

— QUELLE SERA LA PEAU DE LA VILLE DE DEMAIN ? NOTE SUR LES MATÉRIAUX URBAINS ET LEUR IMPACT CLIMATIQUE

Marjorie Musy, Directrice de recherche
Cerema Ouest

Courriel :
marjorie.musy@cerema.fr

RÉSUMÉ

L'attrait pour les recherches orientées en faveur d'objets isolés est somme toute intéressant ; toutefois, les focus sur des dispositifs ou des surfaces font parfois oublier l'enjeu global de la conception urbaine qui tend à favoriser une approche intégrative de plusieurs composants considérés jusqu'alors comme juxtaposés. C'est pourquoi, il nous semble opportun de porter une réflexion sur les surface de la ville depuis les modes d'occupation des sols en ajoutant l'ensemble des surfaces et des éléments verticaux (façades, arbres, murs, éléments routiers tels que les ponts, etc.). L'article se propose de recenser une série de recherches en la matière et de montrer l'impact climatique de différents types de surfaces ou matériaux étudiés (les toits, les sols, les façades, les revêtements du sol). L'accumulation de ces éléments permettra un classement des solutions de rafraîchissement et d'imaginer des compositions urbaines nouvelles.

MOTS-CLÉS

Climat, surface urbaine, matériaux

ABSTRACT

The attraction for research oriented in favour of isolated objects is all in all interesting ; however, the focus on devices or surfaces sometimes makes us forget the global challenge of urban design which tends to favour an integrative design of several components considered hitherto as juxtaposed. That's why it seems appropriate to reflect on the surface of the city from the modes of land use by adding all surfaces and vertical elements (facades, trees, walls, road elements such as bridges, etc.). The article aims to identify a series of research in this field and to show the climatic impact of different types of surfaces or materials studied (floors, facades, floor coverings). The accumulation of these elements will allow a classification of the cooling solutions and to imagine new urban compositions.

KEYWORDS

Climate, urban surface, materials.

—

— INTRODUCTION : LES ENJEUX DES SURFACES URBAINES

Ces dernières années, de nombreux travaux de recherches ont porté sur les impacts de la densification des villes et l'artificialisation des sols. Ceux-ci ont été explorés sous différents angles - tels que l'hydrologie, l'énergie, le climat, les ambiances urbaines, l'acoustique, la biodiversité, la qualité de l'air entre autres - et par l'intermédiaire de projets de recherche d'envergure comme VegDUD¹ Trame Verte², Epicea³ parmi d'autres (Akbari, 1992; Alexandri & Jones, 2006; Clergeau & Blanc, 2013; CSTB, Meteo France, APUR, & APC, 2013; Musy, 2014). Parallèlement, des mesures d'atténuation de ces impacts ont également fait l'objet de recherches et de développements. Parmi ceux-ci, le cas de la végétation a particulièrement mobilisé de nombreux chercheurs (Clergeau & Blanc, 2013; Musy, 2014). Les toitures, en tant que support d'accueil de ces formalisations du végétal en milieu urbain, ont été fortement étudiées, avec deux alternatives davantage explorées, à savoir : les *green roofs* et les *cool roofs* (Akbari, Levinson, & Rainer, 2005; Ascione, Bianco, Rossi, Turni, & Vanoli, 2013; Bozonnet, Doya, & Allard, 2011; Coutts, Daly, Beringer, & Tapper, 2013; Gentle, Aguilar, & Smith, 2011).

L'attrait pour les recherches orientées en faveur d'objets isolés est somme toute intéressant ; toutefois, les focus sur des dispositifs ou des surfaces font parfois oublier l'enjeu global de la conception urbaine qui tend à favoriser une conception intégrative de plusieurs composants considérés jusqu'alors comme juxtaposés. C'est pourquoi, il nous semble opportun de porter une réflexion sur la surface de la ville dans son ensemble et dans son développement au moyen de la 3D. Plus spécifiquement, il s'agit ici d'aborder ce thème du point de vue des modes d'occupation des sols, en ajoutant l'ensemble des surfaces et des éléments verticaux (façades, arbres, murs, éléments routiers tels que les ponts, etc.). En effet, les proportions relatives de l'emprise des différents types de surfaces varient fortement avec la densité. Pour exemple, dans les quartiers les plus denses, la surface de façades peut être très élevée au regard de celles des autres types de surfaces ; *a contrario*, dans les quartiers moins denses ou possédant des hauteurs moins élevées comme les zones commerciales, ce sont les sols et les toitures qui prennent le plus d'importance.

