

Guide d'aide à l'intégration de la problématique des îlots de
chaleur urbains et de la nature en ville dans les projets
d'aménagement

TABLE DES MATIERES

Table des figures.....	4	Emissivité thermique	19
I - Caractérisation du Phénomène et Enjeux.....	6	Inertie thermique.....	20
L'ICU	6	Degré d'imperméabilisation	20
Contexte et Enjeux.....	8	Comparatif de matériaux.....	20
II - Outils de Diagnostic et d'Aide	9	Matériaux Innovants.....	23
Mesures	10	Morphologie urbaine	25
Mesures de température d'air	11	Circulation de l'air.....	25
Mesures de température de surface	12	Eviter l'effet canyon.....	27
Mesures qualitatives	13	Difficile compromis entre densification et espacement	28
Modèles	14	Présence de la végétation	30
Les modèles de traitement spatial des mesures.....	14	Effet sur la santé	31
Les modèles par simulation numérique.....	15	Evapotranspiration	32
Les modèles empiriques.....	16	Ombrage	33
Réglementation	17	Végétalisation et typologie d'espace.....	33
III - Leviers d'Action contre le phénomène d'ICU	18	Externalités et contraintes de la végétation.....	34
Propriétés des Matériaux	18	Exemples de bonnes pratiques.....	35
Albédo	18	Chaleur anthropique	37
		Sources de chaleur anthropique.....	37
		Gestion et organisation du trafic urbain	38

Solutions alternatives à la climatisation	38
Prise en compte de la pollution	39
Exemples de bonnes pratiques	39
Présence d'eau.....	41
Gestion alternative de l'eau en ville.....	41
Bien etre et îlot de fraîcheur	42
Exemples de bonnes pratiques	44
IV – Conclusion et Synthèse des Bonnes Pratiques par typologie d'espaces	46
V – Références.....	60
VI – Annexes	64
Annexe 1 – Outil Score ICU	64
Annexe 2 - Typologie d'espaces LCZ	65
Annexe 3 - Valeur d'albédo des matériaux, données : Guide solaire de l'énergie passive.....	66
Annexe 4 – Choix du type de revêtement perméable.....	67
Annexe 5 – UTCI, échelle du stress thermique.....	68

TABLE DES FIGURES

Figure 1 – Description du phénomène d'ICU, source : TRIBU.....	6
Figure 2 - Décès journaliers et températures en Ile-de-France en août 2003, source : ORS (2009).	7
Figure 3 - Synthèse des causes de formation de l'ICU, source : <i>Guide de recommandation pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain</i> , ADEME (2012)	7
Figure 4 - Risques pour la santé d'une exposition à la chaleur : symptômes et niveaux de gravité, source : INRS.....	8
Figure 5 - Pourcentage des voyages par type d'espace au cours de l'année 2016 en France	8
Figure 6 - Méthodes de mesure d'air pour le diagnostic des ICU, source : ADEME	11
Figure 7 - Méthodes de mesure de température de surface pour le diagnostic des ICU, source : ADEME	12
Figure 8 - Méthodes de mesure qualitative pour le diagnostic des ICU, source : ADEME	13
Figure 9 - Méthodes de modélisation par le traitement spatial des mesures pour le diagnostic des ICU, source : ADEME	14
Figure 10 - Méthodes de modélisation par la simulation pour le diagnostic des ICU, source : ADEME	15

Figure 11 - Méthodes de modélisation empirique pour le diagnostic des ICU, source : ADEME	16
Figure 12 - Influence de l'albédo sur la température de surface selon l'heure de la journée, source : K.Watson, 1975.	19
Figure 13 - Influence de l'émissivité sur la température de surface selon l'heure de la journée, source : K.Watson, 1975.....	19
Figure 14 - Matériaux de l'étude, leurs usages et dimension de revêtement, source : APUR.	21
Figure 15 - Propriétés d'albédo et d'émissivité des matériaux étudiés en laboratoire, source : APUR.	21
Figure 16 - Evolution de la température de surface de 5 revêtements parisiens sur 24h, source : APUR.	22
Figure 17 - Contribution à l'échauffement atmosphérique des matériaux étudiés, source : APUR.	22
Figure 18 - Caractéristiques de surface des matériaux de toiture les plus communs, source : H.Liu (2005).	23
Figure 19 - Comparaison de différents matériaux innovants et les besoins auxquels ils répondent.	23
Figure 20 - Description des différents revêtements de voiries innovants	24
Figure 21 - Schéma de la rugosité urbaine, soource : G. Deseez-Laurif, 1997.	26
Figure 22 - Représentations schématiques des écoulements d'air face à diverses contraintes urbaines, source : Klimafibel, 2012.	26

Figure 23 - Variation de l'intensité maximale de l'ICU avec la vitesse du vent de référence, source : Escourrou (1991).	27
Figure 24 - Ecoulement de l'air entre et sur les bâtiments, sources : Gandemer et Guyot (1976), Oke (1988).	27
Figure 25 - Principaux impacts psycho-sociaux du végétal en ville dans la bibliographie depuis le début des années 2000, source : S. Manusset (2012).	31
Figure 26 - Résultats des bienfaits du végétal en ville sur le social et la santé physique et mentale, source : S. Manusset (2012), réalisation : A. Foucher.	32
Figure 27 - Rôle et exemples d'aménagements végétalisés en fonction de la typologie des espaces, source : interprétation d'après le SESAME.....	34
Figure 28 - Plan Masse – place Lucie Aubrac, Saint-Martin-d'Hères (38), source : CEREMA (2021).	35
Figure 29 - Projet de requalification, Quartier du Ray, Nice, source : Edouard François (2016).	36
Figure 30 - Projet de requalification, Quartier du Ray, Nice, source : Edouard François (2016).	36
Figure 31 - Impact du chauffage sur l'ICU dans l'espace public, source : APUR (2012).....	37
Figure 32 - Bilan énergétique du territoire parisien entre mai et septembre 2009, source : CEREN (2011).	37

Figure 33 - Evolution des consommations d'énergie des commerces parisiens de 1990 à 2009, source : CEREN (2011).	38
Figure 34 - Phénomène de convergence des vents entre la ville et la campagne, source : IAU (2010).....	39
Figure 35 - Master Plan, ZAC « Saint Sauveur », Lille, source : Gehl Architects.....	40
Figure 36 - Principe de construction à l'îlot, ZAC « Saint Sauveur », Lille, source : Gehl Architects	40
Figure 37 - Contribution à l'échauffement atmosphérique du revêtement avec et sans arrosage, source : APUR.....	41
Figure 38 - Ambitions environnementales du projet des Carmes, Clermont-Ferrand, source : Dossier de presse, CAM (2021).....	43
Figure 39 - Aménagements et ouvrages d'eau du projet des Carmes, Clermont-Ferrand, source : Dossier de presse, CAM (2021).....	43
Figure 40 – Projet d'écoquartier – Gare de Rungis	44
Figure 41 – Principe de gestion des eaux pluviales – écoquartier de Rungis.....	45
Figure 42 - Ordre de grandeur du refroidissement moyen journalier de l'air occasionné par un dispositif en regard de sa maturité, source : ADEME (2017).....	46

I - CARACTERISATION DU PHENOMENE ET ENJEUX

L'ICU

L'îlot de chaleur urbain est un phénomène qui se traduit par une **différence de température positive dans les villes entre le centre urbain et la périphérie** (Figure 1). Mis en évidence dès 1830 par L. Howard, son nom vient de la ressemblance entre les lignes isothermes en ville et le plan topographique d'une île (Rullier, 2012).

