal inertia of the building (including the ground slab), the period of additional energy supply spans after daytime even though there is no more solar radiation. This shifting time clearly depends on the characteristics of the building envelope, the shelving and the soil. The annual heating energy penalty due to the cool roof coating is only $2.39 \text{ kWh/m}^2 \text{ year}$ (11%).

The positive impact of the cool roof during summer is studied here as cooling load savings (Figure 8), considering an air-conditioning system.

The solar gain decreases and induces significant cooling energy savings during the 09:00 am–21:00 pm period, especially when solar irradiation is high (June to August). The annual cooling energy saving amounts to about $3.49 \text{ kWh/m}^2 \text{ year}$ (33.8%). A benefit of $1.1 \text{ kWh/m}^2 \text{ year}$ (3.4%) is obtained on annual energy balance, integrating energy savings and losses for both seasons. This balance of sensible energy needs does not take into account the efficiency differences of cooling and heating systems.

Heating and cooling needs vary according to the solar irradiation, especially during the summer period as outlined in Figure 9.

During winter (Figure 9(a)), the relative difference due to the cool roof is very low and the heating power variation with solar irradiation is not as noticeable as for the typical summer day (Figure 9(b)). The cooling demand increases in a similar way as the solar irradiation with a time shift of several hours due to the inertia which performs in a same way for both reference roof and cool roof.

4.2. Impact of ventilation

4.2.1. Impact of natural ventilation

Figure 10 shows the impact of opening the skylights on the natural ventilation flow rate and the DH above adaptive temperature. The flow rate increases almost linearly with the skylight opening area. Among the different calculations, the flow rate only slightly differs at the highest opening area showing that wind is the predominant parameter and not ambient to indoor temperature difference. The adiabatic case (red curves) with higher indoor temperatures (see previous section) presents the highest flow rate which demonstrates that the temperature gradient acts with the wind-driven ventilation in the present configuration.

As illustrated by the other two graphs (Figure 10(b) and (c)), using natural ventilation during night to decrease DH is very efficient even at very low airflow. DH values (for occupancy period) sharply decrease with an increase in skylight opening, dropping down to 79.2% for the maximal opening value. In this case, the shelving is also important as the night cooling participates in the indoor temperature reduction during daytime. Then, the ground and the shelving thermal inertias are important factors which have to be taken into account in the assessment of the efficiency of the natural ventilation as a passive cooling technique.

4.2.2. Impact of mechanical ventilation scenario

Two mechanical ventilation scenarios have been defined: ventilation during the occupation period (*occ*) and permanent (*occ + Nighttime*). Without natural ventilation, permanent mechanical

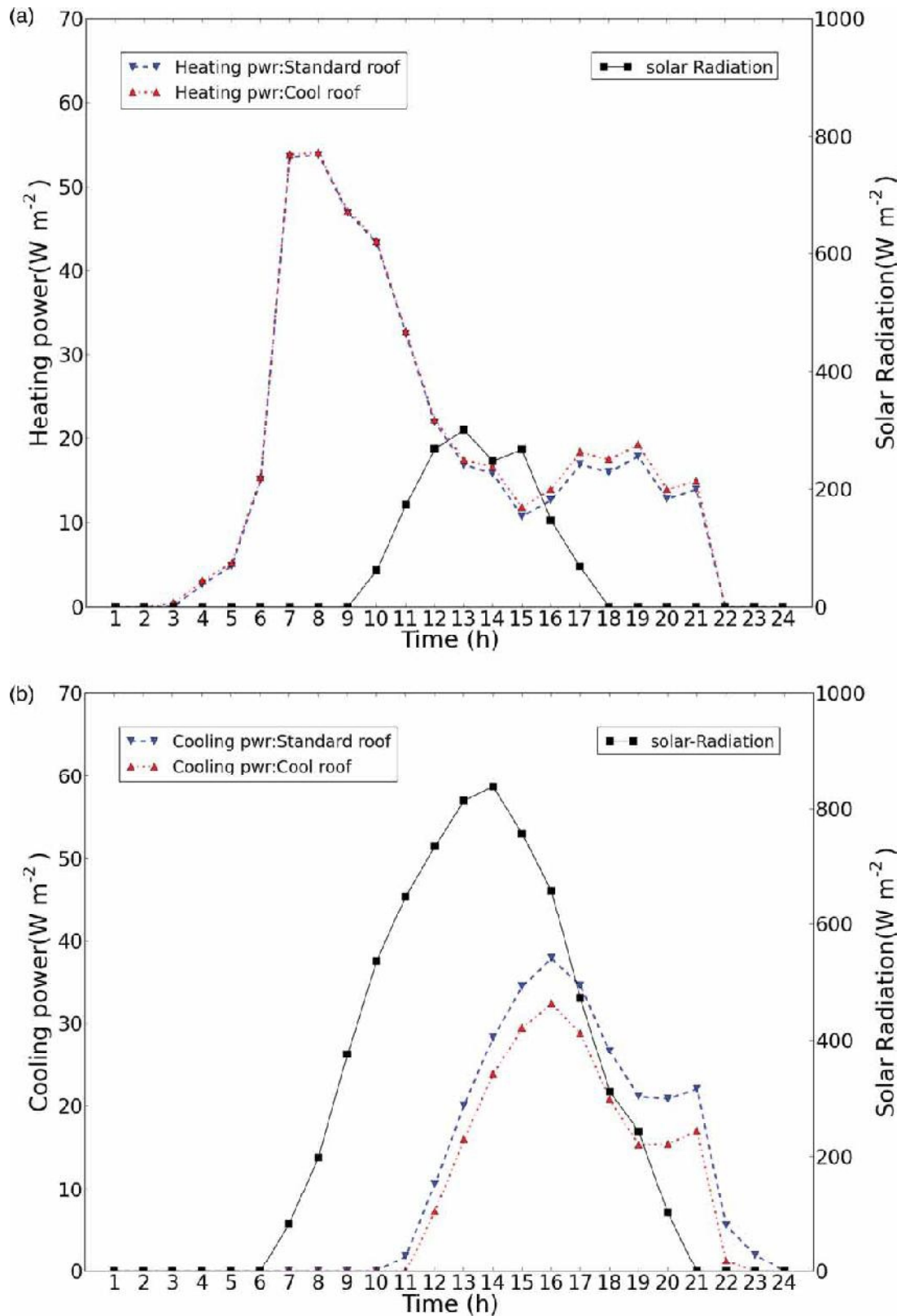


Figure 9. Heating and cooling loads and solar irradiation; (a) heating demand on 31 December and (b) cooling demand on 30 July.

ventilation (Figure 11) brings a reduction in DH from 1265°C h to 221°C h (6 times smaller). Mechanical ventilation during night is actually effective enough in reducing temperatures for the next day. Note that the mechanical ventilation rate (0.75 ACH) is on the same order of the

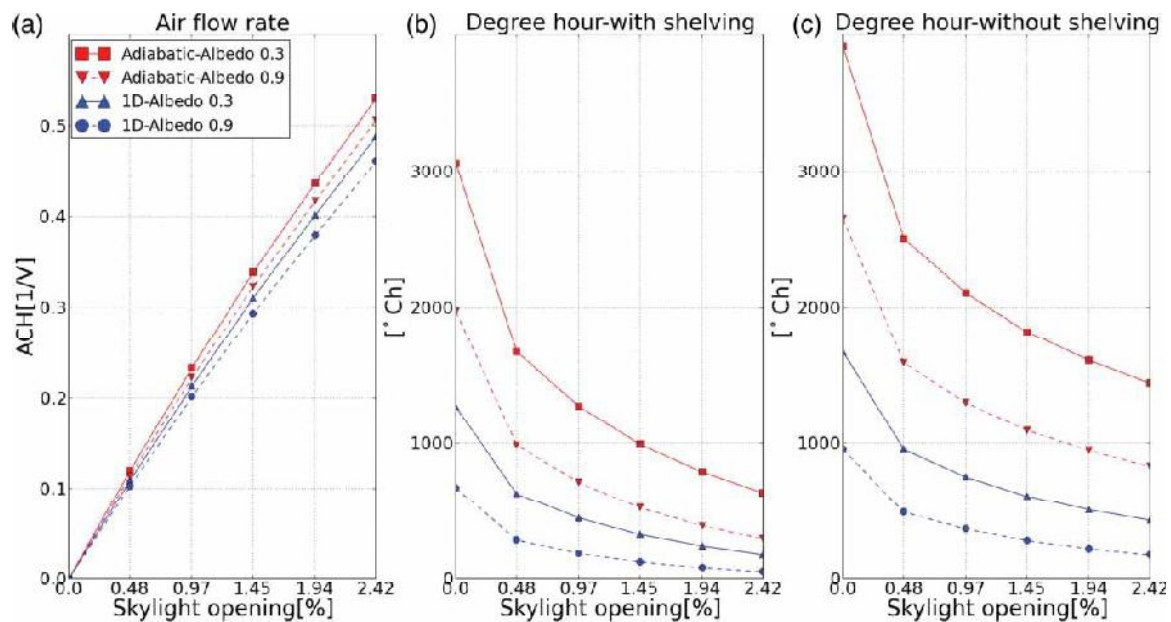


Figure 10. Skylight ratio effect on (a) natural ventilation rate (ACH), (b) DH with shelving and (c) without.

mean night-time natural ventilation with all the skylights opened (about 0.5 ACH). The combination of mechanical ventilation and natural ventilation during the night can avoid thermal discomfort during occupancy by reducing the DH by 97.6% as illustrated in Figure 11.

4.3. Passive cooling strategies

Following this study of passive cooling strategies alone (i.e. cool roof and natural ventilation), the present section aims at evaluating their combined effect along with the thermal inertia brought by the ground and the shelving. Here, the indoor overheating during summertime and occupancy hours is highlighted by the average of maximum daily temperatures and the DH (DH above adaptive comfort temperature following the EN-ISO-15251).

4.3.1. Cool roof and natural ventilation coupled effects

The potential of the coupling of both cool roof and natural ventilation is analyzed (Figure 12), varying both parameters of skylight opening and roof albedo. The two graphs have the same tendencies and both passive cooling strategies have a similar and significant effect.

From no skylights to 0.5% of skylight ratio of roof surface, the natural ventilation effect is the most efficient with almost 1°C gain in maximum temperature (Figure 12(a)) and around 1000°C h gains in DH (Figure 12(b)), whatever the albedo. The gains in cool roof decrease with an increase in skylight opening ratio, mainly considering the DH. Yet the relative gains are always important and these two figures can be helpful in building design phase to help define balanced requirements for roof albedo and skylight ratio.

4.3.2. Effectiveness comparison of all natural cooling strategies

In order to compare all previous cooling strategies, we analyzed (Figure 13) the absolute temperatures and the DH mitigation for cool roof (albedo 0.9), night natural ventilation and night mechanical ventilation (with ref. building characteristics). In this case study, considering the Mediterranean weather of Marseille, ventilation alone (natural or/and mechanical) provides more

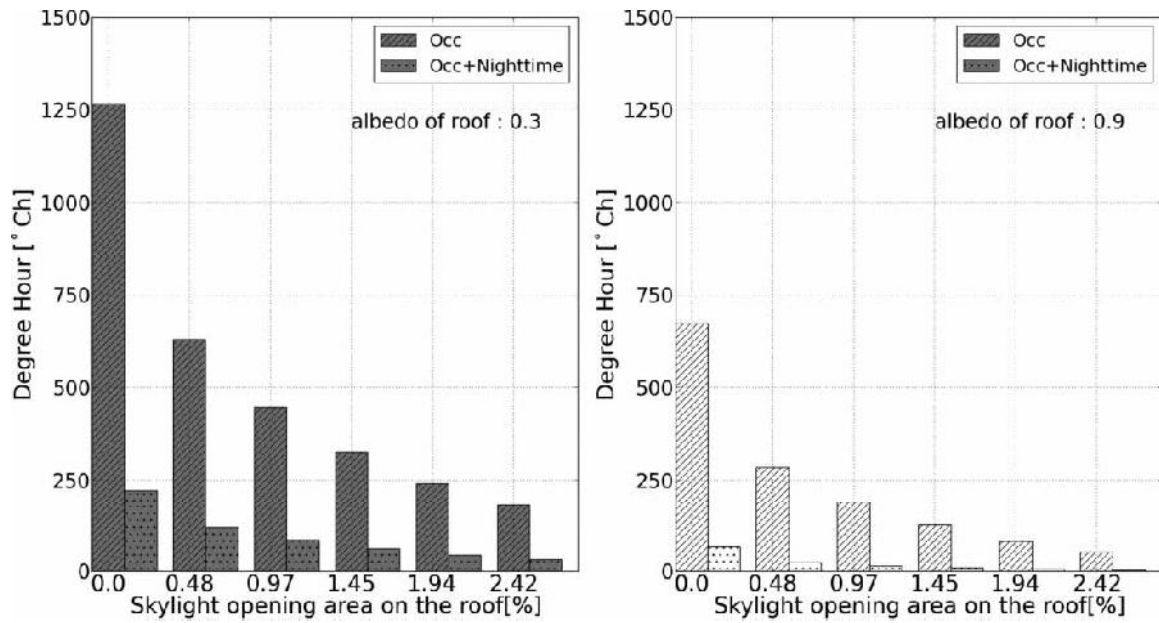


Figure 11. DH above adaptive temperature (DH) for mechanical and natural ventilation scenarios.