Par ailleurs, selon les types d'approches et les thématiques abordées, la vision de cette surface prend des angles différents. Par exemple, si on aborde

1 <http://onerc.developpement-durable.gouv.fr/fr/projet/vegudud-role-du-vegetal-dans-le-developpement-urbain-durable-une-approche-par-les-enjeux-lies->

2 <http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-08-VILL-0003>

3 http://www.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=article&id_article=29997

la question du confort thermique en ville, ce sont les surfaces vues par les individus qui jouent un rôle majeur. Ainsi, pour évaluer les débits de ruissellement, d'infiltration ou d'évapotranspiration de l'eau, les hydrologues s'intéressent essentiellement aux surfaces horizontales (sols et toitures), mais peuvent également considérer l'interception de la pluie par les surfaces verticales selon leur échelle d'appréhension.

Ce sont ensuite les différentes caractéristiques des surfaces - qu'elles soient naturelles ou construites - qui sont étudiées en fonction des thématiques abordées. En général, s'agissant de l'ensemble de l'enveloppe urbaine, les recherches sont mono-thématiques et la surface urbaine dans l'ensemble de ses composantes n'a pas été envisagée pour l'ensemble de ses fonctions et de ses impacts, dans une visée systémique. Ces approches vont très certainement se développer car des techniques d'acquisition de la donnée tridimensionnelle urbaine, basée sur les technologies Lidar (Weinmann, Urban, Hinz, Jutzi, & Mallet, 2015) et de télédétection hyperspectrale (Hardin & Hardin, 2013) sont en cours de développement et permettront, à terme, de développer une connaissance jusqu'alors indisponible de la surface et des matériaux qui la compose.

Après avoir donné quelques repères conceptuelles sur la composition de la surface urbaine, nous illustrerons quelques pratiques innovantes en matière de fonctionnalités des sols, des toits et des façades. Nous présenterons ensuite un bref bilan de leurs impacts climatiques.

— DENSITÉ ET SURFACE URBAINE DÉVELOPPÉE : VERS UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE, REPÈRES

Quelle est la surface relative des rues, des toits, des façades ou encore des sols naturels dans nos villes ? La réponse à cette question n'est pas facile à trouver. Les données les plus accessibles sont celles des modes d'occupation des sols et en particulier celles relatives à l'empreinte bâtie (également surface horizontale de toitures), aux surfaces imperméabilisées et aux surfaces végétales. Le tableau 1 donne quelques valeurs pour les surfaces horizontales, qui peuvent varier selon le mode d'obtention des données et les surfaces de référence prises en compte. On constate que dans les grandes villes, les sols imperméabilisés représentent au moins 30% de la couverture de sols et que le total des toits et des sols imperméabilisés représente toujours plus de 50%. Ceci explique certainement l'intérêt qui a été porté à ces surfaces.

% de surface couverte Ville	Sols imperméabilisés	Végétation	Toits/bâti	Référence
Salt Lake City (ville entière)	36.4	33.3	21.9	(Hashem Akbari & Rose, 2008)
Sacramento	44.5	20.3	19.7	
Huston	29.2	37.1	21.3	
Chicago	37.1	26.7	24.8	
Paris intramuros	33	17	47	(Colombert, 2008)
Paris	30	20	40	(Rhein & Palibril, 2014)
Nantes	35,2	41,5	16,1	Données URBIO
Angers	31,6	49,4	13,7	
La Roche Sur Yon	14,9	78,4	14,9	

Tableau 1 : Pourcentage d'occupation des sols par grands types de surface (source : Marjorie Musy)

Par contre, la surface développée⁴ a peu été étudiée, sauf par les chercheurs qui travaillent sur le piégeage radiatif des villes. Selon une étude de Groleau & Mestayer sur quatre quartiers de Nantes (Groleau & Mestayer, 2013), on constate que la participation des façades à la surface développée (Tableau 2), va de 20% dans les quartiers les moins denses à presque 60% dans la zone la plus dense. La surface d'enveloppe bâtie, représente quant à elle de 34 à presque 84% de cette surface développée. L'enjeu de ces surfaces, en fonction de la densité du quartier peut donc s'avérer important.

⁴ Total des superficies hors œuvre (surface mesurée à l'extérieur des murs) des différents niveaux du bâtiment. Les sous-sols, caves, combles et greniers sont généralement décomptés que pour la moitié de leur superficie réelle.

Quartier	Densité de façade (surface de façade/ surface développée du quartier)	Emprise au sol (surface bâtie / surface au sol du quartier)	Densité de surface de bâtiment (surface d'enveloppe bâtie/ surface développée du quartier)
Nantes - Douve (individuel dispersé)	19,1	18,5	34,1
Nantes - Baugerie (collectif peu dense)	25,2	18	38,7
Nantes - La Télindière (individuel en bandes)	31,7	21,8	46,6
Nantes - Graslin (Centre ville ancien)	57	62	83,7

Tableau 2 : Pourcentage de la surface urbaine développée par types (façade, toit ou surfaces bâtie, total de l'enveloppe du bâtiment) (source : Groleau et Mestayer, 2013)