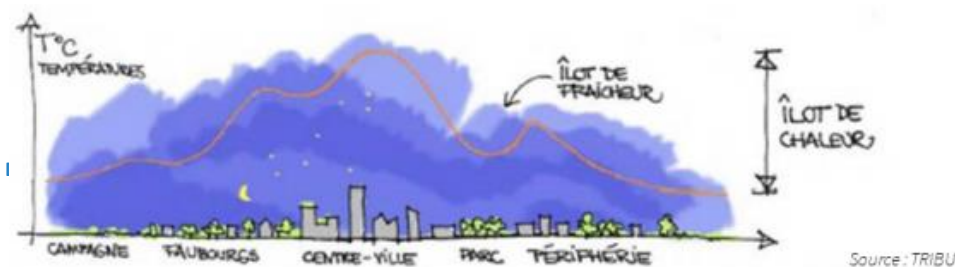
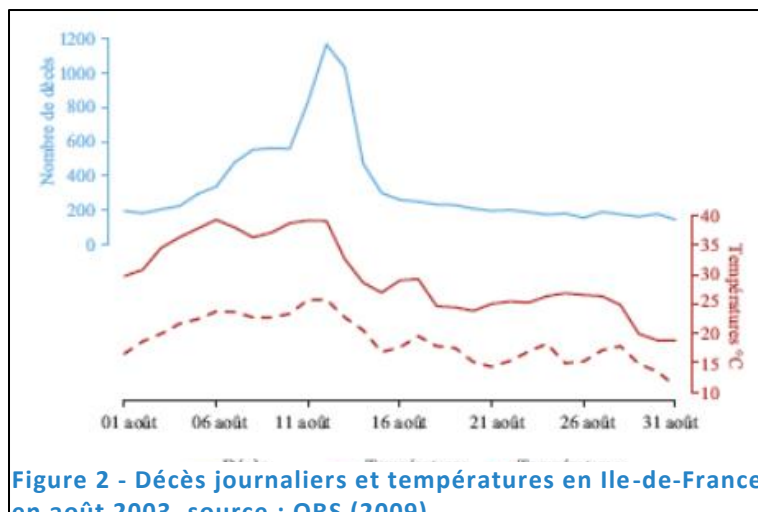


Figure 1 – Description du phénomène d'ICU, source : TRIBU

Avec 80,69 % de la population française qui habite en ville en 2020¹, les problématiques associées à ce phénomène concernent une large majorité de la population. Elles sont les conséquences directes du

changement climatique. L'intérêt relatif aux ICU est apparu à la suite des fortes **vagues de canicule en France pendant l'été 2003** qui ont entraîné une **surmortalité d'environ 15 000 personnes**, principalement en Ile-de-France (Figure 2). Dans l'agglomération clermontoise il s'est traduit localement par des différentiels de températures nocturnes forts avec 2,5°C d'écart entre le jardin Lecoq et Aulnat et surtout 8°C d'écart entre Montferrand et Aulnat (CEREMA, 2020). En effet, l'ICU est plus fort la nuit que le jour (Renou, 1862 ; Hammon et Duenchel, 1902). L'heure où l'intensité de l'ICU est maximum se situe après le coucher du soleil (Runnalls et Oke, 2000). Cet évènement précis a fait prendre conscience de l'importance de traiter le phénomène qui **ne concerne pas seulement des problématiques de confort pour la population mais bien de santé publique**. La stratégie française dans la lutte contre le dérèglement climatique consiste principalement en **l'atténuation des sources** et des causes de ces changements. Cependant, même si elle est nécessaire, cette stratégie se révèle insuffisante pour contrer ses effets. **Une stratégie d'adaptation des projets au défi climatique** doit alors être mis en place. Cette stratégie d'adaptation passe par certains leviers pour l'aménageur de prise en compte du phénomène pour adapter les solutions retenues. Elle nécessite donc une bonne connaissance des causes et caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain.

¹ Statista 2021.



On distingue principalement deux types de causes à l'ICU (Figure 3). La première concerne des variables dites incontrôlables telles que l'intensité du rayonnement solaire ou toutes variables climatiques qui vont conditionner la force du phénomène d'îlot de chaleur. Le deuxième type fait référence à toutes les actions d'origine humaine qui vont venir renforcer localement la température et accentuer l'ICU. On peut les classer en 5 catégories :

- Les **propriétés thermiques des matériaux** utilisés en ville,
- La **morphologie urbaine**, relative à la forme et à l'ordonnancement des bâtiments et infrastructures,
- La **présence de la végétation** et sa densité à l'échelle locale comme à l'échelle de la ville,
- L'importance des **sources de chaleur** d'origine anthropique,

- La **présence de l'eau** en ville, sous quelle forme et en quelle quantité.

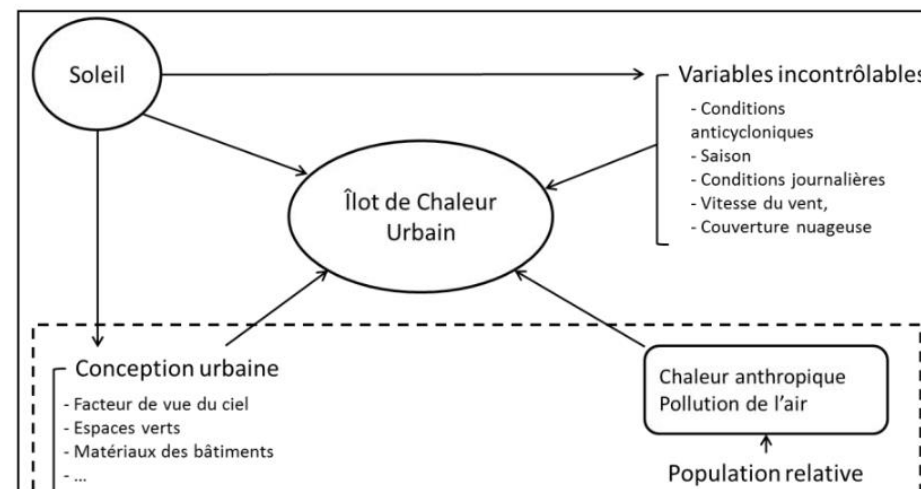


Figure 3 - Synthèse des causes de formation de l'ICU, source : *Guide de recommandation pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain*, ADEME (2012)

À RETENIR

- ✓ ICU = **différence de température** entre le centre urbain et la périphérie.
- ✓ Phénomène **plus intense la nuit**.
- ✓ Principalement **dû aux activités et aménagements** dans les villes (choix des matériaux, formes urbaines, végétation, présence d'eau, sources de chaleur).