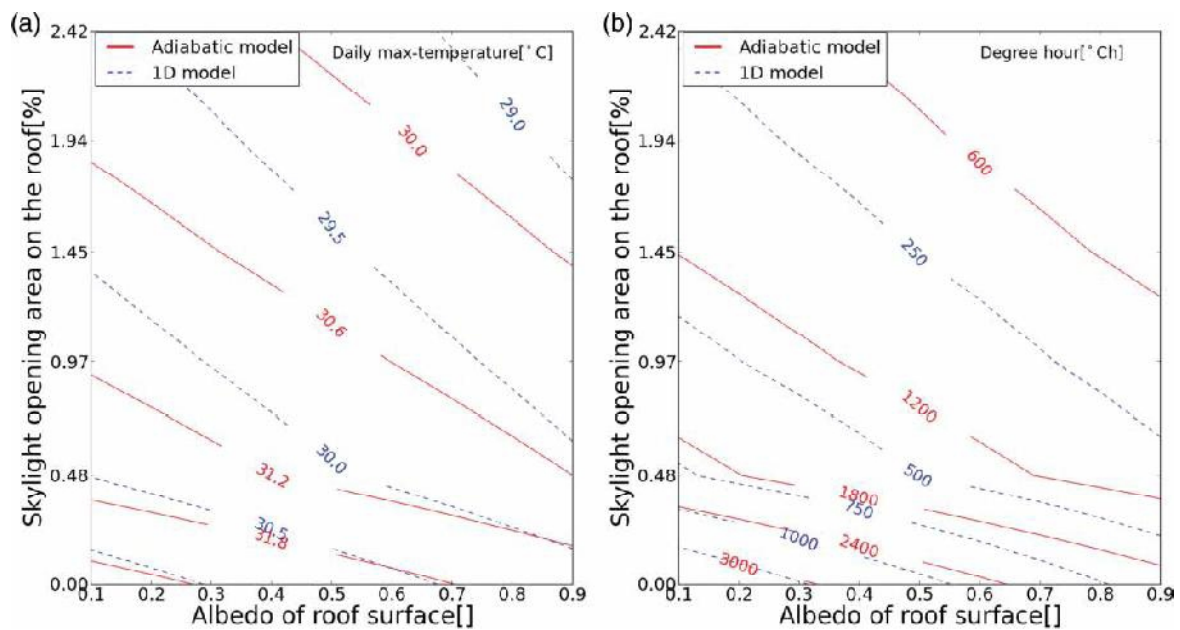


Figure 12. Skylight ratio of roof and roof albedo effects on both: (a) average of daily max operative temperature (°C) and (b) DH above comfort temperature (°C h).

gains in cooling effect when compared with cool roof alone. For the considered three days (Figure 13(a)), the operative temperature drops from around 1°C with cool roof and up to 3°C with night natural ventilation. With additional night-time mechanical ventilation, the operative temperature drops only slightly below the natural ventilation case. Here, ventilation effectiveness is highly dependent on the airflow rate and outside air temperature. The last cooling strategy by combining natural–mechanical ventilation and cool roof allows a temperature drop above 5°C (Figure 13(a)). The DH (°C h) of discomfort drops by 46.8% due to cool roofs, by 82.5% due to night mechanical ventilation, by 86% due to night natural ventilation and by 99.8% due to the combination of the passive solutions (Figure 13(b)). For well-insulated roof buildings, the most effective passive

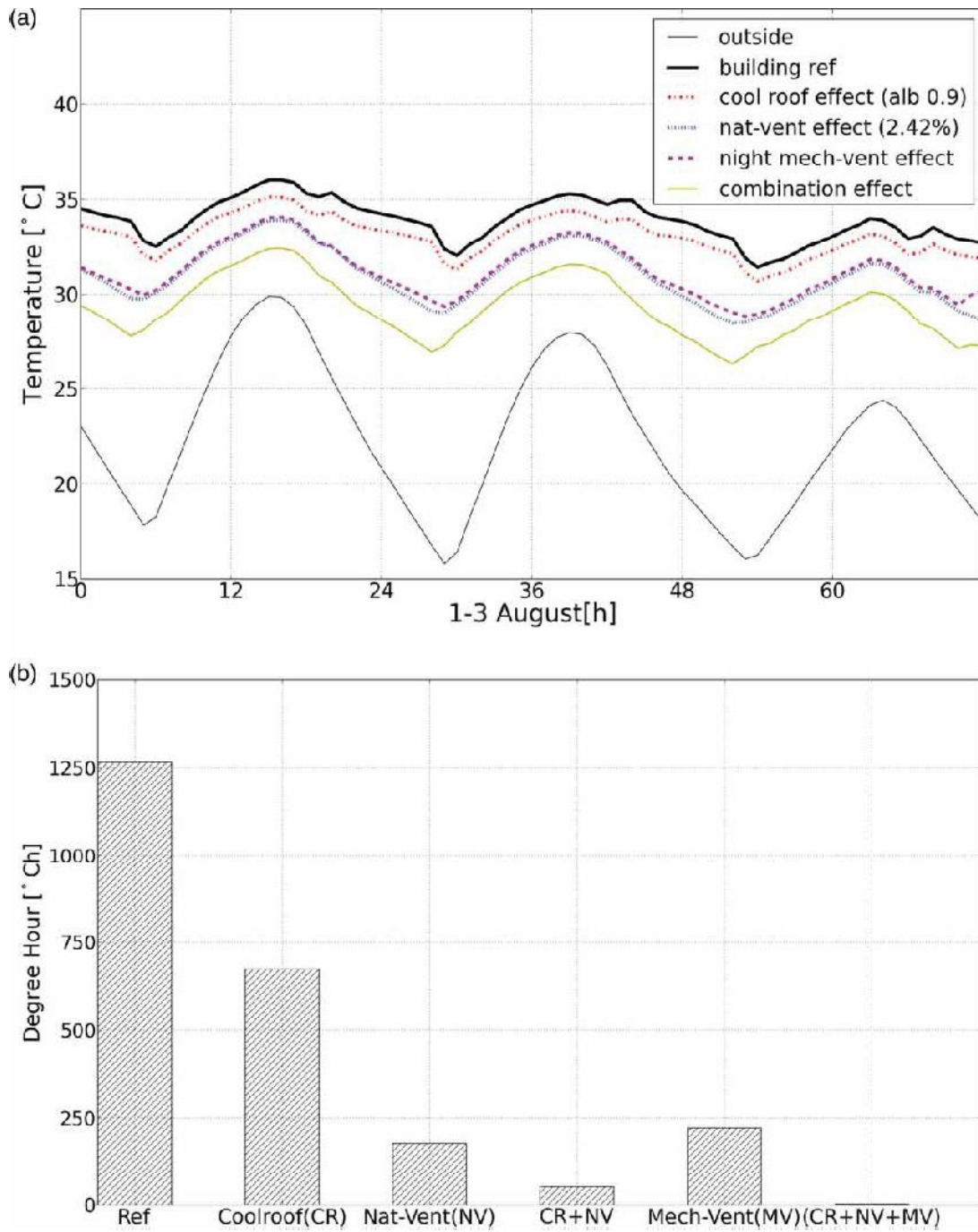


Figure 13. (a) Effects of cooling strategies on operative temperature and (b) effects of cooling strategies on DH above adaptive discomfort temperature.

cooling potential could be improved by increasing the air flow rate through ventilation. Natural ventilation is preferred here because it does not require any energy. Enlarging the surface area of skylights offers more effective passive cooling gains and replaces mechanical ventilation needs.

4.3.3. Discomfort temperature profile based on adaptive thermal comfort

The comfort level varies depending on the climate and occupants' adaptability to temperature changes. The adaptive approach which is based on the findings of field surveys is a good

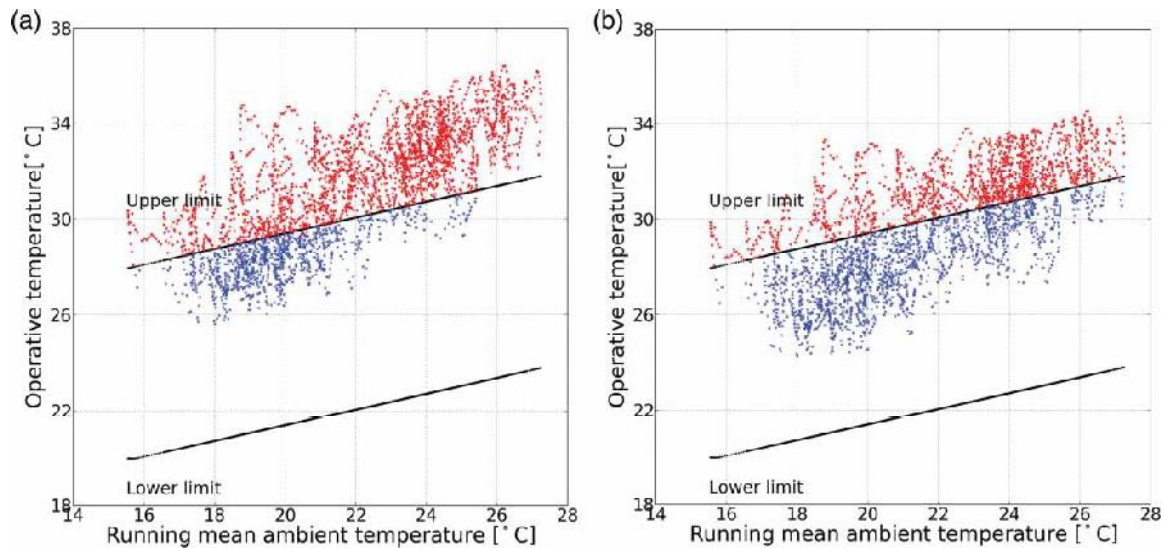


Figure 14. Operative temperature on running mean ambient temperature; (a) ground heat transfer model without inertia (adiabatic floor) and (b) with inertia.

alternative to determine the thermal comfort at different locations. Several studies were performed to propose a general approach of adaptive comfort, for different regions (Karyono, 2000; Nicol & Humphreys, 2002). In this paper, the European NF EN 15251 standard on calculating the adaptive comfort is used as a reference.

4.3.3.1. *Effect of thermal ground inertia.* Figure 14 shows the indoor operative temperature profile according to the running mean outside temperature for the summer period and for category III buildings (EN 15251) with two ground heat transfer models: adiabatic floor without thermal inertia (Figure 14(a)) and uninsulated floor with inertia (Figure 14(b)). The ground thermal inertia effect lowers the operative temperature mainly under the free-floating condition, i.e. in the absence of any cooling system.

The ground thermal inertia has a tremendous effect on the reduction of the thermal discomfort. Figure 15 presents the numbers of degree Celsius above the upper limit of the comfort zone in the same way as for the heating and cooling energy (Figures 7 and 8). Discomfort clearly happens when the solar heat gain is high, i.e. between 09:00 am and 08:00 pm. In the summer period, 69.6% of the indoor temperature is above the comfort limit for buildings with adiabatic ground slab. When compared with the first ground model, involvement of the ground thermal inertia

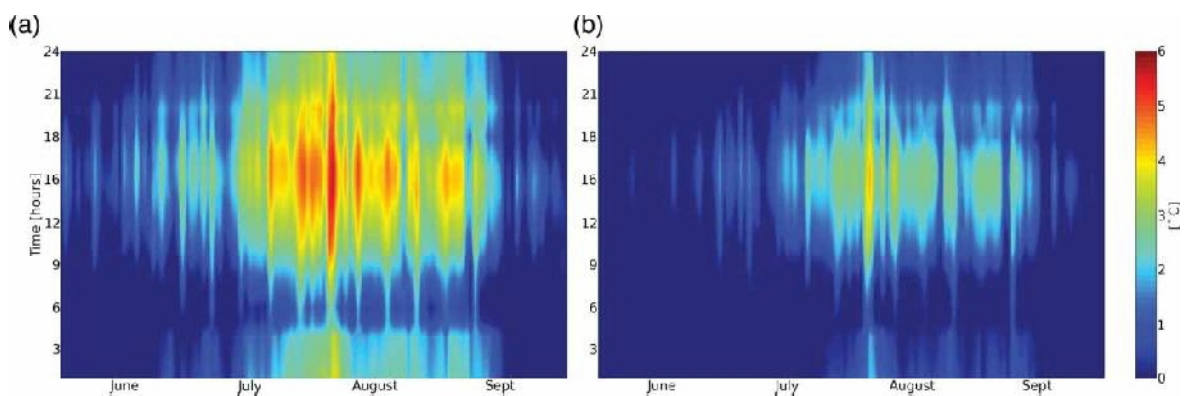


Figure 15. Discomfort temperature profile based on adaptive comfort for two ground models; (a) adiabatic floor model without inertia and (b) ground with thermal inertia model.