C'est ce que semble indiquer la loi française de reconquête de la biodiversité de la nature et des paysages promulguée le 8 août 2016. Cette loi prévoit que l'autorisation d'exploitation commerciale des magasins dont la demande de permis de construire est déposée à compter du 1er mars 2017 sera accordée à condition qu'ils respectent un certain nombre de conditions environnementales, parmi lesquelles on citera :

- « 1° Sur tout ou partie de leurs toitures, et de façon non exclusive, soit des procédés de production d'énergies renouvelables, soit un système de végétalisation basé sur un mode cultural garantissant un haut degré d'efficacité thermique et d'isolation et favorisant la préservation et la reconquête de la biodiversité, soit d'autres dispositifs aboutissant au même résultat ;
- « 2° Sur les aires de stationnement, des revêtements de surface, des aménagements hydrauliques ou des dispositifs végétalisés favorisant la perméabilité et l'infiltration des eaux pluviales ou leur évaporation et préservant les fonctions écologiques des sols »⁵.

Même s'ils laissent encore beaucoup de degrés de liberté tant dans la conception que dans l'appréciation du résultat, ces textes réglementaires marquent un changement. Pour ces nouveaux projets, sols, toitures et façades devront

⁵ Loi n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages - Article 86

faire l'objet d'une attention particulière et être le support de fonctions environnementales ou tout au moins prouver un impact positif. La réglementation est nouvelle. Elle prolonge ainsi les recherches en matière de réduction des impacts environnementaux des surfaces construites et de multifonctionnalité urbaine. La surface urbaine doit être envisagée dans l'ensemble de ses composantes et pour l'ensemble de ses fonctions et de ses impacts, dans une visée systémique.

— LA PROPOSITION DE NOUVELLES FONCTIONS POUR LES SURFACES

LES TOITS

Les toits, cinquième façade des bâtiments étaient, jusqu'à récemment, des surfaces inexploitées si ce n'est pour y implanter les équipements techniques des bâtiments tels que des centrales de traitement de l'air, des panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques, des microéoliennes. En d'autres termes, il s'agissait davantage d'ajouts techniques que d'un travail réel sur la surface-toit. Deux autres situations peuvent être distinguées :

- Des caractéristiques particulières de la toiture peuvent être modifiées, afin d'améliorer sa performance : par exemple les toitures végétalisées, les toitures bassin, les toitures bleues ou les toitures réfléchives qui correspondent à l'amélioration de performances vis-à-vis de l'infiltration de l'eau de pluie, et/ou de la thermique du bâtiment. Ces surfaces peuvent alors également améliorer d'autres fonctions écosystémiques, comme la biodiversité et la qualité de l'air pour les toitures vertes.
- Des usages nouveaux peuvent être attribués à cette surface : la culture ou le captage solaire par l'intégration à la surface de panneaux solaires par exemple.

LES SOLS

La route et les autres surfaces destinées à la circulation peuvent représenter une part importante de la surface au sol de la ville. Elles représentent aussi la caractéristique d'être fortement sollicitées, par le trafic qu'elles accueillent, mais aussi par le sous-sol et ce qu'il contient : eau, racines de végétaux, réseaux sur lesquels il est régulièrement nécessaire d'intervenir. Toutefois, ces surfaces font l'objet de propositions pour les rendre plurifonctionnelles. Il s'agit soit de leur ajouter des fonctions, soit de réduire leurs impacts environnementaux.

Dans le premier cas, on citera les routes solaires⁶, celles intégrant des échangeurs de chaleur (Nasir, Hughes, & Calautit, 2015) ; dans le second, on mentionnera les revêtements poreux (permettant soit l'infiltration pour la gestion de l'eau de pluie soit la remontée de l'eau pour le rafraîchissement d'été) (Nakayama & Fujita, 2010), réfléchifs (Wong, 2008), à liant végétal, acoustiques, etc.

LES FAÇADES

Depuis quelques années nous assistons à l'émergence de matériaux aux caractéristiques de plus en plus diversifiées qui se prêtent à des utilisations multiples. Cette gamme très variée de nouveaux produits évolue à partir de matériaux anciens ou plus récents, dans une hybridation donnant naissance à des produits aux caractéristiques parfois « intelligentes », c'est-à-dire actives, sensibles et capables de réagir à des variations de leur environnement ou à des variations des exigences en terme de propriétés et de performances. Les concepteurs ont à disposition une gamme de matériaux aux atouts spécifiques : économie d'énergie ou de matière, performances lumineuses, thermiques, aérauliques et acoustiques. C'est le cas des matériaux verriers qui ont connu ces dernières années de profondes avancées, permettant aux façades de verre d'être à la fois esthétiques et efficaces en terme de maîtrise des ambiances, grâce à l'évolution du concept de façade dissociant désormais la structure de l'enveloppe. De la sorte, les parois de verre s'animent en fonction des besoins des occupants, elles sont évolutives grâce à l'intégration d'équipements divers ou deviennent actives, voire productives d'énergie.