Contexte et Enjeux

Le Groupement d'Expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a montré que les vagues de fortes chaleurs et plus largement les événements météorologiques extrêmes viendront à s'intensifier dans le futur (IPCC, 2013). **La prise en compte des îlots de chaleur dans les projets d'aménagement devient alors un enjeu majeur.** Cet enjeu se caractérise en 3 axes. Le premier concerne la **santé publique**. Une chaleur trop importante peut avoir des conséquences dramatiques sur le corps humain en créant un stress thermique qui peut dans certains cas s'avérer fatal pour l'individu (Figure 4). D'autres indicateurs existent pour déterminer le confort thermique du corps humain tel que l'**UTCI** (Annexe 5).

Niveau	Effets de la chaleur	Symptômes et conséquences
Niveau 1	Coup de soleil	Rougeur et douleur, œdème, vésicules, fièvre, céphalées
Niveau 2	Crampes de chaleur	Spasmes douloureux (jambes et abdomen), transpiration
Niveau 3	Epuisement thermique	Forte transpiration, faiblesse, froideur et pâleur de la peau, pouls faible, température normale
Niveau 4	Coup de chaleur	Température corporelle supérieure à 40,6°C, peau sèche et chaude, pouls rapide et fort, perte de conscience possible. Décès possible par défaillance de la thermorégulation.

Figure 4 - Risques pour la santé d'une exposition à la chaleur : symptômes et niveaux de gravité, source : INRS

Certaines personnes se trouvent plus exposées à un risque lié à une forte chaleur : les personnes atteintes de maladie chronique, les populations isolées socialement, les nourrissons, les personnes

âgées, les travailleurs extérieurs, etc... L'exposition aux risques est tout autant liée à la condition physique des individus qu'à leurs conditions de travail et de vie. Les conséquences des rayonnements solaires sur le corps des individus définissent **le confort (ou ressenti) thermique**.

Les fortes chaleurs estivales ont aussi un impact non négligeable sur **l'attractivité des villes**. Même si peu d'études pointent l'effet direct des îlots de chaleur urbain sur le caractère attrayant de celles-ci, le choix des destinations par type d'espaces (Figure 5) montre une augmentation de la part des voyages vers un type d'espace rural en été.

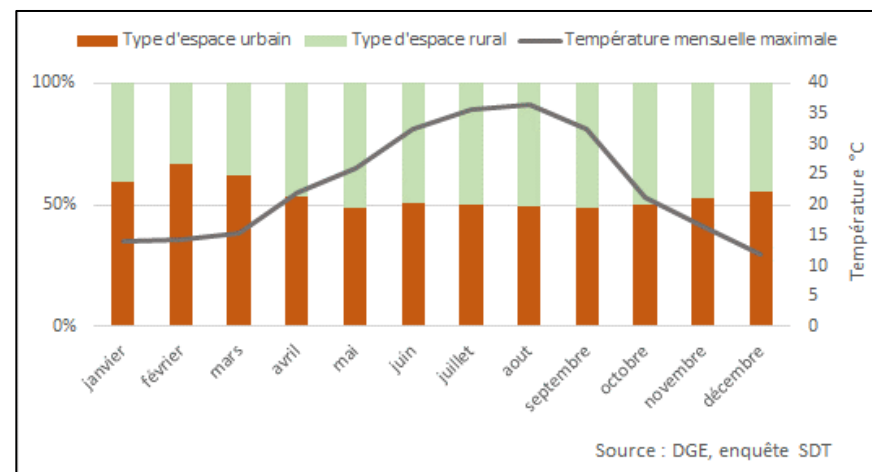


Figure 5 - Pourcentage des voyages par type d'espace au cours de l'année 2016 en France

Les périodes de forte chaleur ont un effet conséquent sur les **besoins énergétiques** en ville. L'environnement urbain étant plus chaud, il conduit à l'utilisation abondante de climatiseurs². La demande en énergie est alors plus importante. Pour chaque degré de température extérieure supplémentaire, il est montré une augmentation de la consommation énergétique par les habitants de 1,5% à 2% (Akbari, 1992). A titre d'exemple, la température des centres-villes aux Etats-Unis a connu une augmentation de l'ordre de 2 à 4°C, entraînant une consommation énergétique supérieure de 3 à 8%. Cependant, l'effet du phénomène d'îlot de chaleur urbain a un **impact positif sur les consommations énergétiques en hiver**. Puisque selon le principe inverse, la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer un bâtiment à cette période de l'année peut diminuer de près de 30% en comparaison avec ceux se situant dans les espaces ruraux périphériques (Santamouris, 2001).

À RETENIR

- ✓ Enjeu de **santé public**.
- ✓ Enjeu pour **l'attractivité** des villes.
- ✓ Enjeu pour les **besoins énergétiques** des villes.

² Avec une influence néfaste sur la chaleur urbaine puisque l'air chaud intérieur est rejeté vers l'extérieur pour faire rentrer de l'air frais favorisant le réchauffement extérieur et donc l'utilisation des climatiseurs.

II - OUTILS DE DIAGNOSTIC ET D'AIDE

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain est encore l'un des aspects méconnus des conséquences des actions de l'aménagement sur le territoire. Pourtant, intégrer la problématique d'adaptation des projets à la surchauffe urbaine semble primordial au vu des enjeux identifiés. Certains organismes comme l'ADEME ou CEREMA fournissent un certain nombre de guides de recommandations, la plupart du temps destinés aux collectivités et MOA, afin de pouvoir mieux comprendre le phénomène et proposer des aménagements en conséquence. La connaissance à elle seule du phénomène n'est pas suffisante pour identifier clairement et spatialiser les îlots de chaleur urbains sur le territoire. **Un diagnostic est alors nécessaire pour quantifier le phénomène.** Ces diagnostics peuvent en réalité avoir 2 intérêts, en amont d'un projet, ils **permettent d'évaluer l'intensité de l'ICU** et éventuellement en identifier la cause. Ils permettent de situer certaines zones plus sensibles et vulnérables localement, d'évaluer le confort thermique et sont un moyen efficace de sensibiliser la population. Après un projet, ils vont permettre de **mesurer l'efficacité et l'impact du projet sur son environnement**, offrant aussi un bon support de communication. Dans l'absolu, réaliser ces 2 diagnostics permet une

prise en compte efficace du phénomène et un retour d'expérience utile et nécessaire.

Deux types d'approches sont envisageables selon les territoires pour effectuer un diagnostic :

- En se basant sur des **mesures**, avec des approches expérimentales sur le terrain au moyen d'outils de mesure et par la prise de données,
- En se basant sur des **modèles**, avec une approche empirique, statistique ou numérique.

Dans la plupart des cas, le diagnostic du territoire se compose d'une combinaison de ces 2 approches. Sachant que les mesures permettent de calibrer les modèles et les modèles servent à expliciter les mesures.

En 2017, l'ADEME, en partenariat avec le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire a publié un recueil des méthodes utilisées en phase de diagnostic avec leur intérêt et leur limite pour caractériser l'îlot de chaleur urbain. Intitulé : *Diagnostic de la surchauffe urbaine, Méthodes et applications territoriales*.