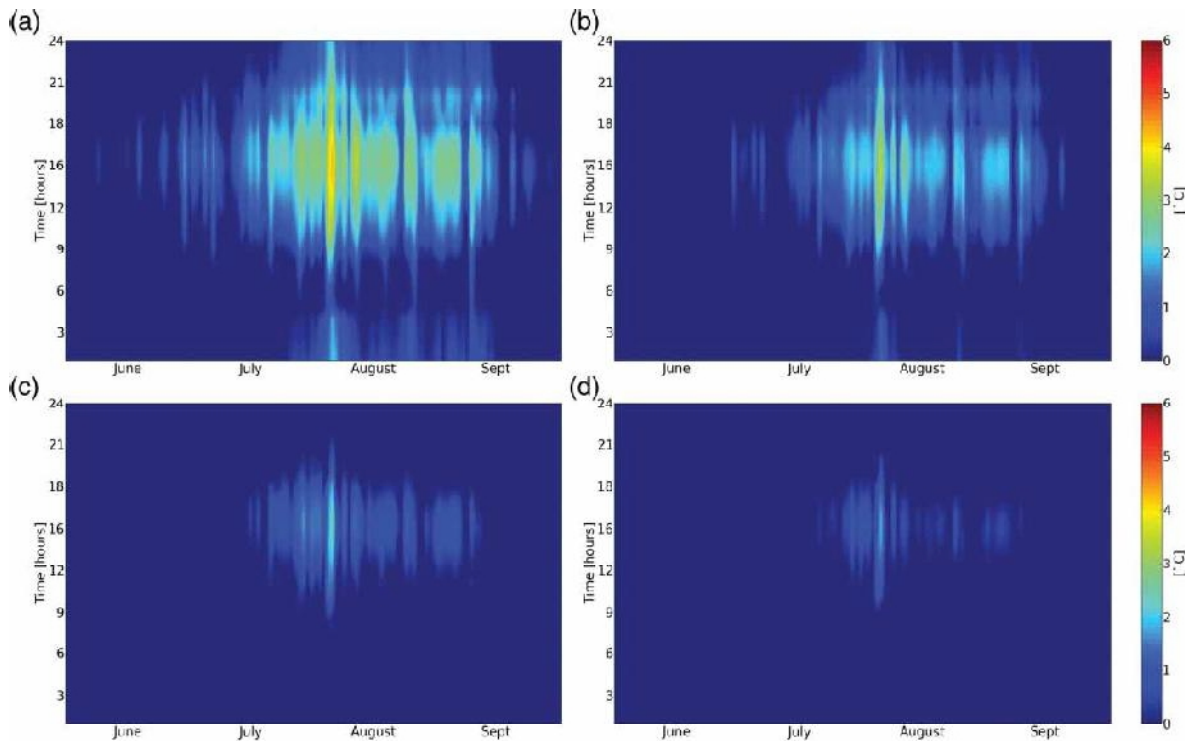


Figure 16. Hourly evolution for the summer period of the thermal discomfort (temperature difference) based on adaptive comfort; (a) reference building, (b) effect of cool roof, (c) effect of natural ventilation and (d) combined effect of cool roof and natural ventilation.

significantly reduces the level of discomfort temperature (remaining 42.7%). Note that a thermal discomfort peak is observed at the end of July when solar irradiation is the highest.

4.3.3.2. *Effect of passive cooling technique: cool roof and natural ventilation.* Figure 16 highlights the mitigation of the thermal discomfort obtained by the passive cooling techniques of the present analysis: cool roof coating and night natural ventilation. In order to evaluate correctly this impact and as observed in the previous section (Figure 15), the thermal inertia effect of the ground floor has been modeled.

For each time-step, the thermal discomfort due to overheating is characterized by the positive values of temperature difference between the operative temperature and the adaptive comfort temperature. For the Mediterranean climate, the night-time natural ventilation appears to have a greater impact compared with the cool roof technique. This result originates from a higher effect of the ambient temperature difference between day and night, i.e. the ventilation potential, compared with the reduction in the solar heat gain at the roof obtained with the cool coating. The natural ventilation is carried out during the night (after occupancy time), but the heat dissipation through the skylights has a greater effect on the temperature reduction only at the beginning of the next day. By combining the two techniques, the minimization of the solar heat gain during daytime and the heat dissipation during night-time induces a comfortable indoor temperature almost all the time in the summer, except for a few hours at the end of July. The combination of both techniques tremendously reduces the thermal discomfort.

5. Conclusions

The typical commercial building analyzed here, located in a Mediterranean climate and well insulated, has demonstrated the interest of passive cooling strategies such as natural ventilation

ensured by skylights (2.4% of roof surface) which alone contributes to a strong reduction in summer discomfort with an 86% drop in DH above the comfort upper limit.

The cool roof technique alone is also valuable with a 46.8% drop in the discomfort assessed by the DH. For this studied case, we can compare the 11% heating energy penalty caused by the loss of free solar heat gain in winter considering an air-conditioning system for the summer. Then, the energy saving due to the cool roof accounts for 33.8% of the cooling energy demand which represents a higher sensible energy demand than the heating demand.

The use of mechanical ventilation at night performed not better than natural ventilation with an 82% drop in DH. But these well-known techniques can operate in a very efficient way when combined together: night natural and mechanical ventilation together with cool roof give a huge drop in DH up to 99.8%. These DH tendencies can be used also to design mechanically cooled buildings, as the energy consumption varies in the same way, even if a good design could give in this case a satisfactory solution.

Moreover, we have demonstrated that these solutions could be not totally effective without the contribution of the ground thermal inertia. Indeed, it contributes up to a 58.6% drop in DH compared with an adiabatic floor model. This means that for large-volume low-rise buildings, the ground floor is a key factor to be considered and its insulation from the ground could be counter-productive. The shelving inertia participates also in the passive cooling process, and it was assessed to result in a 24.2% DH drop compared with the same building without shelving.

These parametric results and the methodology presented here have given the first results which could be used in the commercial building design phase, but it has to be extended. The ongoing work and the outlooks on this topic are now to assess the optimal ratio of skylights in order to provide the best passive cooling effects and check against additional heat losses in winter. Moreover, the model has to be refined in order to take into account thermal stratification within the building and to study comfort zones. The ground thermal inertia has definitely a great impact on the low-rise building thermal behavior and additional works need to be engaged to account for the building shape, the soil thermal properties and the connection between the building slab and the ground.

Acknowledgements

The authors wish to thank the Indonesian government for its financial support.

References

- Adjali, M. H., Davies, M., Rees, S. W., & Littler, J. (2000). Temperatures in and under a slab-on-ground floor: Two- and three-dimensional numerical simulations and comparison with experimental data. *Building and Environment*, 35, 655–662.
- Akbari, H., Levinson, R., & Rainer, L. (2005). Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings. *Energy and Buildings*, 37, 1007–1016.
- Aste, N., Angelotti, A., & Buzzetti, M. (2009). The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings. *Energy and Buildings*, 41, 1181–1187.
- Blondeau, P., Spérandio, M., & Allard, F. (1997). Night ventilation for building cooling in summer. *Solar Energy*, 61, 327–335.
- Bozonnet, E., Doya, M., & Allard, F. (2011). Cool roofs impact on building thermal response: A French case study. *Energy and Buildings*, 43, 3006–3012.
- Chiffres clés de l'énergie édition. (2012). n.d. MEDDE, Commissariat général au développement durable.
- Eckert, E. R. G., & Drake Jr, R. M. (Eds.). (1987). *Analysis of heat and mass transfer*. New York: Hemisphere Publishing.
- Foldbjerg, P., & Asmussen, T. (2013). *Ventilative cooling of residential buildings: Strategies, measurement results and lessons-learned from three active houses in Austria, Germany and Denmark*. 34th AIVC conference's proceedings. Presented at the AIVC, Athens, Greece.

- Geros, V., Santamouris, M., Tsangrasoulis, A., & Guarracino, G. (1999). Experimental evaluation of night ventilation phenomena. *Energy and Buildings*, 29, 141–154.
- IAE. (2008). *World energy outlook 2008–2009* (578 pp). Paris: Author.
- Karyono, T. H. (2000). Report on thermal comfort and building energy studies in Jakarta—Indonesia. *Building and Environment*, 35, 77–90.
- Kolokotsa, D., Diakaki, C., Papantoniou, S., & Vliissidis, A. (2012). Numerical and experimental analysis of cool roofs application on a laboratory building in Iraklion, Crete, Greece. *Energy and Buildings*, 55, 85–93.
- Kubota, T., Chyee, D. T. H., & Ahmad, S. (2009). The effects of night ventilation technique on indoor thermal environment for residential buildings in hot-humid climate of Malaysia. *Energy and Buildings*, 41, 829–839.
- Kusuda, T., & Bean, J. W. (1984). Simplified methods for determining seasonal heat loss from uninsulated slab-on-grade floors. *ASHRAE Transactions*, 90, 11–32.
- Labs, K., Shen, L., Huang, Y., Parker, D., & Carmody, J. (1988). *Building Foundation Design Book* Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Lab., Underground Space Center RNL/Sub-86–72143/1.
- Lapisia, R., Bozonnet, E., Abadie, M., Salagnac, P., & Perrin, R. (2013). *Effect of ground thermal inertia on the energy balance of commercial low-rise buildings*. Presented at the Building Simulation 2013 (BS2013), Chambéry, France.
- McDowell, T. P., Thornton, J. W., & Duffy, M. J. (2009). *Comparison of a ground-coupling reference standard model to simplified approaches*. Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland.
- Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34, 563–572.
- Rabai, Y. (2012). Dix ans de consommation d'énergie dans le secteur tertiaire [Publications, Chiffres & statistiques, 2012]: Observation et statistiques.
- Romeo, C., & Zinzi, M. (2013). Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study. *Energy and Buildings*, 67, 647–657.
- Santamouris, M. (in press). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Shaviv, E., Yezioro, A., & Capeluto, I. G. (2001). Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy. *Renewable Energy*, 24, 445–452.
- Synnefa, A., & Santamouris, M. (2012). Advances on technical, policy and market aspects of cool roof technology in Europe: The cool roofs project. *Energy and Buildings*, 55, 35–41.
- Wang, Z., Yi, L., & Gao, F. (2009). Night ventilation control strategies in office buildings. *Solar Energy*, 83, 1902–1913.
- Xu, T., Sathaye, J., Akbari, H., Garg, V., & Tetali, S. (2012). Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting: Reduced cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions. *Building and Environment*, 48, 1–6.
- Zhou, Z., Rees, S. W., & Thomas, H. R. (2002). A numerical and experimental investigation of ground heat transfer including edge insulation effects. *Building and Environment*, 37, 67–78.

Modeling methods to assess urban fluxes and heat island mitigation measures from street to city scale

Emmanuel Bozonnet^{1,2*}, Marjorie Musy^{2,3}, Isabelle Calmet^{2,4} and Fabrice Rodriguez^{2,5}

¹Université de La Rochelle, LaSIE FRE CNRS 3474, Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex 1, France

²Institut de Recherche des Sciences et Techniques de la Ville, FR CNRS 2488 Nantes, France

³L'UNAM, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, CERMA UMR CNRS 1563, 6 quai François Mitterrand - BP 16202, 44262 Nantes cedex 2, France

⁴L'UNAM, École Centrale de Nantes, LHEEA UMR CNRS 6598, BP 92101, 44321 Nantes, France; ⁵Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, Route de Bouaye, CS4, 44344 Bouguenais Cedex, France

Abstract

The urban microclimate is due to complex physical interactions with the contribution of water balance, thermo-radiative exchanges and airflows. In this paper, we present and discuss modeling of heat island effects and mitigation techniques in order to give consistent results considering different time and space scales, and different fluxes (heat, water and winds) from ground to urban canopy, including buildings. The models and numerical descriptions are presented in detail and illustrated on typical examples of heat island mitigation techniques. At the neighborhood scale, alternative rainwater management techniques are studied by considering their impact on both seasonal water table depth and surface-atmosphere heat fluxes. Assessing the building thermal performance interactions with the microclimate requires adapted models that have to be refined for a better description of building envelope and systems effects. Two examples at the street and the neighborhood scale, modifying the building radiative properties or using green envelopes, show how simulation brings out the potential benefits of these techniques for the heat island mitigation and building energy performance.

Keywords: urban heat island mitigation; urban modeling; building simulation; district scale; rainwater management

*Corresponding author.
emmanuel.bozonnet@
univ-lr.fr

Received 30 October 2012; revised 18 March 2013; accepted 16 May 2013

1 INTRODUCTION

1.1 Context

The microclimate of the cities is characterized by the urban heat island (UHI) phenomenon, which results in higher temperatures in cities than in rural areas, especially at the end of the day. It is closely related to urban form, materials and anthropogenic loads dissipated into the urban fabric such as heat losses from buildings or air cooling systems. Building design and urban planning have to deal with various and complex physical phenomena that are often highlighted for their negative impacts. Urban sprawl consumes

agricultural land and contributes to the air pollution along with increased transport needs, as well as more substantial hydrological risks through soil and aquatic environments. Urban densification results in increasing the proportion of impervious artificial surfaces and in changing the urban fabric morphology. Beyond building energy performance, thermal comfort (indoor and outdoor) and rainwater management issues, this raises health concerns, as in the case of the summer 2003 heat wave, which resulted in an estimated 70 000 additional deaths in Europe. Given that the Intergovernmental Panel on Climate Change announced in 2007 a global warming of 1.1 to 6.4°C by the end of this century, it is now

essential to better understand and predict the impact of urbanization on UHI phenomenon and propose technical solutions for microclimate mitigation purposes. The assessment of such mitigation techniques can be achieved by means of numerical tools that are both robust and capable of simulating realistic urban settings. Simulation approaches are very useful indeed to assess planning assumptions, including the use of alternative techniques, as a simpler step than conducting real-scale experiments. According to the proposed techniques and the physical phenomena involved, the space scale of the models varies from the city scale, considering the UHI phenomenon, to the street and building scale, considering the materials and building uses in detail.

1.2 Physical basis

Urban microclimate results from radiative, heat and water exchanges between the deep soil, the urban surfaces and the atmosphere. The multiple interactions related to thermal, radiative, hydrological and aerodynamic processes, including the thermal behavior of the buildings, are sketched, see Figure 1.

The water balance (Figure 1a) reflects the exchange of water between the soil and buried networks, the surfaces and the atmosphere, during either wet or dry weather conditions. This balance takes into account the spatial characteristics of the surface (impermeability, presence of vegetation), soil hydrological properties (permeability) and the presence of underground networks capable of generating preferential drainage into the ground. The evapotranspiration fluxes between the surface and the atmosphere correspond to the latent heat flux included in the surface energy

budget (SEB). The energy budget (Figure 1b) expresses the balance between net radiation, latent heat flux (originating from the water budget), sensible heat flux (surface convection) and conductive heat flux both in the soil and through the building envelope (storage). The advective and anthropogenic heat fluxes (not represented in Figure 1b) are also involved in the urban energy budget, included either in the surface balance (thus considering the city surface as thick surface) or in the energy balance written for the air representing the urban canopy. The conductive heat flux depends on indoor environmental systems and loads (i.e. heating, cooling and other building uses). The heat balance of the building includes the balance between heat fluxes through walls and roofs, solar benefits, internal loads (occupants, equipment, etc.) and fluxes related to ventilation and air infiltration through the building envelope (Figure 1c). Sensible heat flux at the wall surfaces depends on near-wall airflow and temperature. Ventilation rates and infiltration also depend on external airflow, which in turn determines the pressure coefficient on the walls.