Les façades opaques ont également connu de grandes évolutions avec l'emploi de matériaux dépolluants ou autonettoyants, de matériaux permettant l'accueil de plantes, voire de façades plantées. Au delà de sa fonction esthétique, on assiste progressivement à un détournement de la façade qui commence à être activée en jouant un rôle vers le milieu extérieur. Cependant, on comprend bien que les impacts de la façade sur l'extérieur restent secondaires. En effet, l'effort est porté en direction de l'efficacité de la façade en fonction de l'usage du bâtiment. Exclure ce type d'impacts dans la conception peut générer des coûts élevés, comme nous avons pu le constater dans la conception de la tour surnommée le « Talkie-Walkie » à Londres. Cet objet architectural joue le rôle de four solaire selon les degrés d'exposition au soleil, concentrant les rayons vers les bâtiments et trottoirs voisins.

6 http://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/transports/la-premiere-route-solaire-de-france-inauguree-dans-l-orne_109165

— LES IMPACTS CLIMATIQUES DES SURFACES URBAINES

L'impact de différents types de surfaces ou matériaux a été étudié de l'échelle de l'entité elle-même (le matériau, la toiture) jusqu'à leur application à la ville en passant par l'échelle du fragment urbain (allant de la rue au quartier). A l'échelle des surfaces, ce sont les propriétés thermiques du matériau qui sont étudiées et reliées à l'évolution de la température de la surface en conditions climatiques réelles ou reproduites. A l'échelle du fragment urbain, c'est l'effet de la mise en place d'une telle surface dans un environnement formel (forme de rue, place, forme urbaine) et climatique particulier qui est observé et en général comparé à d'autres solutions.

Enfin, à l'échelle de la ville, les études portent pour l'essentiel sur la mise en relation de la (projection spatiale d'une) quantité d'un type de surface (et éventuellement sa répartition spatiale) et de la réponse climatique du tissu urbain. Nous reprendrons essentiellement les études à l'échelle du matériaux et donnerons des résultats d'applications aux autres échelles qui seront toujours relatives à la situation étudiée. Les toitures, qui sont les surfaces qui voient le plus le soleil sont celles qui ont été le plus étudiées, notamment en raison des impacts qu'elles ont sur les consommations énergétiques des bâtiments. Ce sont ensuite les sols, et enfin les façades.

LES TOITS

Pour les toits, deux alternatives ont été plus particulièrement explorées : les « green roofs » et les « cool roofs » (Akbari et al., 2005; Ascione et al., 2013; Bozonnet et al., 2011; Coutts et al., 2013; Gentle et al., 2011).

TOITURES VÉGÉTALES

L'utilisation de toitures végétales (Figure 1) a en premier lieu été proposée pour répondre aux problématiques d'imperméabilisation des sols et de gestion des fortes pluies. Elles ont ensuite été étudiées pour leurs effets d'isolation thermique du bâtiment et leurs effets sur le climat urbain. Concernant la thermique du bâtiment, il a été montré que les toitures végétales pour des bâtiments peu isolées permettaient d'améliorer le confort d'été et les consommations énergétiques liées au rafraîchissement, en particulier pour les bâtiments peu isolés, mais très peu pour les bâtiments bien isolés (Malys, 2012). Concernant les impacts climatiques, (Morakinyo, Dahanayake, Ng, & Chow, 2017) ont réalisé une analyse paramétrique de l'effet de quatre types de toitures végétales sur les températures extérieures sous quatre différents types de climat et trois niveaux de densité de feuillage des toitures, en utilisant l'outil de simulation ENVI-met (microclimat à l'échelle du quartier). Les résultats montrent un réchauffement des températures extérieures noc-

turne limité à 0.2 °C et des effets de rafraîchissement variant de 0.4 à 1.4 °C, en fonction du type de toiture, de la densité et du moment de la journée. Ces réductions diurnes dépendent également du type de climat, avec un effet décroissant pour, dans l'ordre: climats chaud et sec, chaud et humide, et tempéré. Dans les régions chaudes et humides, le potentiel de rafraîchissement par évaporation est réduit par le fort taux d'humidité.

L'effet des toitures végétales sur l'îlot de chaleur urbain est étudié soit par l'extrapolation un peu délicate d'un effet petit échelle (Costanzo, Evola, & Marletta, 2016), soit par simulation d'un verdissement des toits à grande échelle. C'est ce qu'a réalisé (de Munck, 2013) qui montre, pour la ville de Paris que cette solution permet un abaissement de la température dans les rues en cas de canicule qui peut atteindre 0,5 °C si tous les toits plats de Paris sont végétalisés et arrosés.