Mesures

L'approche expérimentale de prise de mesures sur le terrain va permettre d'obtenir avec précision les valeurs des **variables climatiques** urbaines sur une période donnée, on mesure alors la température, vitesse et l'humidité de l'air, les températures de surface, le confort thermique en mesurant l'intensité des rayonnements solaires afin d'obtenir des indicateurs pour **le ressenti thermique**.

MESURES DE TEMPERATURE D'AIR

Les méthodes de **mesure de température de l'air ambiant** vont permettre de relever des variables caractéristiques de l'air ambiant de façon très localisé sur le territoire, donnant une **mesure très précise de l'intensité d'un phénomène d'ICU sur la période de campagne de mesure**. En 2020, le CEREMA publiait un rapport d'étude mené dans la métropole de Clermont-Ferrand sur l'expérimentation et l'évaluation d'actions en faveur de la réduction des effets d'ICU. Par une combinaison d'un réseau de points de mesures fixes ainsi que d'une prise de mesure mobile, cette étude a permis d'identifier les zones de surchauffe urbaine dans la métropole et l'intensité de cette surchauffe en comparaison avec la périphérie et les autres lieux importants clermontois. (CEREMA, « Construction, expérimentation et évaluation d'actions de réduction des effets des îlots de chaleur urbains sur le site de la Place Delille », 2020)



Figure 6 - Méthodes de mesure d'air pour le diagnostic des ICU, source : ADEME

MESURES DE TEMPERATURE DE SURFACE

La prise de mesure des températures de surface passe par l'utilisation de caméras infra-rouges. Mesurer les températures de surface va permettre d'identifier et de spatialiser sur le territoire donné les zones dans lesquels les matériaux ont une forte inertie thermique la nuit³ et l'échauffement des surfaces causé par les rayonnements solaires en journée. Les résultats, sous forme de cartographie, présentent un intérêt fort pour la sensibilisation puisqu'ils sont très visuels. Cependant, la mesure par caméra infra-rouge des températures de surface ne permet pas de conclure sur la température ambiante et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain sur un territoire, un traitement prenant en compte les propriétés des matériaux de surface complémentaire est nécessaire pour mesurer la température ambiante.

³ Voir § III – Leviers d'action contre le phénomène d'ICU / Propriété des matériaux / Inertie thermique

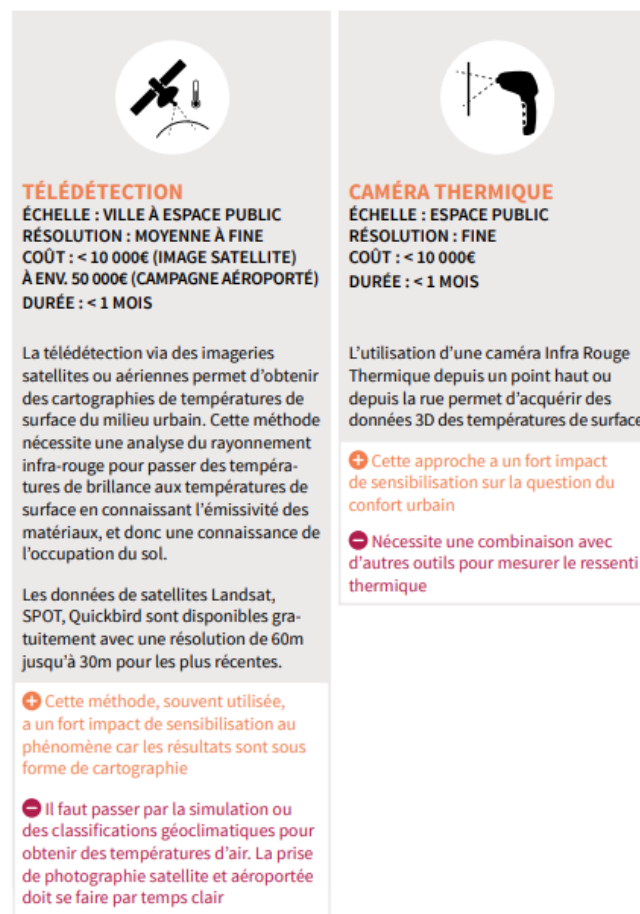


Figure 7 - Méthodes de mesure de température de surface pour le diagnostic des ICU, source : ADEME

MESURES QUALITATIVES

La mesure du confort thermique ou du ressenti peut aussi se faire au travers de **méthodes qualitatives**, sous forme de questionnaire, d'enquête ou de balade de ressenti thermique avec les habitants. Bien que les résultats de ces mesures dépendent fortement de la qualité de l'enquête menée, du nombre et de la diversité des participants, elle a le double avantage d'avoir un aperçu **du ressenti des populations** au plus près des phénomènes d'ICU et **de sensibiliser ces mêmes populations au phénomène**.



Figure 8 - Méthodes de mesure qualitative pour le diagnostic des ICU, source : ADEME

À RETENIR

- ✓ 3 types de mesures :
 - De température d'air,
 - De température de surface,
 - Qualitatives,
- ✓ Permettent de **quantifier le phénomène** à un instant donné.

Modèles

La prise en considération des **caractéristiques de topographie, morphologie urbaine et de l'environnement du territoire** vont permettre d'évaluer au travers de **simulations, d'interpolation et d'extrapolation des prises de mesure** sur le territoire, la surchauffe urbaine avec une cartographie des îlots de chaleur urbain.

Les Modèles de traitement spatial des mesures

Les données de la prise de mesure sur le territoire des variables caractéristiques du phénomène d'ICU peuvent être **extrapolées ou interpolées de manière à affiner leur résolution**. Ces méthodes de traitement spatial des mesures **dépendent alors de la qualité des mesures prises en amont** qui viendront améliorer fortement l'interprétation des mesures qui sera faite ici.



Figure 9 - Méthodes de modélisation par le traitement spatial des mesures pour le diagnostic des ICU, source : ADEME

Les modèles par simulation numérique

La modélisation du phénomène d'îlot de chaleur urbain au travers d'une simulation numérique, qu'elle soit à grande échelle comme avec le logiciel TEB ou à une échelle plus réduite comme avec l'outil SOLENE ou Envi-Met, permet par des méthodes de calcul et par l'intégration de mesures sur le territoire, la **prise en compte de variables climatiques ou morphologiques de la ville de façon très précise**. La modélisation du phénomène par simulation numérique présente plusieurs avantages : tout d'abord, elle **permet d'évaluer l'impact d'un aménagement du territoire et son potentiel de surchauffe ou de rafraîchissement en reproduisant à l'identique les conditions climatiques avant et après aménagement**⁴. Elle permet aussi un déphasage dans le temps des résultats du modèle en se plaçant dans des scénarii extrêmes et la **possibilité d'évaluer plusieurs possibilités d'aménagement en jouant sur les paramètres de morphologie urbaine et de propriétés thermiques des bâtiments**.

La limite de ces outils de simulation se situe dans leur fiabilité, avec des logiciels encore souvent en développement et qui **demandent un temps de saisie et de calcul long pas toujours compatibles avec les des opérations d'aménagement**.

⁴ Résultat impossible à obtenir uniquement par prise de mesure à cause de la variabilité du climat dans le temps.