The expression of both these balances highlights the fluxes and state variables used to interpret the interactions between physical phenomena, yet these interactions are often neglected or simplified, by focusing on a specific aspect that can be grouped into four model categories: hydrology, radiation, airflows and energy budget. According to all these models, the evolution towards adapting new urban planning assumptions and physical interaction representations are either directly integrated into existing models or else tied to specialized models.

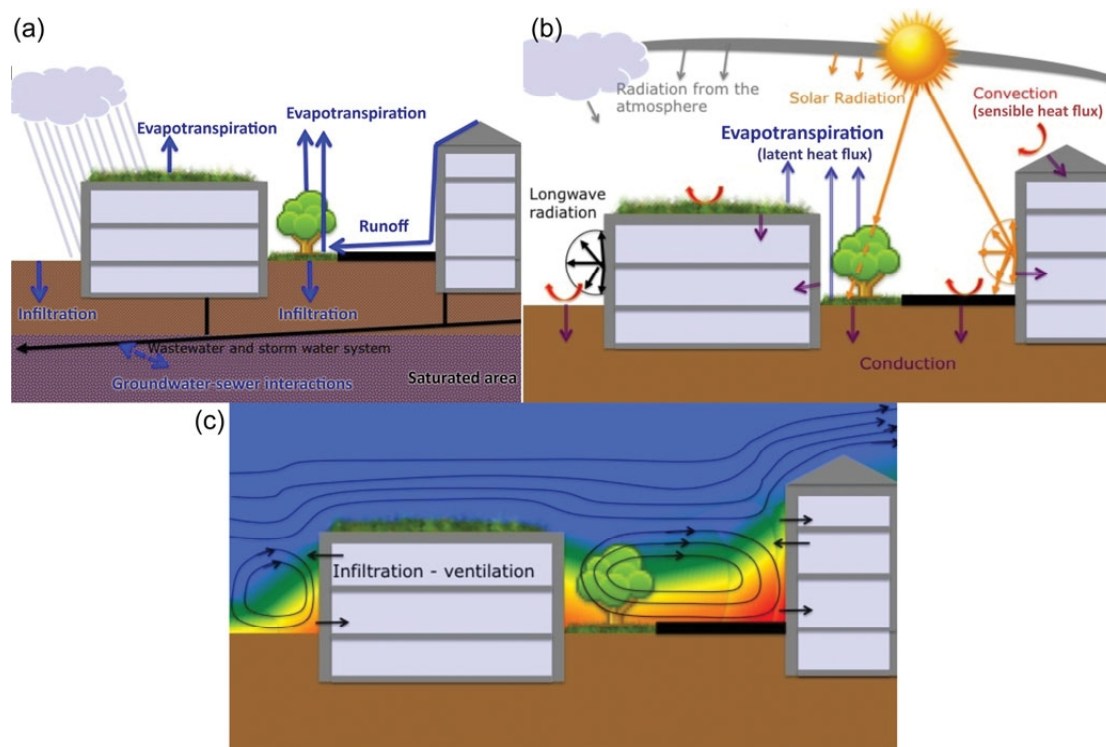


Figure 1. Urban physical interactions contributing to (a) water balance, (b) thermo-radiative balance and (c) airflows.

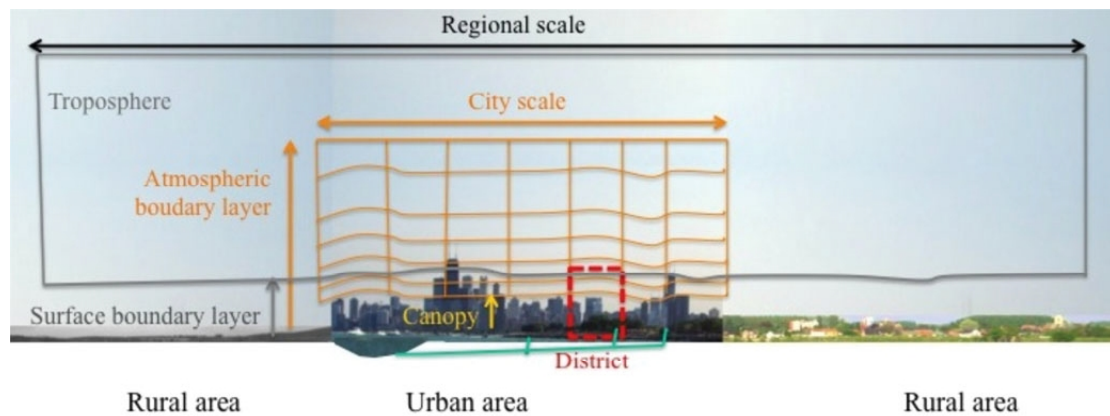


Figure 2. Scales used in the field of urban microclimatology.

1.3 Modeling approaches

Urban microclimate and hydrological behavior of urban surfaces and soils can be described at different scales (Figure 2) in order to satisfy different objectives.

To study the influence of cities on the atmosphere, with emphasis on the UHI phenomenon, the scientific community has developed models to reproduce the main energy and water exchanges between the urban surface and the atmosphere. In the past decade, there has been considerable progress in the ‘urbanization’ of atmospheric models [1–4]. However, examining urban amenities, the scale considered is that of the immediate environment, i.e. street, city square. These studies are usually performed with models requiring an explicit description of the urban scene (buildings and isolated trees) and that output the impacts of these elements on solar radiation, wind, temperature and humidity [5–9]. Two groups of urban climate models can thus be defined according to the modeled scales: those representing an urban fragment (i.e. extending from the street scale to a district), composed of different types of surfaces (i.e. buildings, soil and vegetation), in explicit terms (i.e. their geometry and relative positioning) and those representing a scale at which the surfaces cannot be explicitly described. It is worth noting that multi-scale approaches also exist. They were first developed to get more accuracy in modeling the pollutant dispersion in streets [10] but might be fitted to studying local microclimate. Then, a set of tools can be implemented to provide models designed at the scale of urban fragments with weather conditions from high-resolution models applied at a larger scale [11].

Hydrological models used in urban areas are usually focusing on the catchment scale, which varies between the district and the multi-district scales. Aiming at representing the hydrological response of a sewer pipe supplying with water an urban or sub urban river, urban hydrological models are based on a basic representation of the main land use features of the catchment, and especially man-made mineral surfaces for sewer design issues. Representing the runoff from impervious areas is indeed often considered as the dominant process of urban hydrology [12]. In the large-scale atmospheric models, the water exchanges

between the deep soil, the surface and the atmosphere, required to estimate energy budget of the surface, are considered by means of simplified parameterization of hydrological processes in urban areas, such as in the SM2U [13] or TEB-ISBA model [2, 14]. However, Grimmond *et al.* [15, 16] have concluded that models accounting for these physical processes even in a crudely simplified way were more accurate in modeling sensible heat fluxes.

Moreover, in urban areas, the heat flux that contributes to the air warming contains a component related to human activity. A proportion of anthropogenic heat fluxes are indirectly represented when modeling the heat transfer by conduction in materials through buildings walls. Taking into account the anthropogenic fluxes resulting from the use of air conditioning systems and ventilation, which are closely correlated with weather conditions, should improve the modeling of both building energy performances and urban microclimate. Indeed, building operation contributes to UHI, especially in summer conditions when the cooling systems’ loads increase, which consequently raises their contribution to the UHI simultaneously to their performance’s cut. At micro-scale, building energy simulations are typically carried out over a 1-year period with an hourly time step and standard weather files generated from statistical processes covering several years of data [17] while microclimate simulations that calculate very local information tend to introduce a representation of weather types or climatic sequences over a few days. Combining these two kinds of models in order to estimate energy consumption, in considering both the local microclimate and the effect of the particular building on climate, requires special attention to each approach hypothesis. This is one of the main difficulties with coupled model implementation that lies in the differences between the spatial and temporal scales used to describe the inherent processes. At the urban scale, simplified thermal models for buildings (based on buildings typologies) have been introduced in some models [18–20] to address the climate–building interactions.

In this paper, we present some technical solutions and the necessary modeling tools to study and to include these techniques

in decision processes. Each modeling approach presented in the following is adapted for its own studied scale, and the aim of this paper is to illustrate how it can be used for UHI mitigation in urban and building design; the bibliography references give more details on each model hypothesis. Models and technique studies from street to district scale are presented to highlight the design issues of UHI mitigation techniques (such as cool materials, green walls, etc.) and their impacts on building energy performance or thermal comfort. France's total energy consumption and the percentage attributed to the country's residential and commercial sectors have stabilized since 2006 around values of 162 and 71 Mtoe, respectively. These sectors account for 43% of all energy consumption and 23% of CO₂ emissions. For the European building sector, the air conditioning of occupied spaces has been estimated at 57% of total energy demand and 33% of CO₂ production. Such a reduction is much easier to achieve in new buildings than by replacing stock of older buildings, a program that should be planned over a several-year period. Reducing summer thermal stresses in an urban context may be partially and indirectly achieved by modifying the local climate through the use of mitigation techniques. These solutions present the advantage to be socially fair and healthy. They should be taken into account in the urban planning's decision process as well as in the building regulations and the development of methodologies taking into account the environmental, social and economic parameters. These issues are not easily integrated in neighborhood sustainability methods [21], such as HQE²R in France, and need to be developed together with larger scale decision-support systems (DSS) for sustainable urban planning.

At this urban scale, the assessment of UHI mitigation requires larger-scale modeling of the physical processes presented here, which contribute to the urban metabolism components and the urban design. For example, the DSS developed in the European project BRIDGE [22] integrates the various physical fluxes (energy, water, pollutants...) in its inputs and outputs. However, we will focus here on mitigation techniques linked with rainwater management that favors infiltration of water in soils. Their influences on microclimate are presented using the results of both the urban hydrological model URBS-MO and the urban energy budget model SM2U, in order to illustrate the modification of the water and heat budgets due to these new urban planning tools.

2 URBAN MICROCLIMATE MITIGATION FROM THE CITY TO THE DISTRICT SCALE

2.1 Modeling the interactions between the soil, the urban surface and the atmosphere

2.1.1 SEB models

As stated in the section Introduction, the key of urban microclimate modeling is the representation of the interactions between the surface and the atmosphere through energy exchanges that

condition the thermodynamic behavior of the urban atmosphere. This is the main purpose of urban SEB models that determine the heat and humidity fluxes at scales ranging from a hundred meters to several kilometers. At these scales, the various elements of the urban canopy cannot be represented explicitly. A study of climate at urban or neighborhood scales thus requires representing the urban environment characteristics that affect wind, temperature and air humidity. These characteristics include the urban morphology, the presence of impervious surfaces, the proportion of built and natural surfaces, and the physical properties of both the surfaces (albedo, emissivity) and materials (conductivity and thermal capacity). The main issue is to acquire urban data and transform them into useful model parameters. The fundamental morphometric parameters (and the derived morphological parameters) as well as the surface covering modes can be easily computed from the detailed urban databases such as those provided by the Land Registry [23] or by National Institutes of Geography [3]. The data about the surface radiative properties are more difficult to estimate due to the heterogeneity of the urban fabric and of the three-dimensionality of the urban canopy. New methodologies are developed in order to extract this information from satellite data [24]. Finally, the information about the envelope of the building is generally not available and has to be estimated, on average, from the knowledge of the practices at build time.

Whether empirical [25] or physically based, all SEB models are based on one common principle: the net radiation resulting from surface radiation budget is split into sensible heat flux, latent heat flux and stored heat flux, this later representing the heat transfer by conduction in materials and soil (Figure 1).

In the simplest physically based models (i.e. so-called bulk models), the sensible and latent heat fluxes are modeled at the interface between the urban canopy (as a whole) and the atmosphere above. The canopy is represented by its mean aerodynamic (roughness length), radiative and thermal properties. These fluxes depend on the temperature or humidity differences between the atmosphere and the surfaces as well as on an aerodynamic resistance, which may be a function of wind and atmospheric stability in the surface layer. With these simple models, such as the SM2U model [26] used in this paper to illustrate the influence of alternative techniques on microclimate, it is possible to distinguish the various surfaces (natural surfaces, vegetation, roads, roofs and canyon), which contribute in different ways to heat and humidity transfers at canopy-atmosphere interface.

More elaborated models consider just one canopy layer [14, 27] characterized by a simplified urban fabric (streets canyon, whether oriented or not, in which roofs, streets, and walls are distinguished); they model the interaction between these surfaces and the air in the street and above the roof by a system of aerodynamic resistances that prove more complex than the 'bulk' methodology, even though they are based on the same principle. In this case, the wind in the middle of the canyon is determined by empirical equations and the temperature in the canyon is derived from the balance between heat fluxes at the surface and those at the top of the canyon. Finally multi-layer

canopy models exist where fluxes are calculated at different heights within the canopy; these calculations require knowing the vertical wind and temperature profiles. Whenever these models are directly implemented into an atmospheric model [1, 4], the climatic variables (and turbulence) are computed by solving fluid dynamics and thermodynamics equations, which have been modified within the canopy to take into account the averaged effect of buildings on wind and turbulence, plus the source/sink of heat and humidity at different levels.

All the SEB models can be used offline (i.e. without coupling with atmospheric models): the atmospheric forcing is then imposed by the radiation and meteorological data recorded above the canopy. For multi-layer models, the wind, temperature and humidity in the canopy are obtained by solving the simplified atmospheric surface layer equations [19, 20, 28, 29].