Figure 1 : Toiture végétalisée de l'Université de Nantes (source : xxx)

TOITURES RÉFLECTIVES OU « COOL ROOFS »

Les « Cool roofs » sont une surface extérieure des toitures, ou un revêtement de surface qui minimise l'absorption des rayonnements solaires et maximise l'émission dans l'infrarouge (Bozonnet et al., 2011; Coutts et al., 2013; Gentle et al., 2011). Ils maintiennent ainsi la température de surface à une valeur basse et réduisent l'énergie transmise vers le bâtiment vers l'air de la canopée urbaine. Les surfaces les plus claires ont en général des valeurs d'albédo plus élevées que les surfaces foncées et jouent mieux ce rôle. En plus de la couleur, la rugosité et la présence de salissures influent également sur la réflectivité (Berdahl & Bretz, 1997; Levinson, Berdahl, Asefaw Berhe, & Akbari, 2005).

Ces types de toitures ont fait l'objet de nombreuses études ces dernières années (Testa & Krarti, 2017). Roman, O'Brien, Alvey et Woo (2016) ont comparé l'impact des toitures réfléchives, et de l'utilisation de matériaux à changement de phase sur l'intensité de l'îlot de chaleur urbain pour sept zones climatiques des USA. Pour chacune de ces deux stratégies, cinq types de toitures ont été étudiés. Les résultats montrent que ce sont les albédos les plus élevés qui favorisent le mieux la réduction de l'îlot de chaleur urbain quel que soit le système de toiture. Ces résultats sont basés sur le calcul des flux convectifs et ne donnent pas d'ordre de grandeur de l'effet sur l'îlot de chaleur urbain (de même pour l'étude menée par Costanzo et al., 2016). En effet, le passage de l'échelle du matériau à celle de la ville est difficile et c'est également sur la base des calculs de bilans que Touchaei, Akbari et Tessum (2016) estiment que l'augmentation de l'albédo des toitures de Montréal permettrait de réduire la température de l'air en été de jusqu'à 4°C.

LES SOLS

Les travaux sur les impacts climatiques des sols sont très nombreux. Ils concernent l'analyse des caractéristiques qui induisent le stockage du rayonnement solaire. Ceux concernant les possibilités de ces surfaces de réémettre cette chaleur par évaporation sont moins nombreux. Les résultats sont cependant difficiles à généraliser car fortement dépendant des sites d'application (climat, forme urbaine, usages, etc.). Les études les plus abouties sont :

- celles de Takebayashi et Moriyama (2012) qui comparent différents types de revêtements à base d'asphalte plus ou moins poreux, de béton, de pavés, de pelouse et de sol nus ;
- celle de Qin (2015) qui réalise un état de l'art plus général.

L'impact des types de sol sur l'îlot de chaleur urbain est également évalué à partir du flux convectif. Le classement obtenu par Takebayashi et Moriyama (2012) est le suivant : pelouse, sol nu, pavés, béton, asphalte. Les auteurs

montrent que la température de surface peut être abaissée de quelques degrés dans le cas d'asphalte poreux qui retient l'eau.

SOLS SOLAIRES

Efthymiou, Santamouris, Kolokotsa, & Koras (2016) montrent qu'en plus de produire de l'électricité qui peut être utilisée pour l'éclairage, les revêtements de sol photovoltaïques (Figure 2) permettent de réduire de jusqu'à 8°C la température de surface par rapport à des revêtements conventionnels, ce qui mène, dans leur étude à une réduction de 0,8°C de la température d'air à proximité. L'étude est menée en Grèce.

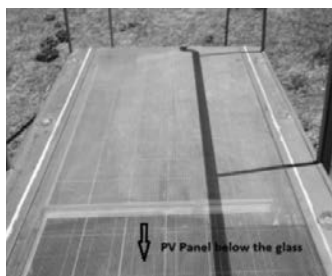


Figure 2 : Sol solaire (source : Efthymiou et al., 2016)

REVÊTEMENTS DE SOL FRAIS

Les revêtements de chaussée conventionnels sont imperméables, sombres et fortement inertes thermiquement. L'été, ils absorbent et stockent l'énergie solaire et contribuent fortement à l'ICU. L'idée d'utiliser des revêtements dits « frais » gagne du terrain. Cette appellation, regroupait dans un premier temps les sols clairs, puis les recherches ont également porté sur un autre moyen de rafraîchir les sols par leur capacité à contenir de l'eau, évaporée lors des périodes chaudes.

Santamouris (2013) et Qin (2015) font un état de l'art des techniques utilisées, mécanismes physiques mis en jeu et résultats associés. Les co-bénéfices et points de vigilance quant aux effets négatifs, coûts et enjeux réglementaires de leurs applications sont également évalués par Qin (2015). Celui-ci conclut que la définition des revêtements frais reste incomplète; que l'influence réelle de ces surfaces sur la température de l'air dans la canopée urbaine n'est pas bien connue, que l'impact de ces surfaces sur le comportement thermique des bâtiments adjacents et sur les conditions de confort des piétons est peu abordé. Beaucoup de spéculations sur l'usage des revêtements frais sont émises mais leur validation reste nécessaire.