	
SIMULATION À GRANDE ÉCHELLE ÉCHELLE : VILLE RÉSOLUTION : MOYENNE COÛT : > 50 000€ DURÉE : > 3 MOIS	SIMULATION À PETITE ÉCHELLE ÉCHELLE : QUARTIER, ESPACE EXTÉRIEUR RÉSOLUTION : FINE COÛT : < 50 000€ DURÉE : > 3 MOIS
Les modèles de simulation numérique à grande échelle reposent sur le bilan d'énergie de tissus urbains à partir des paramètres du climat (vents, température, hygrométrie). La forme urbaine et ses effets sont représentés par des caractéristiques moyennes (rugosité, albédo...) sur des mailles d'une centaine de mètres.	Les modèles de simulation numérique du climat urbain à l'échelle locale reposent sur des bilans radiatifs et convectifs des interactions entre les sols et les bâtiments en 3D. Cette approche multi paramètres (température d'air, surfaces, vents, hygrométrie...) permet de donner des résultats en indice de confort.
Exemples : Town Energy Balance (TEB) et Meso-NH	Exemples : logiciels Solene-microclimat, Envi-MET
 Cette méthode permet aussi d'établir des prospectives et de comparer des scénarios d'évolution du tissu urbain à l'échelle de la ville	 Cette méthode permet aussi d'établir des prospectives et de comparer des scénarios d'évolution d'aménagements
 Méthode qui nécessite une ingénierie qualifiée	 Méthode qui nécessite une ingénierie qualifiée et avec des temps de calcul parfois très long par rapport aux exigences opérationnelles

Figure 10 - Méthodes de modélisation par la simulation pour le diagnostic des ICU, source : ADEME

Les modèles empiriques

Sur la base d'études réalisés en amont, de prises de mesures ou de simulations, il est possible de mettre en **corrélation les variables climatiques et de morphologie urbaine pour caractériser les phénomènes d'îlot de chaleur urbain** selon des modèles empiriques. Les travaux de Oke et Stewart avec la méthode de classification géoclimatique en **Local Climate Zone** (Annexe 2) est la plus répandue et constitue une base théorique et pratique pour les indicateurs empiriques qui suivront, construits par le CEREMA (DIACLIMAP) ou l'ANR (MAPUCE) et d'outils comme le **Score ICU** détaillé en Annexe 1.

À RETENIR

- ✓ 3 types de modèles :
 - De traitement spatial des mesures,
 - Par simulation numérique,
 - Empiriques.
- ✓ Permettent d'anticiper des scénarii ainsi que les impacts des aménagements et de poser des hypothèses pour les variables climatiques.



Figure 11 - Méthodes de modélisation empirique pour le diagnostic des ICU, source : ADEME

Réglementation

En termes de réglementation, rien ne vise le phénomène d'îlot de chaleur urbain en particulier ou de la surchauffe urbaine. Le Plan Climat Air Energie Territorial (PCAET), obligatoire pour certaines métropoles ou intercommunalités, vise à mettre en pratique les décisions d'échelle nationale, européenne ou mondiale sur le territoire notamment en matière de normes environnementales, de politique d'atténuation des sources de changement climatique et dans une moindre mesure d'adaptation du territoire. Le terme d'îlot de chaleur urbain n'est que peu ou pas employé dans ce document pour la plupart des métropoles⁵. D'autres outils d'échelle plus sectorielle peuvent s'avérer plus appropriés pour intégrer la lutte contre les ICU plus spécifiquement : « Les collectivités ont la volonté **d'intégrer des outils au PLU** pour une diminution de l'ICU » (MUSCADE⁶, 2016). Certains guides ministériels des bonnes pratiques fournissent des informations et recommandations aux collectivités mais ne sont pas contraignants juridiquement.

Depuis 2010, certaines collectivités se sont tournées vers des démarches plus innovantes et qui visent à prendre en compte les problématiques de surchauffe urbaines et d'adaptation au

⁵ Le terme « îlot de chaleur » n'est mentionné qu'une seule fois dans le PCAET de la métropole Grand-Lyon (2019) pourtant précurseur en matière de lutte contre ces ICU.

changement climatique : 12 SCoT Grenelle préfigurateurs ont fait l'objet d'un accompagnement particulier par la Direction générale de l'aménagement du logement et de la nature du MEDDE⁷. Parmi ces territoires, les agglomérations de Lyon, Grenoble et Paris ont particulièrement travaillé sur la cartographie et la prise en compte de l'effet d'ICU dans les documents d'urbanisme.

Clermont-Auvergne-Métropole a inscrit au sein de sa stratégie un engagement dans la lutte contre le phénomène d'îlot de chaleur urbain en s'appuyant sur des études de vulnérabilité du territoire clermontois, le PCAET et Schéma de Transition Énergétique et Écologique (STEE). Cet engagement est décliné par l'action 13 du STEE, au travers de la cible « Développer la « ville verte et bleue », perméable, attractive et résiliente », intitulée « Lutter contre les îlots de chaleur ».

À RETENIR

- ✓ **Aucune mesure ou norme imposée** par la réglementation concernant les ICU.
- ✓ Le PLU peut être un outil efficace pour les collectivités.
- ✓ Prise de conscience des métropoles et démarches plus innovantes

⁶ Modélisation Urbaine et Stratégique d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la Demande et la production Énergétique. Projet de l'ANR.

⁷ Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie, dorénavant Ministère de la Transition Énergétique.

III - LEVIERS D'ACTION CONTRE LE PHENOMENE D'ICU

Pour l'aménageur, la lutte contre les ICU passe par des **mesures d'adaptations des projets à la surchauffe urbaine**. Plusieurs leviers d'actions sont alors identifiés ainsi que les conditions de leur mise en place, les co-bénéfices associées et les éventuelles externalités négatives. Ces leviers d'actions sont ensuite déclinés en **solutions d'aménagement** qui peuvent être mis en place selon les typologies d'espaces à aménager. Lors des projets d'aménagement, plusieurs de ces solutions sont généralement mises en place et chacune interagit différemment avec les autres solutions de sorte qu'elles peuvent **annuler leur intérêt vis-à-vis du phénomène ou au contraire, la combinaison de plusieurs aménagements peut démultiplier leur action** en faveur de la lutte contre les ICU. La réflexion autour des mesures de lutte contre les ICU doit prendre en compte **l'environnement du projet, son plan masse et l'ensemble solutions envisageables**.

Attention tout de même, ce qui peut représenter un levier important pour la lutte contre les ICU en été peut aussi se révéler **néfaste en hiver et nécessiter d'augmenter les besoins de chauffage des bâtiments**.

⁸ 0 correspond à une absorption totale des rayonnements solaires et 1 à une réflexion totale de ces rayonnements.

Propriétés des Matériaux

ALBEDO

L'albédo se définit par la capacité d'une surface terrestre hétérogène (Bouyer, 2009) à réfléchir les rayons solaires. Il représente la **capacité d'un matériau à réfléchir les rayonnements solaires et donc à ne pas en absorber la chaleur**, il s'agit d'un coefficient allant de 0 à 1 (Annexe 3)⁸. L'albédo des matériaux va avoir un impact significatif sur l'effet d'ICU. En règle générale, **plus la couleur d'un matériau est claire et plus son albédo sera proche de 1**.