Choices have been made to take into account the physical processes involved in the SEB, regardless of the method chosen for computing sensible and latent heat fluxes. Some modelers have chosen to neglect the latent heat flux resulting from vegetation evapotranspiration, in considering only the characteristics of heavily built environments. In contrast, the effects of vegetation such as shading and radiation absorption can be directly integrated into the urban fabric representation [30]. In intermediate approaches, the latent heat flux from natural surfaces and vegetation contributes to total flux by virtue of its density, although vegetation does not directly interact with other surfaces. Heat storage, which may be significant in urban areas due to the characteristics of materials and the urban morphology, is sometimes calculated as the residual of energy budget, or else empirically estimated as a fraction of net radiation [25] based on the surface characteristics or computed using the formula for heat conduction through the various layers of materials. Moreover, in densely built areas, the solar radiation is trapped due to the reflections occurring between the different street surfaces and the radiative cooling at night is reduced. The sky view factor for the different surfaces of the street gives an indication about the intensity of the radiative exchanges between the surfaces and the atmosphere (compared with flat horizontal surface), so that it is currently used in urban SEB models for estimating the characteristics of the radiation. In models suited to the neighborhood scale, the sky view factors are computed for representative floor and walls based on morphometric parameters such as the mean building separation (or the street width) and the mean building height. In the SM2U model, for example, the radiative trapping in the streets is parameterized through the computation of an effective emissivity and an effective albedo, which also depends on the solar angle [26].

No real correspondence can be identified between the various modeled processes and the type of models (bulk vs. canopy) described earlier. For the specific reason of establishing modeling guidelines, an international research effort has recently been made to conduct a comparison of these models. The purpose therein was to ‘classify’ the most successful approaches for representing exchanges between the urban canopy and the atmosphere, in addition to the physical processes that must not be

neglected as part of physical modeling [15, 16]. One of the conclusions of this study is that a representation of the effects of vegetation and natural surfaces, even when present in a small proportion, improves the model results. At the same time, it appears that the latent heat flux is the less well-modeled component of the energy balance. This outcome may be due to poor knowledge of the soil water content or to the use of rural vegetation models. While two potential urban climate regulations call for the widespread use of vegetation and new rainwater management practices, efforts must be coordinated with hydrologists in order to better represent, in climate models, interactions between the surface and the underground.

2.1.2 Urban hydrological models

Traditional hydrological modeling approaches often focus on representing hydraulic flows, aiming at either simulating storm events potentially generating urban floods or sizing sewer systems (sewer pipes and retention ponds). These approaches have evolved over the past 10 years in favor of models including a more detailed representation of the water cycle [31, 32]. Various modeling approaches have been developed in order to further refine a detailed representation of the water cycle in urban areas, as characterized by strong material heterogeneity (e.g. mineral surfaces, vegetation), also resulting in heterogeneous water flows.

Hydrological models adapted to urban areas usually introduce a rough parameterization of the evapotranspiration flux and separate the evaporation flux due to the soil surface from the transpiration flux due to vegetation. The actual evaporation flux is estimated as a fraction of the potential evapotranspiration (PET), in proportion to water storage in the soil surface reservoir [23, 31]. This parameterization is carried out without taking into consideration the potential effect of mineral surfaces warming on the evaporation flux. The transpiration flux of pervious areas is estimated based on knowledge of soil moisture and PET, in accordance with the parameterizations derived by modeling work performed on rural hydrology [31, 33]. These ‘hydrological’ parameterizations avoid any use of data and microclimatic parameters (temperature, humidity, wind profiles, etc.).

‘Water-energy’ approaches associate the simulation of energy and water balances with a better representation of water flow to the surface. As part of a simplified approach, Xiao *et al.* [34] presented a hydrological model in which the PET was estimated from a modification to the Penman equation, through the use of the following data: net radiation, air temperature, wind speed at a distance of 2 m and saturation vapor pressure. The actual evapotranspiration can then be deduced from PET by following the same method as in the models described earlier. This Xiao model is used in particular to test the impact of Best Management Strategies applied at the neighborhood scale and may help developers compare their efficiency with respect to water balance changes.

In more elaborate approaches, water and energy balances are simulated through a coupling, like in the Water and Energy transfer Process model [35] and the NICE-URBAN model [32]. This innovative approach towards coupled modeling allows simulating the impact of mitigation strategies so as to evaluate

their performance in terms of water and energy balances. For example, it shows that the use of porous materials, capable of storing water (permeable pavement and/or asphalt), instead of more conventional materials (asphalt or concrete) can reduce not only the surface temperature but also air temperature above the surface by a few degrees compared with the conventional materials. This type of analysis would not be possible with the hydrological modeling approaches reviewed earlier.

This evolution in hydrological simulation tools may be related to changes in soil models that simulate the energy balance in adopting a simplified consideration of hydrological processes in urban areas, such as in the SM2U [13] or TEB-ISBA model [2, 14]. An evaluation of alternative urban planning options for improving the amenities of city dwellers (e.g. more vegetation, infiltration and reuse of rainwater, use of permeable or reflective materials) requires this kind of integrated approach. Efforts made regarding more targeted studies on the hydrology of urban areas need to be pursued.

2.2 Energy and water approaches for mitigation strategies assessment

2.2.1 Alternative techniques for rainwater management

The evolution of urban hydrological modeling described earlier is in agreement with the recent evolution of rainwater management strategies dedicated to the urban context. These strategies promote rainwater infiltration, local storage and evapotranspiration, through the use of techniques that are called 'Best management strategies' (BMPs) in urban planning, including landscaped ditches, green roofs, porous materials and the creation of water zones or basins. These types of techniques are currently applied in low impact development neighborhoods, called 'ecoquartiers' in France. These techniques were initially implemented in order to reduce the volume of rainfall runoff at the outlet but are effective at retaining pollutants too [36, 37]. Some other impacts of these strategies should be further investigated. Infiltrating more water in the soil should modify the soil moisture distribution and can cause rising groundwater tables in urban areas [38]. The possible perturbation of urban climate is another focus: the impact of specific alternative techniques such as green roofs on UHI effect reduction has been studied by several authors [39, 40]. These strategies could contribute to the urban environment cooling, but some further studies are necessary in order to evaluate the overall impact of rainwater management strategies. This is illustrated thereafter on a case study.

2.2.2 Assessment of mitigation strategies

Methodology The impact of the alternative techniques for rainwater management is studied by modeling the water and energy budgets with two models. The physically based hydrological model URBS-MO, for Urban Runoff Branching Structure Model [23], can reproduce both the spatial and temporal variability of the hydrological processes in an urban catchment, including the runoff contribution of each land use (house, natural soil and street), the evapotranspiration and the soil moisture.

The urban SEB model SM2U (see Section 2.1.1) forced by meteorological forcing such as solar radiation, wind, air temperature and humidity determines the fluxes between the canopy and the atmosphere. These fluxes depend on the average land use fraction in the neighborhood: artificial (impervious) surfaces, buildings and natural (pervious) surfaces. Vegetation can partially cover natural (and artificial) surfaces, intercepting water during rainy periods and favoring evapotranspiration processes during warm days. The soil water budget takes into account the evapotranspiration, the water infiltration from natural surfaces and the diffusion between the natural surfaces and two soil layers (a root zone and a deep soil layer). A part of the runoff rainwater from roofs and roads is collected in the network while the other part is collected by natural surfaces, contributing to the increase of the soil water content. All these features allow us to assess the influence of various hypothesis of urban planning on urban microclimate. When used offline, i.e. without retroaction on the climatology variables, the analysis is based on the diurnal evolution of sensible, latent and storage heat fluxes. Note that the SM2U model was previously validated for densely built urban area [26] and for residential suburban district [13].

The case study concerns an urban catchment area located within the Nantes metropolitan growth center (western France) called Bottiere-Chenaie. This is a 40 ha 'ecoquartier' (neighborhood sustainability program) under construction in the catchment area (Figure 3—left) with a rainwater management strategy (2008–2013). BMPs implemented in this neighborhood include green roofs, vegetated ditches (Figure 3—right) and retention basins. The runoff rainwater is mainly collected by vegetated ditches, which favor the infiltration within the soil.

Two development scenarios have been simulated for this case study: the actual 'ecoquartier' (i.e. ecodistrict) scenario, which consists in modeling the 40 ha neighborhood with the rainwater BMPs, and the potential 'traditional' scenario, which consists in modeling this neighborhood without BMPs, i.e. with traditional buried sewer pipes collecting runoff rainwater and with basic sloping or flat roofs. The vegetated fraction is 46% in the traditional scenario whereas it is 62% in the ecoquartier scenario, the difference being mainly due to the replacement of part of the street surface by vegetated ditches and to planting vegetation on the bare soil (Table 1).

The hydrological modeling of both scenarios has been implemented with URBS-MO by using the following input data: rainfall intensity observed in the Gohards catchment [23], Penman PET (PET) collected from the meteorological station located 10 km from the catchment outlet. Morphological features of the neighborhood, including natural and impervious fractions, were estimated based on the urban databanks available for the Nantes metropolitan area. The water budget parameter set used for the evaluation of URBS-MO in the Gohards catchment [23] has been transposed to the ecoquartier simulation, due to the proximity of both catchments. URBS-MO makes it possible to simulate BMPs due to basic modifications of the unit modeling scheme [41].



Figure 3. Project map of the urban planning of ecoquartier Bottiere-Chenaie in Nantes (left); vegetated ditch receiving runoff rainwater coming from streets and houses (right).

Table 1. Description of the neighborhoods in the three configurations analyzed with the SM2U model results.

	Traditional dense (%)	Traditional (%)	Eco-quartier (%)
Artificial surfaces	30.0	20.0	15.0
Built surfaces	45.0	22.5	22.5
Bare soil	4.0	11.5	0.5
Vegetated surfaces	21.0	46.0	62.0
Runoff rainwater collected in network	100.0	100.0	20.0

The relevance of the model URBS-MO has been evaluated using long and continuous series of atmospheric forcing on a close catchment [23]; in this study, this model was used in order to assess the hydrological processes sensitivity to the development scenarios.

The techniques favoring the rainwater infiltration in the soil might have an influence on the microclimate. In order to assess their impact, we used the SM2U model under the same assumptions for surfaces fractions as in the hydrological study. A third configuration more densely urbanized is also studied to serve as reference. The morphological features are presented in Table 1. The simulations were performed using meteorological data collected at the permanent observatory site of theIRSTV [42] located close to the ecoquartier Bottiere-Chenaie (Figure 3). In order to analyze periods when natural surfaces and vegetation might have an important role in the energy budget, we chose a 5-month period extending from April to September 2008.

Results The hydrological impact of the ecoquartier compared with the traditional development has been estimated through a

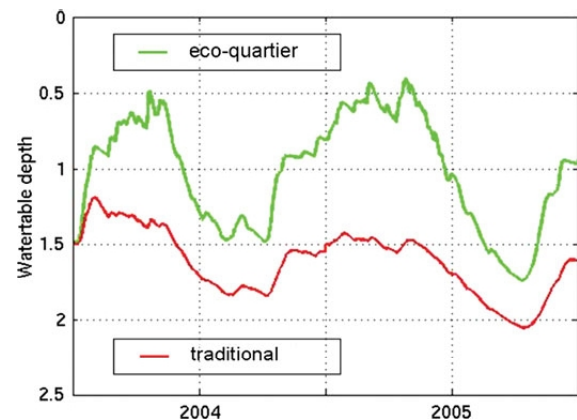


Figure 4. Comparison of water table depth in the traditional and 'ecoquartier' scenarios.

two-year continuous simulation with URBS-MO from August 2003 to August 2005. Both the runoff reduction and the water table modification have been analyzed. The peak flow reduction is in average 8% for the ecoquartier scenario compared with the traditional one, which is a well-known and expected effect of such rainwater management strategies. The hydrological model simulates both the soil moisture and the water table in any point of interest; here, we represented the water table in the middle of the ecoquartier (Figure 4). Initially located 1.5 m below the soil surface, the water table depth shows a seasonal evolution, increasing in winter and decreasing in summer. Infiltrating water in the soil modifies tremendously the shape of the water table evolution and shows high differences in winter, where the main rainwater is produced. Both the water table level and the soil moisture are also modified in the summer to a lesser extent.

The results from SM2U simulation show that the soil moisture in the eco-quartier configuration (ECO) presents larger variations than in the other scenarios (Figure 5). For significant periods of rain, the soil moisture in the ECO simulation increases fast because 80% of the runoff rainwater infiltrates through natural surfaces. It reaches values $\sim 2.5\%$ higher than in the traditional configuration (TRAD) and 3.8% higher than in the dense traditional district (TRAD-dense). However, the soil moisture in the ECO scenario also decreases faster than in the other scenarios during warm (and dry) periods, and the values obtained are slightly lower than those of the TRAD scenario. This behavior is due to the evapotranspiration by the vegetation that represents a larger fraction of the surface in the ECO than in the TRAD (or TRAD-dense) scenario (Table 1). In the TRAD-dense simulation and during this quite dry period, the soil moisture stabilizes around a value ($0.25 \text{ m}^3/\text{m}^3$) up to 8% higher than in the ECO simulation. This behavior results from the large fraction of impervious surfaces, which limits the water exchanges between the soil and the atmosphere.