Nous avons cependant recensé de nombreuses études et résultats à l'échelle de ces surfaces, comme ceux de Carnielo et Zinzi (2013) qui montrent que l'effet de revêtements réfléchissants (bleu, gris ou verts, cf. figure 3) sur l'asphalte permettent de diminuer de 8 à 10°C les températures de surfaces au soleil. Les rouges sont moins performants et les blancs permettent d'atteindre une chute de 20°C mais sont difficilement utilisables. Cependant, les flux solaires qui ne sont pas absorbés sont renvoyés vers les surfaces environnantes. Par simulation numérique, pour le climat italien Carnielo & Zinzi (2013) évaluent une réduction de température d'air environnant qui peut atteindre 5,5°C dans le cas de revêtements blancs.



Figure 3 : Etudes de l'impact de l'albédo des revêtements de sol (source : Carnielo & Zinzi, 2013)

Cependant Stempihar, Pourshams-Manzouri, Kaloush et Rodezno (2012) montrent que pour les matériaux à base d'asphalte, la prise en compte uniquement de l'albédo n'est pas suffisante. En effet, la porosité de la surface a également un impact important sur les transferts thermiques et la capacité de la surface à stocker la chaleur.

Une autre solution pour préserver un sol permettant un usage intense et éviter son augmentation de température est de stocker de l'eau dans sa structure de manière à ce que l'évaporation de cette eau se fasse au détriment de la montée en température (l'énergie solaire est utilisée pour l'évaporation et ne contribue pas à réchauffer le matériau). Deux solutions sont étudiées : arroser les chaussées en période chaude, dans le cas de matériaux imperméable, ou retenir l'eau dans le matériau (Asaeda & Ca, 2000; Kim, Park, Jung-Soo, & Jung-Hun, 2012; Takebayashi & Moriyama, 2012). Ces solutions permettent d'abaisser de quelques degrés la température de surface (Hendel, 2015), mais l'efficacité du système reste fortement liée à la surface en capacité d'évaporer (qui peut être augmentée par une plus grande rugosité du matériau), à la disponibilité de l'eau et dans le cas des matériaux poreux, à la non-obstruction des pores.

SOLS NUS ET VÉGÉTALISÉS

En comparaison des sols artificiels, Takebayashi & Moriyama (2012) montrent une bien plus grande capacité des sols nus et végétalisés à réduire leur température en période chaude, tant en journée que pendant la nuit. Cette moindre montée en température est liée à plusieurs caractéristiques. Les caractéristiques thermiques du sol naturel, qu'il soit support de végétation ou non, en font un matériau plus isolant. Ensuite, il retiennent mieux l'eau et ont une surface d'évaporation plus grande. En présence de végétation, le couvert végétal joue à la fois le rôle de protection solaire du sol, mais aussi présente une surface développée en capacité d'évaporer beaucoup plus grande.

FAÇADES

Peu d'études ont porté sur les façades. Contrairement aux sols et toitures, en fonction de leur environnement et de leur orientation, elles rencontrent des situations très différentes, ce qui rend les travaux peu généralisables. Les principaux travaux recensés traitent de l'impact des façades sur le confort dans la rue, et principalement des façades végétales, qui ont fait l'objet de nombreuses études récentes.

FAÇADES VÉGÉTALISÉES

L'utilisation de façades végétalisées, dans des rues avec un effet de confinement important (rapport hauteur/largeur important) permet de maintenir l'air frais. En effet, les façades couvertes de végétal, lorsqu'elles sont ensoleillées absorbent l'ensoleillement mais montent peu en température. Seule une faible partie de l'énergie solaire incidente est retransmise à l'air par convection, aux autres surfaces par rayonnement ou stockée (Allegrini, Dorer, Defraeye, & Carmeliet, 2012; Malys, Musy, & Inard, 2014). Les résultats dépendent du climat, de l'effet de confinement et de la disponibilité en eau. (Allegrini et al., 2012) montre que cet effet peut atteindre quelques degrés en climat chaud et sec.

FAÇADES À FORT ALBÉDO

Contrairement aux façades végétales, les façades revêtues de matériaux réfléchissants, s'ils montent peu en température, renvoient l'énergie vers les autres surfaces. Il est donc nécessaire que toutes les surfaces soient réfléchissantes pour éviter le piégeage radiatif dans les rues. Ceci peut cependant s'avérer très inconfortable pour les usagers de la rue qui recevront l'énergie renvoyée par les surfaces. C'est pourquoi les travaux actuels portent sur l'optimisation de la répartition des caractéristiques optiques des matériaux dans les rues (Schrijvers, Jonker, Kenjereš, & Roode, 2015), les matériaux réfléchissants restant très intéressants pour assurer le confort d'été dans les bâtiments.