Lors d'un projet d'aménagement, on peut choisir d'augmenter l'albédo des matériaux selon 2 typologies d'espace : en modifiant les matériaux et enrobés de la voirie ou en modifiant les matériaux des structures de bâtiments (murs et toiture). Avec des conséquences différentes selon les effets recherchés. Différentes techniques existent pour augmenter l'albédo des surfaces mais elles dépendent essentiellement de l'environnement et du contexte du projet (changement de revêtement, utilisation d'éclats de cristallins dans le béton) (Recurt, 2020). Une augmentation de l'albédo représente une des solutions les plus efficace pour diminuer les

températures de surface et donc permettre de réduire les besoins en climatisation par exemple lorsqu'ils sont appliqués sur les structures. Quelle que soit la typologie d'espace sur laquelle elle est appliquée, cette solution a l'avantage d'être simple à mettre en place. Cependant, elle présente aussi peu de co-bénéfices. Il peut alors être intéressant de l'associer à d'autres solutions d'aménagement. En choisissant un matériau à fort albédo et perméable par exemple. Au contraire, le développement d'une canopée végétale au-dessus d'une voirie à fort albédo annule son effet. Un albédo très élevé peut aussi avoir un effet d'éblouissement qui doit être pris en considération.

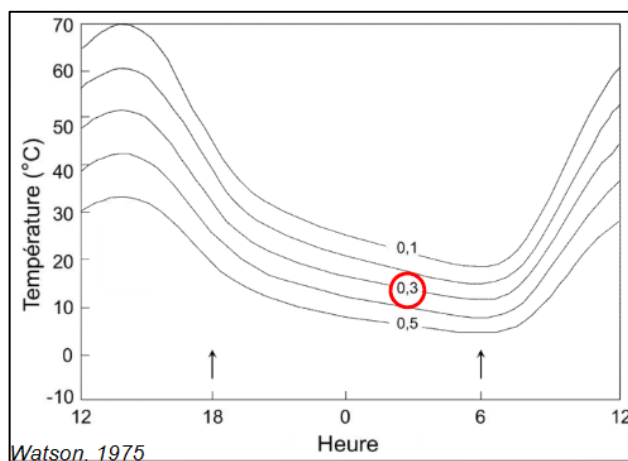


Figure 12 - Influence de l'albédo sur la température de surface selon l'heure de la journée, source : K.Watson, 1975.

EMISSION THERMIQUE

L'émissivité thermique représente la **capacité des matériaux à réémettre, notamment sous forme de rayonnements infrarouges la chaleur accumulée dans la journée lorsque le matériau se refroidit la nuit**, elle participe à réchauffer l'air ambiant mais aussi à refroidir la température de surface du matériau, son influence est moindre sur la température du microclimat. La valeur d'émissivité représente un pourcentage d'émission de rayonnement infrarouge par rapport à un corps noir théorique émettant la totalité de son énergie.

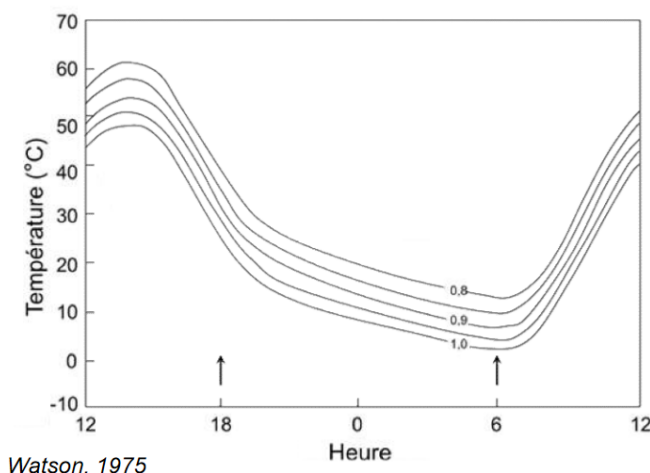


Figure 13 - Influence de l'émissivité sur la température de surface selon l'heure de la journée, source : K.Watson, 1975.

INERTIE THERMIQUE

L'inertie thermique d'un matériau représente sa **capacité à différer la restitution de la chaleur accumulée au cours de la journée après un temps de déphasage**. Une inertie thermique bien utilisée va permettre de restituer la fraîcheur de la nuit le jour. Elle permettra de lisser la courbe de température au cours de la journée en évitant les fortes variations. Cependant, lors des périodes de canicule, la température la nuit reste assez élevée. La restitution de la chaleur de la journée la nuit va alors maintenir le corps à un niveau de température assez élevé sans réelle période de rafraîchissement. Il est nécessaire de dissiper la chaleur restituée la nuit par la ventilation par exemple.

DEGRE D'IMPERMEABILISATION

Le choix d'un matériau perméable pour un revêtement de surface ne se fait que **peu pour ses bénéfices de lutte contre les ICU mais plutôt sur les co-bénéfices associés**. Il permet notamment une meilleure **gestion de l'eau en ville** en évitant le ruissellement. L'eau reste alors dans les villes et peut être restituée lors des épisodes de forte chaleur par **évaporation** au travers des pores du revêtement ou par **évapotranspiration** grâce à la végétation alentour.

Indirectement, les matériaux perméables vont donc permettre de rafraîchir les villes.

La difficulté du choix d'un matériau perméable réside dans les différences de **propriétés mécaniques ne permettant pas tous les usages pour les matériaux perméables** notamment pour la voirie (Annexe 4). Ils peuvent aussi entraîner un **surcoût d'entretien** en fonction des choix retenus. Pour certains enrobés drainants, conserver l'eau en ville sous la couche de revêtement devient aussi un vrai problème en hiver si l'eau gèle pouvant amener à une dégradation de l'enrobé.

COMPARATIF DE MATERIAUX

La majorité des études comparatives de matériaux se concentrent sur l'impact des propriétés thermiques sur les températures de surface des matériaux ou sur l'effet sur la consommation énergétique des bâtiments. Si ces aspects restent importants et doivent être pris en compte dans les projets d'aménagement dans le choix des matériaux à utiliser, ils ne reflètent pas nécessairement l'élévation de la température d'air extérieur qui impact directement les passants. On peut aussi questionner l'intérêt de comparer des matériaux avec des usages très distincts notamment à cause de leurs propriétés mécaniques et des normes d'accessibilité pour les revêtements de surface.

En 2017, l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR) comparait l'effet des revêtements de surface parisiens sur les températures de sol et sur le confort des individus.

	trottoir		mixte	chaussée			m	c	f
asphalte noir (trottoir)	P	P+	M				2cm		10 à 15cm
béton bitumineux				t	T	T+	4cm	10 à 12cm	25 à 30cm
pavés granit "à l'ancienne"				t	T	T+	10 à 14cm	4 à 10cm	15 à 20cm
pavés granit sciés	P	P+	M				7cm	4cm	10 à 20cm
dalles de granit	P	P+	M				8 à 12cm	4cm	10 à 20cm
stabilisé		P+						10cm	
gazon									

Légende :

- P : circulation piétonne exclusivement
- P+ : circulation piétonne et occasionnellement véhicule
- M : circulation piétonne et véhicules, voie mixte
- t : circulation véhicules, faible trafic
- T : circulation véhicules; fort trafic
- T+ : circulation véhicules, trafic poids lourds très dense

matériaux étudiés en laboratoire

Figure 14 - Matériaux de l'étude, leurs usages et dimension de revêtement, source : APUR.