As suggested in the previous analysis, the surface covering types (including vegetation fraction) and the strategies for decreasing the runoff have an influence on the canopy energy budget. An increase of the evapotranspiration (equivalent to the latent heat flux, LE) due to the change of artificial surfaces by natural surfaces should result in a reduction of the sensible heat flux (Hs) and/or of the storage heat flux (G) in the soil (and in artificial materials). The sensible heat flux is very important for the air temperature diurnal variation, since during the daytime it is responsible for the air warming induced by the heat exchanges between the surfaces and the atmosphere. The sensible and latent heat fluxes are presented on Figure 6 for the three scenarios during two sunny days corresponding to a dry period. As expected, the latent heat flux is weak in the highly urbanized district (TRAD-dense). The higher values are observed during daytime for the district ECO, and the maximum reached around 12:30 in the TRAD scenario is 60 W/m^2 weaker than in the ECO. Despite the large deviations in the latent heat fluxes, the maxima of sensible heat fluxes in configurations TRAD and

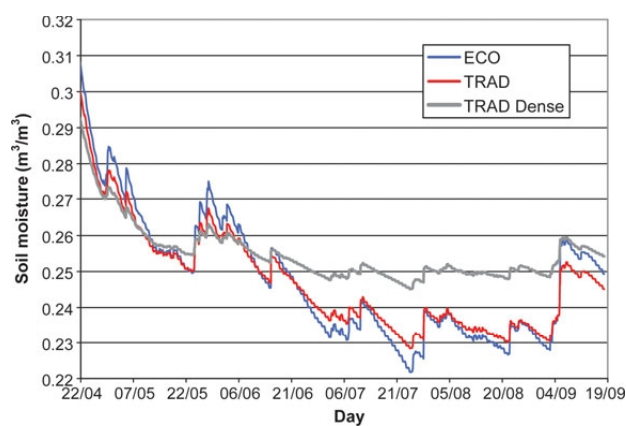


Figure 5. Comparison of the soil moisture computed by SM2U for the 3 scenarios: TRAD, Trad-dense and ECO.

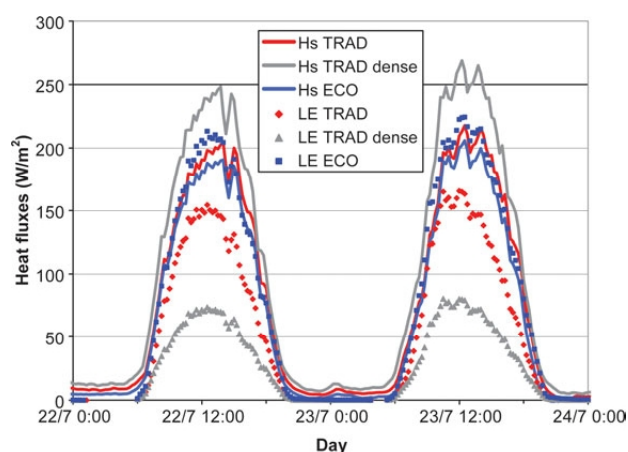


Figure 6. Comparison of the sensible and latent heat fluxes computed by SM2U for the 3 scenarios: TRAD, Trad-dense and ECO.

ECO only differ $\sim 12 \text{ W/m}^2$. This is the result of the heat storage in the soil that contributes to balance the energy budget. The heat released from the soil and materials during the night leads to a positive sensible heat flux, which is the weakest in the ECO scenario. It is interesting to notice that the fluxes simulated in the ECO scenario are close to those of a rural area where the sensible heat flux is generally weaker than the latent heat flux.

From this sensitivity study, it is clear that rainwater management techniques consisting in replacing impervious by pervious surfaces or increasing the vegetation fraction might have a positive impact on the regulation of the summer urban microclimate. However, in order to quantitatively highlight their influence under more severe conditions, other meteorological scenarios (including those of other climates and the predictions of climate change) should be considered as well as other urban morphology and material properties.

3 THE THERMAL ENVIRONMENT AND ENERGY DEMAND CONSIDERING HEAT ISLANDS EFFECTS AT BUILDING SCALE

3.1 Energy performance and local effects of UHI

3.1.1 Assessing microclimate around buildings

Focusing on providing an accurate assessment of heat and mass flows for a limited domain, simplified and semi-empirical approaches are often needed to complete the mass and energy balance equations within built-up areas, soil, vegetation and urban canopy layer.

A first group of models is specialized in radiative and solar energy computation, which is one major contribution to the UHI. Complex urban forms can be computed with tools like DART [43], SOLENE [44, 45] and SOLWEIG [46]. The thermal comfort can be assessed from the mean radiant temperature, which is a representative indicator of thermal comfort

conditions in the external environment. Thus, the SOLWEIG model overcomes the heat balance of walls with a few approximations: according to this model, surface temperatures are evaluated from both air temperature and sun exposure over time. Therefore, this model mainly focuses on a radiation computation completed by parameterizations for the other phenomena.

Another group of models can be distinguished as mainly based on solving heat, mass and momentum conservation equations within a gridded air volume. ENVI-met [47], SOLENE-microclimat [48, 49] and ‘coupled simulation’ [50, 51] would be categorized in this group; they are used to calculate radiative fluxes, surface temperatures, wind velocities, air humidity and temperature in a complex urban geometry, and even with the presence of vegetation. For the purpose of these models, vegetation is considered as a porous medium to wind and semi-transparent to solar radiation. The evapotranspiration and photosynthesis processes are expressed via the mass and heat balances. These three models have similar applications but reveal in their implementation two distinct approaches:

- ENVI-met and ‘coupled simulation’ were developed as comprehensive models, which require model integration for all phenomena. This approach has required the development of simplified sub-models. E.g. ENVI-met 4.0 now integrates heat storage in the walls [47]. In ‘coupled simulation’, model development is limited in its potential range of geometric complexity, by only considering an orthogonal grid, which remains unsuitable for most urban fragments found in European cities.
- The step of coupling specific models was developed in SOLENE-microclimat. An evaluation of outdoor comfort conditions was computed by Robitu [9], Figure 7 from [48], through a strong coupling between SOLENE (for radiative and thermal transfers in walls and floors) and FLUENT (for airflows). Airflow modifications due to natural convection effects were taken into account. This strong coupling is computationally extremely intensive but could be conducted for the amenity issues studied herein, which require sufficiently short simulation periods. Subsequently, in seeking to

evaluate building energy consumption in urban context, Bouyer [6] reduced computing time to run simulations for an extended period of several days, as required for building simulations. The model was simplified by taking into account just the heat and mass transport as well as diffusion inside the airflow. Further simplifications were studied by Malys *et al.* [49] who compared different coupling methods. It was demonstrated that during winter, the coupling procedures have a weak but non-negligible impact on the energy consumption assessment, especially for non-insulated buildings, due to the relative effect of convective and long-wave heat fluxes. For the insulated building, the effect of the local modification of outdoor air temperature is clearly negligible. So, it seems acceptable to avoid thermal coupling with the aerodynamic model to represent the effects of the neighborhood, if the long-wave radiation exchanges are properly taken into account. Thermal coupling appears more relevant in the summer due to the impact of solar irradiance in the modification of local air temperatures. Malys *et al.* [49] propose the use of an intermediate coupling method using a homogeneous control zone, whose temperature is assessed with this process instead of CFD calculation.

To satisfy the need for evaluating alternative techniques in urban development, these models evolve so as to incorporate different types of urban elements such as:

- The presence of vegetation and its impacts associated with its type [51–53], its location [52, 54, 55] and its management (i.e. intensive vs. extensive);
- Alternative systems for rainwater management at the parcel scale (roof storage, infiltration wells and rainwater drip) or at the district scale (retention ponds and landscape ditches);
- The specific construction materials for treating UHI (selective coatings) such as ‘cool paints’ on the roofs [56] or the facades [57], or active energy systems such as solar panels;
- Urban form (layout, density, etc.), on which a specific design procedure can be implemented with specific comfort or energy consumption objectives [58, 59].

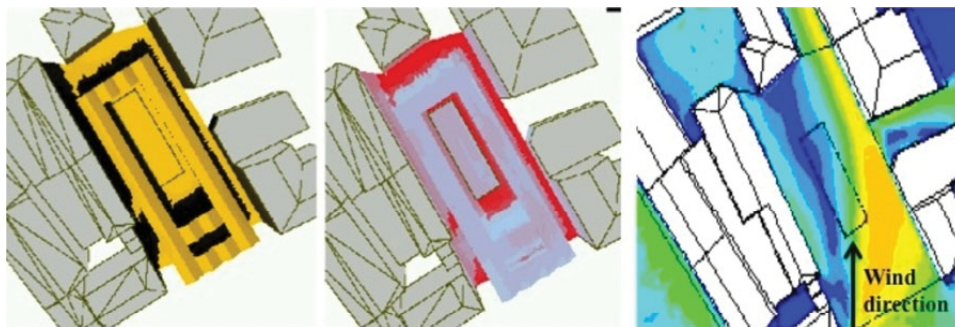


Figure 7. Examples of results obtained by coupling SOLENE-microclimat and FLUENT (solar flux, surface temperature and air velocity in an urban square with trees).

3.1.2 Modeling local UHI phenomena with the interactions of buildings and local phenomena

Taking into account the building interactions with local microclimate is needed for a proper assessment of both building energy consumption in dense urban areas, and contributions of buildings to the microclimate itself. Indeed, as outlined Figure 8, the anthropogenic heat from building operations, such as air conditioning systems, contributes to the UHI locally and globally, with reduced performances [60].

The anthropogenic contribution to urban microclimate obviously also stems from various other parameters [61] like motor traffic, industry and human metabolism (accounting for less than 1%). In contrast to the contribution from indoor building environments, these parameters, which pertain to population behavior and city characteristics, can be derived from databases or other model results in addition to serving as inputs simulation models.

So, considering the main heat transfers at the built-environment interface, the models need to assess the following:

- Heat exchanges by convection (depending on the near-wall air velocity and the local variations of outside temperature);
- Solar irradiation (direct, diffuse and reflected);
- Long-wave radiation exchanges with the sky and surrounding surfaces and
- Heat fluxes due to ventilation and infiltration.

Methods Physical models that address both the building and urban environment are rare. An initial approach consists of evaluating the direct impacts of the environment (e.g. masks) on the buildings; a second approach would then evaluate the interactions between a building and its environment.

This initial approach is introduced in SUNtool and CitySim [62, 63], which take into account the luminous and solar masking effects of the urban environment in calculating the energy consumption of buildings; this is also the option chosen by the building thermal research team at Sevilla University as part of the European project 'Greencode', which was responsible for the development of the street canyon model 'GreenCanyon' for estimating the influence of the urban environment on the thermal behavior of buildings [64].

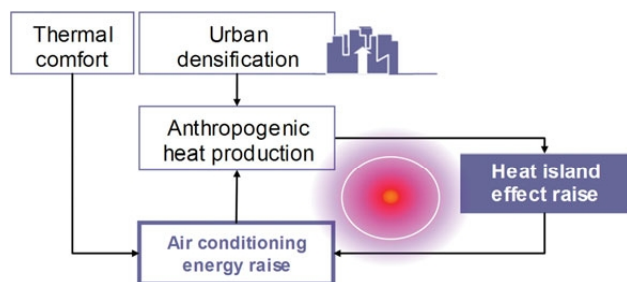


Figure 8. Anthropogenic heat contribution to UHI in urban confined spaces and at larger scales.

The second approach requires resolving scale compatibility. It is in fact difficult to accurately represent the urban environment as well as the buildings and their uses. The interactions' study thus requires either a reduction in the urban area studied, focusing on a building in a street canyon [65], or a simplified thermal model of the building [6]. In both cases, based on current developments, only one building is under the heat balance.

This complete coupling of building and environment, however, offers the advantage of allowing an evaluation of the environment impact on the thermal behavior of the building, along with the building's impacts on the urban microclimate itself [50, 66]. This consideration should provide a better thermal loads' estimation related to the human control of indoor spaces [61]. In narrow street canyon configurations, detailed modeling of heat and mass transfer between buildings and the street shows the possible interactions due to low air change rates, radiation interchange and anthropogenic heat. The development of a zonal model of a street canyon [66] including the air conditioner heat due to condensers positioned on facades (see Figure 9) has allowed assessing both the impact of this design on building energy demand and the confined street thermal environment.

Results on the street canyon case Temperature variations within this street canyon (23 m high, 7 m wide and 200 m long located in Athens, Greece, 37° 58'N, 23° 47'E, with a South West and a North East oriented facades) were computed with this model for a one-month period of August [66] considering air conditioned buildings (indoor temperature T_{int} maintained at 25°C). Taking into account the air conditioning systems, the mean air temperature peaks of the street are amplified during heat waves, see Figure 10.

3.2 Modeling the building behavior at the street or district scale to study new mitigation techniques

Heat from absorbed solar radiation is one of the main UHI parameters, and the urban buildings' envelope modifications are often proposed as a mitigation technique. A comprehensive review of reflective and green roofs technologies and their efficiency to fight UHI has been given by Santamouris [67]. Indeed, the absorbed heat can be reduced with high albedo and high thermal emissivity surfaces, known as cool roofs or facades. Otherwise, water evaporation systems can be used to reduce temperature due to this solar radiation, which is another way to modify building surfaces with water ponds roofs or green roofs and facades. Building simulation uses models for the direct effect of these techniques on the building itself. The advantage to use a coupled simulation of the building energy performance and the local microclimate from the street to the district scale is highlighted here.