— CONCLUSION

Si de nombreuses études permettent d'évaluer individuellement différents types de surfaces, en fonction des matériaux de construction et de leurs caractéristiques, et même de les comparer à situation identique, il est très difficile d'extrapoler les résultats qui seront toujours relatifs à une situation particulière, climatique, géographique et géométrique.

Des projets évaluent l'impact de différents aménagements sur les températures dans les villes. Le projet EPICEA (CSTB et al., 2013) étudiait cet impact dans les rues de Paris en période de canicule. Un des scénarios était basé sur les toitures et façades réfléchives. Les valeurs prises pour les coefficients de réflexion sont celles des matériaux blancs et lisses, les émissivités grandes longueurs d'ondes (capacité à émettre la chaleur par rayonnement infra-rouge) sont également élevées. L'impact de cette solution est une réduction de la température de l'air de l'ordre d'un peu moins de 1°C le jour et d'environ 1°C la nuit. Il est inférieur à ce que produit le scénario de végétalisation. C'est aussi ce qui est retrouvé dans le projet EVA à Lyon (Morille & Musy, 2016). L'accumulation de ce genre de résultats permettra un classement des solutions de rafraîchissement et d'imaginer des compositions. Cependant, les travaux mettent aussi en évidence la nécessité de disposer d'outils d'évaluation car certaines associations peuvent également conduire à créer des situations d'inconfort.

Par ailleurs, nous avons ici présenté les résultats sur les impacts climatiques. Toutefois, comme nous avons pu le mettre en évidence dans le cadre de ce développement, en se concentrant trop sur la réduction des consommations d'énergie dans la conception des bâtiments, cela peut conduire à des contreperformances dans d'autres domaines (confort d'été, qualité de l'air notamment). Par ailleurs, il est nécessaire pour les surfaces urbaines d'aborder un ensemble de phénomènes qui sont plus ou moins bien documentés : impact sur l'hydrologie, l'acoustique, la qualité de l'air, sur le confort de marche, le confort visuel, l'économie des ressources naturelles, la biodiversité entre autres.

En tout état de cause, il apparaît clairement au regard des enjeux climatiques que la surface urbaine ne doit pas être vue que par rapports aux fonctions principales que chacune de ses composantes doit assurer, mais aussi comme modelant notre environnement de vie extérieur.

— BIBLIOGRAPHIE

Akbari, H. (1992). *Cooling our communities: A guidebook on tree planting and light-colored surfacing.* Heat island group / LBL.

Akbari, H., Levinson, R., & Rainer, L. (2005). Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings. *Energy and Buildings*, 37(10), 1007–1016.

Akbari, H., & Rose, L. S. (2008). Urban Surfaces and Heat Island Mitigation Potentials. *Journal of the Human-Environmental System*, 11(2), 85–101.

Alexandri, E., & Jones, P. (2006). Ponds, green roofs, pergolas and high albedo materials ; which cooling technique for urban spaces ? In *the 23rd conference on passive and low energy architecture, Geneva.*

Allegrini, J., Dorer, V., Defraeye, T., & Carmeliet, J. (2012). An adaptive temperature wall function for mixed convective flows at exterior surfaces of buildings in street canyons. *Building and Environment*, 49, 55–66.

Asaeda, T., & Ca, V. T. (2000). Characteristics of permeable pavement during hot summer weather and impact on the thermal environment. *Building and Environment*, 35(4), 363–375.

Ascione, F., Bianco, N., Rossi, F. de', Turni, G., & Vanoli, G. P. (2013). Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? *Applied Energy*, 104(0), 845 – 859.

Berdahl, P., & Bretz, S. E. (1997). Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. *Energy and Buildings*, 25(2), 149–158.

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.

Carnielo, E., & Zinzi, M. (2013). Optical and thermal characterisation of cool asphalts to mitigate urban temperatures and building cooling demand. *Building and Environment*, 60, 56–65.

Clergeau, P., & Blanc, N. (2013). *Trames vertes urbaines: de la recherche scientifique au projet urbain* (Le Moniteur ed.). Paris.

Colombert, M. (2008). *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville.* Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, Marne la Vallée, France.

Costanzo, V., Evola, G., & Marletta, L. (2016). Energy savings in buildings or UHI mitigation? Comparison between green roofs and cool roofs. *SI: Countermeasures to Urban Heat Island*, 114, 247–255.

Coutts, A. M., Daly, E., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2013). Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Building and Environment*, 70(0), 266 – 276.

CSTB, Meteo France, APUR, & APC. (2013). *Projet EPICEA - 2008-2012 - Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne* (p. 31). Mairie de Paris.

de Munck, C. (2013). *Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville*. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse.