Échantillon	Chaussée classique	Trottoir asphalte	Stabilisé	Trottoir granit	Gazon
Albédo	0,098	0,155	0,369	0,313	0,25-0,30
Émissivité	0,99	0,93	0,91	0,99	0,98

Figure 15 - Propriétés d'albédo et d'émissivité des matériaux étudiés en laboratoire, source : APUR.

L'étude sur les 7 matériaux testés dont 5 en laboratoire et en comparaison avec la référence du gazon (Figures 14 et 15) montre l'évolution des températures de surface au cours de la journée. On observe une chute brutale des températures à la tombée de la nuit mais des comportements différents pour les matériaux. En effet, la nuit la température de surface des matériaux étudiés se sépare en 2 catégories : plus ou moins frais et qui vient bouleverser le classement établi par la température de surface en journée. Ainsi, le stabilisé et le gazon sont les matériaux les plus frais la nuit alors même que les dalles de trottoir granit étaient plus fraîches le jour que le stabilisé. La chaussée classique, plus chaude la journée devient moins chaude la nuit que l'asphalte noir (Figure 16).

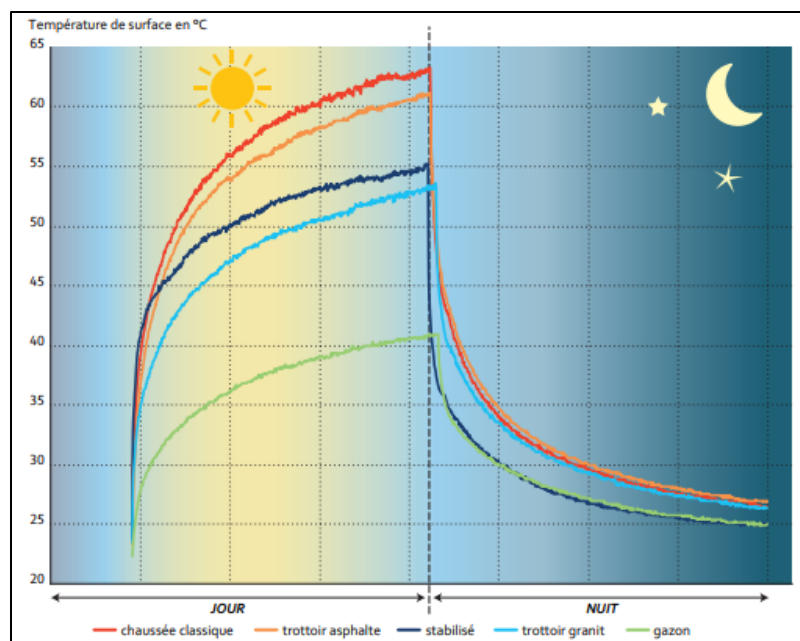


Figure 16 - Evolution de la température de surface de 5 revêtements parisiens sur 24h, source : APUR.

La température de surface des matériaux n'est pas la température atmosphérique. On va donc chercher les valeurs de contribution de ces matériaux à l'échauffement atmosphérique en fonction des moments de la journée. Les résultats de classement des matériaux sont sensiblement identiques (Figure 17).

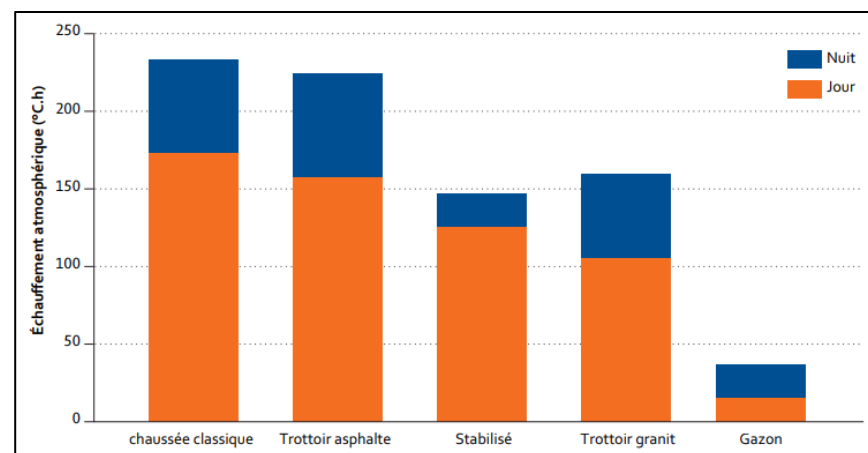


Figure 17 - Contribution à l'échauffement atmosphérique des matériaux étudiés, source : APUR.

La comparaison des matériaux ne se limite pas aux revêtements de surface, on peut également relever l'élévation des températures de surfaces du au choix de matériaux pour la toiture des bâtiments en fonction des paramètres d'albédo et d'émissivité (Figure 18). Ces différences de températures vont entraîner une augmentation de la température dans les bâtiments amenant à un recours plus fréquent à la climatisation par exemple.

Surface de la toiture	Albédo	Emissivité	Élévation de la température (°C)
EPDM - noir	0,06	0,86	46
EPDM - blanc	0,69	0,87	14
TPO - blanc	0,83	0,92	6
Bitume - surface lisse	0,06	0,86	46
Bitume - granulés blancs	0,26	0,92	35
Multi - gravier sombre	0,12	0,9	42
Multi - gravier clair	0,34	0,9	32
Bardeaux - granulés noirs génériques	0,05	0,91	46
Bardeaux - granulés blancs génériques	0,25	0,91	36
Bardeaux - revêtement élastomère blanc	0,71	0,91	12
Bardeaux - revêtement en aluminium	0,54	0,42	28
Acier - neuf, nu, galvanisé	0,61	0,04	31
Aluminium	0,61	0,25	27
Aluminium - revêtement blanc	0,59	0,85	21

Figure 18 - Caractéristiques de surface des matériaux de toiture les plus communs, source : H.Liu (2005).

MATERIAUX INNOVANTS

Les différentes innovations dans les matériaux des revêtements de surface que l'on va lister ici se concentrent autour de 3 axes principaux que sont des besoins auxquels ces matériaux innovants doivent répondre. On peut alors citer le besoin de répondre à des exigences environnementales grandissantes, avec des matériaux recyclables, moins coûteux en matières premières ou en énergie. Le deuxième besoin identifié est celui de limiter l'effet

⁹ Inutile pour traiter l'ICU mais traité dans les innovations en parallèle de propriétés thermiques.

d'îlot chaleur urbain, en jouant sur les propriétés thermiques des matériaux tout en imitant les propriétés mécaniques d'autres revêtements. Le troisième consiste à limiter le bruit lorsque les véhicules roulent sur ces revêtements⁹.

Entreprise	Revêtement	Réduction de la température	Réduction du bruit	Aspect environnemental	Perméabilité	Production d'énergie
COLAS	COLCLAIR					
	VEGECOL					
	Route solaire					
	BBphon+					
	SMaphon					
EIFFAGE	BIOKROM					
	BIOPHALT					
	BIOKLAIR					
EUROVIA	DRAINOVIA					
	Puma					
	Power Road					

Figure 19 - Comparaison de différents matériaux innovants et les besoins auxquels ils répondent.