3.2.1 The effect of cool coatings for roofs and facades

At the building scale, cool coatings are more and more developed for cooling energy performance or indoor thermal

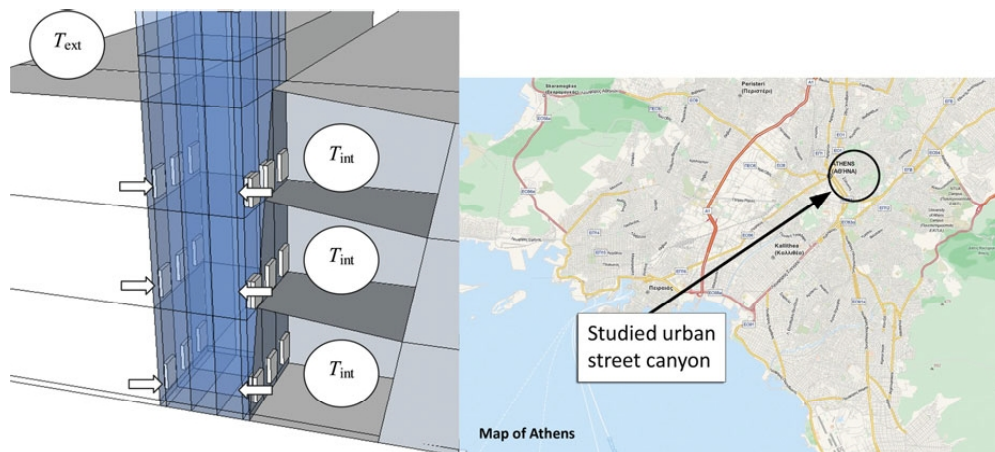


Figure 9. Zonal mesh (left) of an urban canyon considering air conditioned buildings (constant indoor temperature T_{int}) and outside air temperature and street canyon location in Athens (right).

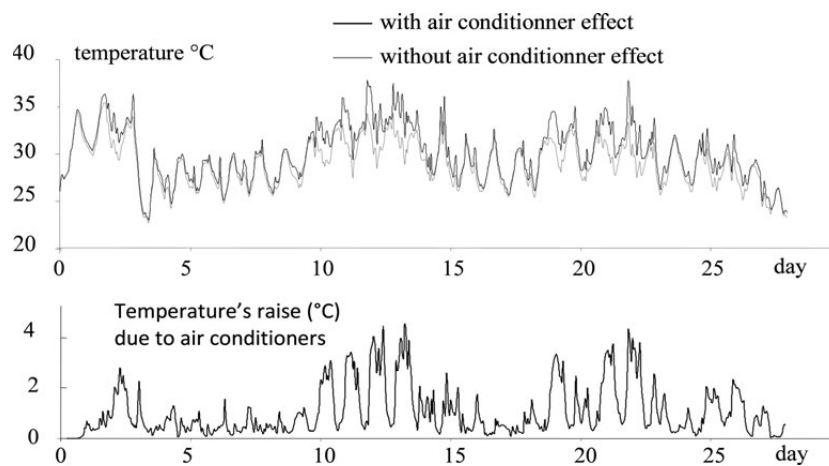


Figure 10. Mean temperature evolution within the street and difference due to the implementation of air conditioners' units.

comfort in summer, especially for roofs (see US Cool Roof Rating Council or EU Cool Roof Council [68]). As shown in Figure 11, the surface temperature's drop between a reflective roof and a reference roof with an asphalt membrane in the summer conditions can exceed 20°C. For the three membrane samples (see Table 2, [69]), the roof surface temperatures were monitored simultaneously in La Rochelle (France) during 3 months (from June to August).

While the measured temperatures' peaks of the reference roof are strongly reduced by high albedo for both cool roof and metal roof, the night cooling is not efficient for the metal roof due to its low thermal emissivity. So for the metal roof, it appears that more than 50% of measured temperatures are a few degrees higher than the reference sample. For the cool roof membrane with high thermal emissivity similar to the reference roof, 50% of measured surface temperatures are almost identical due to this night cooling phenomenon. This cool roof technique is an efficient alternative to mitigate the heat transfer to the building

and to the environment, i.e. the UHI contribution in urban context.

Modeling methodology for building interactions The direct contribution of the cool roof technique on the building for summer conditions can be assessed precisely enough through transient building simulation codes. A building simulation was validated through experimental results in Poitiers (France) for a non-cooled dwelling that was refurbished with a cool coating [70]. This model computation demonstrates the direct contribution on the indoor operative temperature, taking into account the local climate conditions. Taking into account realistic use and thermal behavior of the building throughout a complete season, these detailed building models are necessary to assess the indoor thermal comfort or cooling loads. Yet, they lack of realistic local climatic data in urban context due to the density and UHI. Moreover, building refurbishments modify locally and globally the UHI as reported by Santamouris [67] through many study

results on the impact of cool roofs on the peaks of ambient temperature in urban context.

Locally, the surface temperatures modify the building cooling loads, especially in confined spaces such as street canyons. The effects of facade cool coatings in these streets have been investigated here with the same case study presented Figure 9, same model and climatic conditions (Athens, Greece). The pavements were considered to have a constant albedo ($\rho = 0.40$). The refurbishment of the dark facades ($\rho = 0.20$) with white coatings ($\rho = 0.83$) cut the peaks of absorbed solar radiations as represented for one day in Figure 12.

Results The solar radiations' interchange strongly increases, and thus the absorbed flux during the morning due to radiative interchange, which is accentuated in the lowest parts of the facade (Figure 12). Then, the exposure time to solar irradiance is increased by interchange effects with less absorbed energy

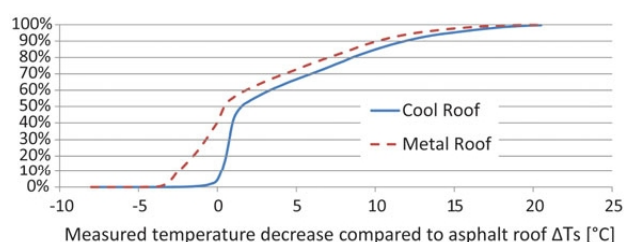


Figure 11. Cumulative frequencies of surface temperature decrease $T_{reference} - T_{sample}$ for 2 samples (cool roof and metal roof) compared with a reference asphalt roof, for a 3-month period from June to August.

Table 2. Radiative characteristics of roof membrane samples.

Sample	Asphalt membrane	Metal roof	Cool roof membrane (reference)
Thermal emissivity ϵ	0.84	0.06	0.86
Albedo ρ	0.22	0.82	0.73

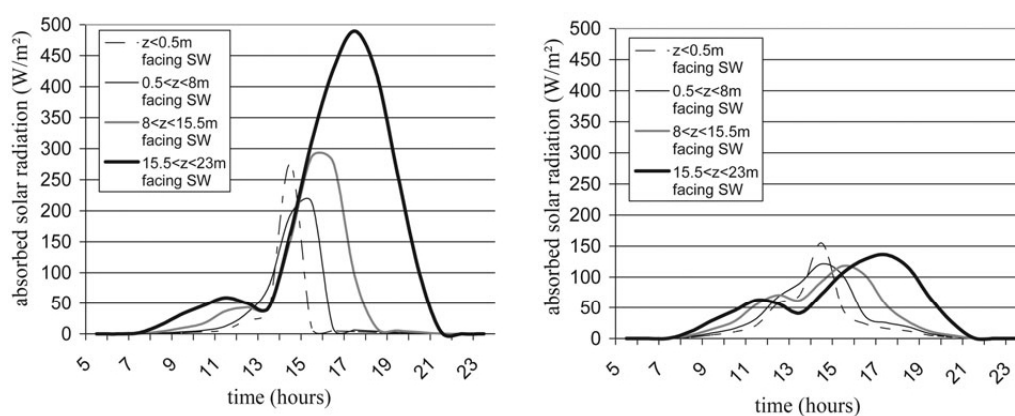


Figure 12. Absorbed solar radiation for the SW-exposed facade of a street canyon (21 July) with dark (a) and white facades (b).

during the day, which would be valuable for better daylight within the street (and the flats) and the mitigation effect on facades temperatures, the street air temperatures and building energy demand. From the coupled simulation results (see Figure 9), for the 21th of July, the maximum surface temperatures of the dark facade varies from 38.5°C (bottom) to 52.5°C (top). The white coating affects these facade temperatures that vary from 34.1 (bottom) to 38.7°C (top). The reduction of daily solar radiation absorbed by the facades has a direct impact on street air temperatures, with a maximum decrease of 5.6°C during the studied period [7]. This calculation of coupled effects of cooled building together with the street microclimate can help to have a better assessment of the building energy performance in an urban context taking into account correctly the radiation trapping and the thermal confinement of dense urban areas.

3.2.2 The study of green coatings

In a first approach, using SOLENE-microclimat, Bouyer *et al.* [71] have studied the impact of trees and natural soil, compared with mineral environment (Figure 13; [71]), on buildings' energy demand. The case study is a modern office building in Lyon (France). For a typical winter week, they found a difference of less than 1%, the heating loads being slightly higher in the 'green' case, because of the residual shading of trees. For the summer week, sensible cooling loads are reduced by 10% in the green case while latent loads are increased by 12%; but due to their relative order of magnitude, the total cooling loads are reduced by 9%. It has to be noted that the variations in the results due to the different assumptions in modeling (shades, long-wave radiations, convection...) are higher than those attributed to the kind of surface examined. So, this emphasizes that before comparing the effects of different surrounding surfaces, it is important to make sure that the model represents correctly the exchanges with the surrounding.

To assess the direct and indirect impacts of vegetation on buildings' energy consumption, Malys [72] has added green roofs and green walls into this model. The green wall model has been

calibrated using the data acquired by LEEA laboratory; Figure 14 from [72] (HEPIA, Reto Camponovo et Peter Gallinelli).

The results of this developed model have been first calibrated using local data (wall, ground air temperatures). The effects of three kinds of green coatings are then compared: walls, roofs, soil. The results are obtained for a central building, surrounded with other similar buildings (Figure 15 from [49]) and taking into account the distribution of the building windows. Two configurations are tested: insulated and non-insulated. For the

summer period, the results show that green walls cool efficiently the surroundings, mainly by the way of long-wave radiation. Indeed, in dense cities, a building surrounded by other buildings coated with green walls releases more energy by long-wave radiation due to the lower temperatures of the surrounding walls. The same phenomenon also influences comfort in the outdoor spaces. In this study, green roofs have less impact on buildings energy consumption because their effects are limited to the upper level of the buildings.

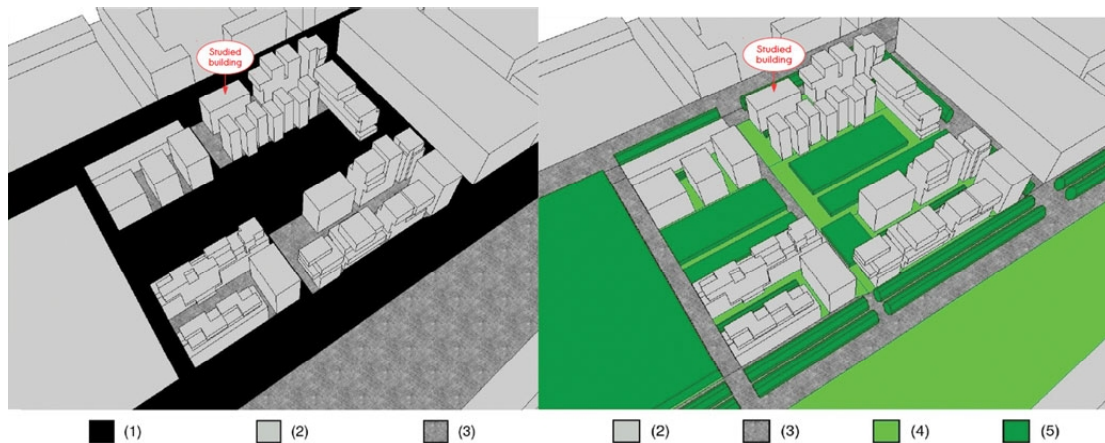


Figure 13. Vegetated and mineral scenario (1) black asphalt; (2) concrete; (3) sandstone paving; (4) turf; (5) tree crowns.



Figure 14. Green walls used for model calibration, LEEA laboratory, HEPIA.

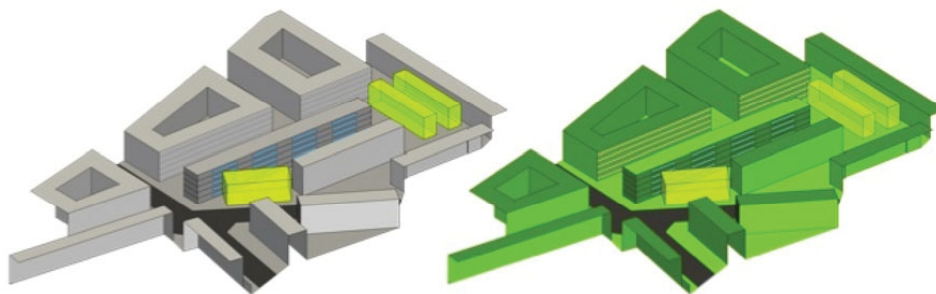


Figure 15. Studied district and location of green coatings (dark grey).

4 CONCLUSIONS

We reviewed various urban microclimate models at different scales and their capabilities in coupled approaches. These modeling techniques become more and more comprehensive with a more detailed description of urban areas. Once the urban scales properly detailed, a compromise must be found considering the modeling accuracy, the computing capabilities, the data availability and the effort required to enhance these models. This consistency relative to the objectives remains the basis of any modeling methodology as it was illustrated for the different case studies here. It can be expected, with the increasing computing powers, that the coordination between simulation tools and urban databases will provide the necessary documentation to represent the urban microclimate characteristics in greater details. This breakthrough would certainly be very valuable in terms of understanding and knowledge of the underlying phenomena, in addition to highlight the various impacts of urban parameters (type of buildings, land use, anthropogenic processes, . . .) on microclimate and UHI mitigation.

We have shown the importance of these modeling techniques to study the impact of urban fabric on the temperatures, humidity and heat fluxes at different scales, and finally the UHI. The global effectiveness of these solutions requires further developments and stronger coupling methods to assess the footprint of a district to the other microclimates throughout heat and mass transfers between streets and the complex thermal behavior of buildings. By developing these approaches, we would be able to evaluate in a more realistic and accurate way the energy performance at larger urban scales and the UHI effects locally in correlation with urban planning.