Efthymiou, C., Santamouris, M., Kolokotsa, D., & Koras, A. (2016). Development and testing of photovoltaic pavement for heat island mitigation. *Solar Energy*, 130, 148-160.

Gentle, A. R., Aguilar, J. L. C., & Smith, G. B. (2011). Optimized cool roofs: Integrating albedo and thermal emittance with R-value. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(12), 3207-3215.

Groleau, D., & Mestayer, P. (2013). Urban Morphology Influence on Urban Albedo: A Revisit with the Solene Model. *Boundary-Layer Meteorology*, 147(2), 301-327.

Hardin, P., & Hardin, A. (2013). Hyperspectral Remote Sensing of Urban Areas. *Geography Compass*, 7(1), 7-21.

Hendel, M. (2015). *Pavement-Watering in Cities for Urban Heat Island Mitigation and Climate Change Adaptation: A Study of Its Cooling Effects and Water Consumption in Paris*. Thèse de Doctorat, Paris 7.

Kim, R., Park, J. B., Jung-Soo, M., & Jung-Hun, L. (2012). Reduction Effects of Urban Heat Island by Water-Retentive Pavement. In J. Sun, L. Gao, H. S. Kim, J. F. Yang, T. Sekino, & S. W. Lee (Éd.), *Eco-Materials Processing and Design Xiii* (Vol. 724, p. 147-150). Stafa-Zurich: Trans Tech Publications Ltd.

Levinson, R., Berdahl, P., Asefaw Berhe, A., & Akbari, H. (2005). Effects of soiling and cleaning on the reflectance and solar heat gain of a light-colored roofing membrane. *Atmospheric Environment*, 39(40), 7807-7824.

Malys, L. (2012). *Évaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments*. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, France.

Malys, L., Musy, M., & Inard, C. (2014). A hydrothermal model to assess the impact of green walls on urban microclimate and building energy consumption. *Building and Environment*, 73(0), 187-197.

Morakinyo, T. E., Dahanayake, K. W. D. K. C., Ng, E., & Chow, C. L. (2017). Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: A co-simulation parametric study. *Energy and Buildings*, 145, 226-237.

Morille, B., & Musy, M. (2016). Comparison of the impact of three climate adaptation strategies on summer thermal comfort – Cases study in Lyon, France. Int. Conf. on Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale, SBE16, Thessaloniki: Procedia Environmental Sciences.

Musy, M. (2014). *La ville verte - Les rôles du végétal en ville* (QUAE). Versailles: Marjorie Musy.

Nakayama, T., & Fujita, T. (2010). Cooling effect of water-holding pavements made of new materials on water and heat budgets in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 96, 57-67.

Nasir, D. S. N. M., Hughes, B. R., & Calautit, J. K. (2015). A study of the impact of building geometry on the thermal performance of road pavement solar collectors. *Energy*, 93, Part 2, 2614-2630.

Qin, Y. (2015). A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 445-459.

Rhein, C., & Palibr, M. (2014, juillet). Formes urbaines, modes d'occupation du sol et composition sociale en zone urbaine dense : des relations inattendues à Paris. *Cybergeog*. <http://cybergeog.revues.org/26423>

Roman, K. K., O'Brien, T., Alvey, J. B., & Woo, O. (2016). Simulating the effects of cool roof and PCM (phase change materials) based roof to mitigate UHI (urban heat island) in prominent US cities. *Energy*, 96, 103-117.

Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224-240.

Schrijvers, P. J. C., Jonker, H. J. J., Kenjereš, S., & Roode, S. R. de. (2015). Breakdown of the night time urban heat island energy budget. *Building and Environment*, 83, 50-64.

Stempihar, J. J., Pourshams-Manzouri, T., Kaloush, K. E., & Rodezno, M. C. (2012). Porous Asphalt Pavement Temperature Effects for Urban Heat Island Analysis. *Transportation Research Record*, (2293), 123-130.

Takebayashi, H., & Moriyama, M. (2012). Study on Surface Heat Budget of Various Pavements for Urban Heat Island Mitigation. *Advances in Materials Science and Engineering*.

Testa, J., & Krarti, M. (2017). A review of benefits and limitations of static and switchable cool roof systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 451-460.

Touchaei, A. G., Akbari, H., & Tessum, C. W. (2016). Effect of increasing urban albedo on meteorology and air quality of Montreal (Canada) – Episodic simulation of heat wave in 2005. *Atmospheric Environment*, 132, 188-206.

Weinmann, M., Urban, S., Hinz, S., Jutzi, B., & Mallet, C. (2015). Distinctive 2D and 3D features for automated large-scale scene analysis in urban areas. *Computers & Graphics*, 49, 47-57.

Wong, E. (2008). Cool Pavements. In *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies* (p. 40). US EPA US Environmental Protection Agency.