As highlighted through the studies and the results presented in this paper about the impacts of UHI mitigation techniques, the developed models require a complex integration of various specialized modeling approaches for each phenomenon like multi-reflections, evapotranspiration, hydrological fluxes, etc. The close relationships between these phenomena make it difficult to assert general results. Indeed, in the last case study, it was found that green facades were more efficient than green roofs for building energy demand, but the results could have been different for other built configurations of urban morphologies. Similarly, the results presented at the neighborhood scale on the impact on microclimate of water management techniques are very sensitive to the vegetation type and to the ability of plants to generate evapotranspiration.

It is thus necessary to compare these numerical experiments to measurement campaigns or long-term observation periods of the processes involved in urban microclimate [73–75] or on climate models at the urban fragment scale such as an urban street canyon [76]. However, for real urban fragments, which consist of a variety of surfaces (built or natural), the validation process first requires the knowledge of a wide range of data on buildings' operation and physical properties of urban surfaces (building envelopes and soil). Beyond the implementation of

experimental methods for collecting the necessary data for model assessment, it appears that the main obstacle to progress lies into possessing a detailed knowledge of the input data. This lies on strong collaboration between several research domains including remote sensing, geographical databases, etc.

REFERENCES

- [1] Dupont S, Otte TL, Ching JKS. Simulation of meteorological fields within and above urban and rural canopies with a mesoscale model. *Boundary-Lay Meteorol* 2004;113:111–58.
- [2] Lemonsu A, Masson V. Simulation of a summer urban breeze over Paris. *Boundary-Lay Meteorol* 2002;104:463–90.
- [3] Leroyer S, Calmet I, Mestayer PG. Urban boundary layer simulations of sea-breeze over Marseille during the ESCOMPTE experiment. *Int J Environ Pollut* 2010;40:109–22.
- [4] Martilli A, Clappier A, Rotach MW. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. *Boundary-Lay Meteorol* 2002;104:261–304.
- [5] Ali-Toudert F. Dependence of outdoor thermal comfort on street design [PhD thesis]. Meteorologischen Institutes - Universitat Freiburg, 2005.
- [6] Bouyer J. Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments [PhD thesis]. Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes (France), 2009.
- [7] Doya M, Bozonnet E, Allard F. *Theoretical Evaluation of Energy Performance Achieved by Cool Paints for Dense Urban Environment*. CLIMAMED 2007 Energy, Climate and Indoor Comfort in Mediterranean Countries, Genoa, Italy, 2007.
- [8] Gros A, Bozonnet E, Inard C. *Modeling the Building Energy Demand at District Scale*. ICUC8, 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland, 2012.
- [9] Robitu M, Musy M, Inard C, et al. Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Sol Energy* 2006;80:435–47.
- [10] Tewari M, Kusaka H, Chen F, et al. Impact of coupling a microscale computational fluid dynamics model with a mesoscale model on urban scale contaminant transport and dispersion. *Atmos Res* 2010;96:656–64.
- [11] Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *Int J Climatol* 2011;31:273–88.
- [12] Andrieu H, Chocat B. Introduction to the special issue on urban hydrology. *J Hydrol* 2004;299:163–5.
- [13] Dupont S, Mestayer PG, Guilloteau E, et al. Parameterization of the urban water budget with the submesoscale soil model. *J Appl Meteorol Climatol* 2006;45:624–48.
- [14] Masson V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound-Lay Meteorol* 2000;94:357–97.
- [15] Grimmond CSB, Blackett M, Best MJ, et al. The international urban energy balance models comparison project: First results from phase 1. *J Appl Meteorol Clim* 2010;49:1268–92.
- [16] Grimmond CSB, Blackett M, Best MJ, et al. Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison. *Int J Climatol* 2011;31:244–72.
- [17] Bertolo L, Bourges B. Données climatiques utilisées dans les programmes de simulation. *Techniques de l'Ingénieur*. 1992.
- [18] Kikegawa Y, Genchi Y, Yoshikado H, et al. Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming

- countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands. *Appl Energ* 2003;76:449–66.
- [19] Salamanca F, Martilli A. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations-part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theor Appl Climatol* 2010;99:345–56.
- [20] Salamanca F, Krpo A, Martilli A, et al. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations-part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model. *Theor Appl Climatol* 2010;99:331–44.
- [21] Sharifi A, Murayama A. A critical review of seven selected neighborhood sustainability assessment tools. *Environ Impact Assess Rev* 2013;38:73–87.
- [22] González A, Donnelly A, Jones M, et al. A decision-support system for sustainable urban metabolism in Europe. *Environ Impact Assess Rev* 2013;38:109–19.
- [23] Rodriguez F, Andrieu H, Morena F. A distributed hydrological model for urbanized areas. Model development and application to urban catchments. *J Hydrol* 2008;351:268–87.
- [24] Mitra Z, Chrysoulakis N, Kamarianakis Y, et al. Improving the estimation of urban surface emissivity based on sub-pixel classification of high resolution satellite imagery. *Remote Sens Environ* 2012;117:125–34.
- [25] Grimmond CSB, Oke TR. Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *J Appl Meteorol* 2002;41:792–810.
- [26] Dupont S, Mestayer PG. Parameterization of the urban energy budget with the submesoscale soil model. *J Appl Meteorol Climatol* 2006;45:1744–65.
- [27] Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models. *Bound-Lay Meteorol* 2001;101:329–58.
- [28] Hamdi R, Masson V. Inclusion of a drag approach in the Town Energy Balance (TEB) scheme: offline 1D evaluation in a street canyon. *J Appl Meteorol Climatol* 2008;47:2627–44.
- [29] Masson V, Seity Y. Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes. *J Appl Meteorol Climatol* 2009;48:1377–97.
- [30] Lee S-H, Park S-U. A vegetated urban canopy model for meteorological and environmental modelling. *Bound-Lay Meteorol* 2008;126:73–102.
- [31] Mitchell VG, Mein RG, McMahon TA. Modelling the urban water cycle. *Environ Modell Soft* 2001;16:615–29.
- [32] Nakayama T, Fujita T. Cooling effect of water-holding pavements made of new materials on water and heat budgets in urban areas. *Landscape Urban Plan* 2010;96:57–67.
- [33] Feddes R, Hoff H, Bruin M, et al. Modelling root water uptake in hydrological and climate models. *B Am Meteorol Soc* 2001;82:2797–809.
- [34] Xiao Q, McPherson EG, Simpson JR, et al. Hydrologic processes at the urban residential scale. *Hydrol Processes* 2007;21:2174–88.
- [35] Jia Y, Ni G, Kawahara Y, et al. Development of WEP model and its application to an urban watershed. *Hydrol Processes* 2001;15:2175–94.
- [36] Dietz ME. Low impact development practices: a review of current research and recommendations for future directions. *Water, Air, Soil Pollut* 2007;186:351–63.
- [37] Bedan ES, Clausen JC. Stormwater runoff quality and quantity from traditional and low impact development watersheds1. *JAWRA J Am Water Resour Assoc* 2009;45:998–1008.
- [38] Göbel P, Stubbe H, Weinert M, et al. Near-natural stormwater management and its effects on the water budget and groundwater surface in urban areas taking account of the hydrogeological conditions. *J Hydrol* 2004;299:267–83.
- [39] Mentens J, Raes D, Hermy M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century. *Landscape Urban Plan* 2006;77:217–26.
- [40] Dimoudi A, Nikolopoulou M. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energ Build* 2003;35:69–76.
- [41] Rodriguez F, Morena F, Andrieu H, et al. Introduction of innovative storm-water techniques within a distributed hydrological model and the influence on the urban catchment behaviour. *Water Pract Technol* 2007;2:757–64.
- [42] Ruban V, Rodriguez F, Lamprea-Maldonado K, et al. Le secteur atelier pluridisciplinaire(SAP), un observatoire de l'environnement urbain – présentation des premiers résultats du suivi hydrologique et microclimatique du bassin du Pin Sec (Nantes). *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées - Spécial «Eau et environnement», tome 2 - Hydrologie quantitative et crues* 2010;5–18.
- [43] Gastellu-Etchegorry J-P, Zagolski F, Romier J. A simple anisotropic reflectance model for homogeneous multilayer canopies. *Int J Remot Sens* 1996;57:22–38.
- [44] Groleau D, Fragnaud F, Rosant J-M. Simulation of the radiative behavior of an urban quarter of Marseille with the Solene model. *ICUC5, Fifth International Conference on Urban Climate*, 2003.
- [45] Miguet F, Groleau D. *Urban Bioclimatic Indicators for Urban Planers with the Software Tool SOLENE*. IOS PRESS, 2007, 348–55.
- [46] Lindberg F, Holmer B, Thorsson S. SOLWEIG 1.0 modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *Int J Biometeorol* 2008;52:697–713.
- [47] Huttner S, Bruse M. *Numerical Modeling of the Urban Climate—a Preview on ENVI-MET 4.0*. 2009, 4.
- [48] Robitu M. Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain: influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs [PhD thesis]. Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes (France), 2005.
- [49] Malys L, Musy M, Inard C. Microclimate and buildings energy consumption: sensitivity analysis of coupling methods. *Eighth International Conference on Urban Climate and 10th Symposium on the Urban Environment*, 2012.
- [50] Chen H, Ooka R, Huang H, et al. Study on the impact of buildings on the outdoor thermal environment based on a coupled simulation of convection, radiation, and conduction. *ASHRAE Transact* 2007;113:478–485.
- [51] Chen H, Ooka R, Huang H, et al. Study on mitigation measures for outdoor thermal environment on present urban blocks in Tokyo using coupled simulation. *Build Environ* 2009;44:2290–9.
- [52] Alexandri E, Jones P. Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: comparison with experimental results. *Build Environ* 2007;42:2835–49.
- [53] Lahme E, Bruse M. Microclimatic effects of a small urban park in densely built-up areas: measurements and model simulations. *ICUC5, Fifth International Conference on Urban Climate*, 2003.
- [54] Bruse M, Fleer H. On the simulation of surface-plant-air interactions inside urban environments. *Environ Modell Soft* 1998;13:373–84.
- [55] Jesionek K, Bruse M. Impacts of vegetation on the microclimate: modeling standardized building structures with different greening level. *ICUC5, Fifth International Conference on Urban Climate*, 2003.
- [56] Akbari H, Bretz S, Kurn DM, et al. Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs. *Energ Build* 1997;25:117–26.
- [57] Doya M. Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense [PhD thesis]. Université de La Rochelle, 2010.
- [58] Hoyano A, Iino A, Ono M, et al. Analysis of the influence of urban form and materials on sensible heat flux—a case study of Japan's largest housing development “Tama New Town”. *Atmos Environ* 1999;33:3931–9.
- [59] Huang Y. Methodology of climatic design of urban district for buildings energy efficiency. [PhD thesis] Ecole Centrale de Nantes (France) & Huazhong University (China), 2010.

- [60] Santamouris M, Papanikolaou N, Livada I, *et al.* On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Sol Energ* 2001;**70**:201–16.
- [61] Sailor DJ, Lu L. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmos Environ* 2004;**38**:2737–48.
- [62] Robinson D, Campbell N, Gaiser W, *et al.* SUNtool – a new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability. *Sol Energ* 2007;**81**:1196–211.
- [63] Robinson D, Haldi F, Kampf J, *et al.* *CitySim: Comprehensive Microsimulation Of Resource Flows for Sustainable*. Glasgow, 2009, 1083–90.
- [64] de la Flor Sanchez, Lissen Salmeron, Dominguez Alvarez. A new methodology towards determining building performance under modified outdoor conditions. *Build Environ* 2006;**41**:1231–8.
- [65] Bozonnet E. Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments: Cas de la rue canyon. [PhD thesis] Université de La Rochelle (France), 2005.
- [66] Bozonnet E, Belarbi R, Allard F. Thermal behaviour of buildings: modelling the impact of urban heat island. *J Harbin Institute of Technology* 2007; **14**(Sup.):19–22.
- [67] Santamouris M. Cooling the cities—a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Sol Energ* 2012; DOI 10.1016/j.solener.2012.07.003.
- [68] Synnefa A, Santamouris M. Advances on technical, policy and market aspects of cool roof technology in Europe: the cool roofs project. *Energ Build* 2012;**55**:35–41.
- [69] Clerjaud L, Trabelsi A, Bozonnet E, *et al.* *Impact des revêtements de toitures (cool roofs) et des lanterneaux sur la performance énergétique et le confort des bâtiments industriels basse consommation. Matières et matériaux pour l'enveloppe du bâtiment - Outils, mesures et méthodes*. CoDEM, 2012, 305–15.
- [70] Bozonnet E, Doya M, Allard F. Cool roofs impact on building thermal response: a French case study. *Energ Build* 2011;**43**:3006–12.
- [71] Bouyer J, Inard C, Musy M. Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energ Build* 2011;**43**:1549–59.
- [72] Malys L. Évaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments. [PhD thesis] Ecole Centrale de Nantes (France), 2012.
- [73] Berthier E, Dupont S, Mestayer PG, *et al.* Comparison of two evapotranspiration schemes on a sub-urban site. *J Hydrol* 2006;**328**:635–46.
- [74] Mestayer P, Rosant J-M, Rodriguez F, *et al.* The experimental campaign FluxSAP 2010: climatological measurements over a heterogeneous urban area. *Int Assoc Urb Climate* 2011;**40**:22–30.
- [75] Hénon A, Mestayer PG, Groleau D, *et al.* High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in Marseilles city center during the UBL-ESCOMPTE campaign. *Build Environ* 2011;**46**:1747–64.
- [76] Idczak M, Groleau D, Mestayer PG, *et al.* An application of the thermo-radiative model SOLENE for the evaluation of street canyon energy balance. *Build Environ* 2010;**45**:1262–75.