Entreprise	Revêtement	Commentaire
COLAS	COLCLAIR	Enrobé de couleur claire pour trottoirs, pistes cyclable et signalisation
	VEGECOL	Enrobé esthétique pour trottoirs, pistes cyclables avec un liant à haute valeur environnementale
	Route solaire	Revêtement routier photovoltaïque (mauvais REX)
	BBphon+	entre -2 et -3dB et -2 et -3°C ressenti pour un surcoût inférieur à 10%
	SMAphon	entre -2 et -3dB et -2 et -3°C ressenti pour un surcoût inférieur à 10%
EIFFAGE	BIOKROM	Bas-carbone, couleur claire pour mobilité douces
	BIOPHALT	Recyclable, liant végétal et adapté à tous trafics
	BIOKLAIR	Revêtement clair, liant végétal, voies cyclables et mobilités douces, possibilité de rendre perméable
EUROVIA	DRAINOVIA	Béton bitumeux drainant pour fort trafic
	Puma	entre -2 et -3dB et -2 et -3°C ressenti pour un surcoût inférieur à 10%
	Power Road	Production d'énergie par fluides caloporteurs sous la couche de revêtement

Figure 20 - Description des différents revêtements de voiries innovants

* Les liants végétaux sont particulièrement utiles lutter contre l'effet d'ICU puisque qu'il est plus facile de les pigmenter pour augmenter l'albédo en plus de leurs qualités environnementales.

À RETENIR

- ✓ Augmenter l'albédo permet de **diminuer la température de surface** mais doit tenir compte de la **capacité du matériau à se refroidir la nuit**.
- ✓ Tous les matériaux ne permettent pas tous les usages.

Morphologie urbaine

La prise en compte de la morphologie urbaine dans les projets d'aménagement peut constituer un second levier très important dans la lutte contre les îlots de chaleur urbains. On entend par morphologie urbaine tout ce qui concerne **la position des bâtiments et des aménagements, leurs orientations ainsi que leurs dimensions** (hauteur, emprise au sol, largeur de rue, etc). La difficulté de la prise en compte de la morphologie urbaine dans les projets d'aménagement réside dans le fait que ces projets s'intègrent déjà dans un cadre bâti et le plan masse n'est pas nécessairement libre. Cependant connaître les principes permettant d'éviter d'accentuer l'ICU écartera les mauvaises pratiques. Deux phénomènes à l'échelle du projet peuvent s'avérer particulièrement néfastes s'ils ne sont pas pris en compte : **la non-circulation de l'air dans les villes, qui n'évacue alors plus la chaleur accentuant la surchauffe urbaine ; et l'effet canyon qui consiste à piéger les rayonnements solaires par réflexion sur les parois de façades de bâtiments dans les rues**, augmentant ainsi la température.

En janvier 2018, l'article « Role of city texture in urban heat islands at night time » (J.M. Sobstyl & al, 2018) compare une cinquantaine de villes (notamment Nord-Américaines) et conclue que **plus le tissu urbain est organisé, avec des rues très rectilignes et un plan en damier** (comme pour New-York par exemple) **et plus la chaleur est piégée**, puisque les bâtiments échangent plus

d'énergie entre eux augmentant l'inertie et donc le rayonnement la nuit, **accentuant l'ICU**. Contrairement aux tissus plus sinueux tels que **les cœurs de ville historiques dans lesquels la chaleur s'évacue plus facilement**. Le tissu urbain fait alors varier les effets des îlots de chaleur urbains.

CIRCULATION DE L'AIR

La vitesse du vent a un effet direct sur le ressenti thermique de la population dans les villes. Une bonne circulation permet **d'évacuer la chaleur mais aussi les différents polluants**. L'accessibilité aux vents des espaces va favoriser l'évapotranspiration des plantes et diffuser la fraîcheur potentielle au travers de la ville surtout si l'humidité de la ville est importante. La qualité de la circulation de l'air dépend du tissu urbain en amont (vis-à-vis du sens du vent) et surtout de la rugosité du tissu urbain (Figure 21), La rugosité dépend de tous les éléments en ville qui vont empêcher le libre écoulement du vent. **Plus le tissu urbain sera rugueux et plus la circulation sera difficile.**

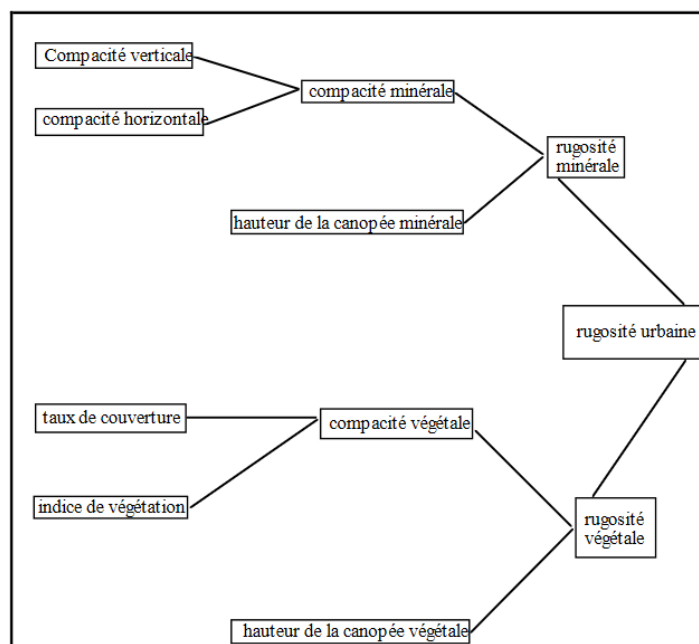


Figure 21 - Schéma de la rugosité urbaine, source : G. Deseez-Laurif, 1997.

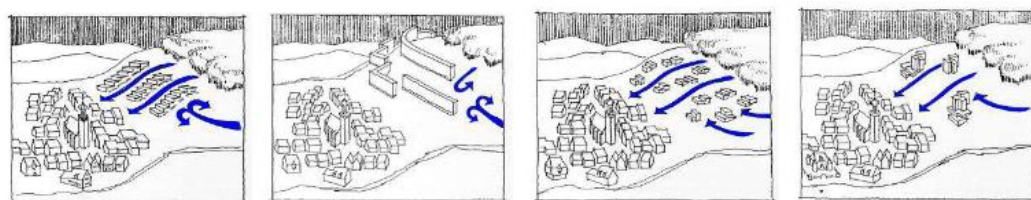


Figure 22 - Représentations schématiques des écoulements d'air face à diverses contraintes urbaines, source : Klimafibel, 2012.

La difficulté de l'écoulement du vent due à la rugosité du tissu urbain s'explique puisque la présence d'un bâtiment ou d'un quelconque édifice va venir perturber le mouvement des masses d'air (Figures 22 et 23).

Ecoulement autour d'un bâtiment	
Ecoulement dans la rue	
Effet de canalisation	
Effet Venturi	
Effet du coin	

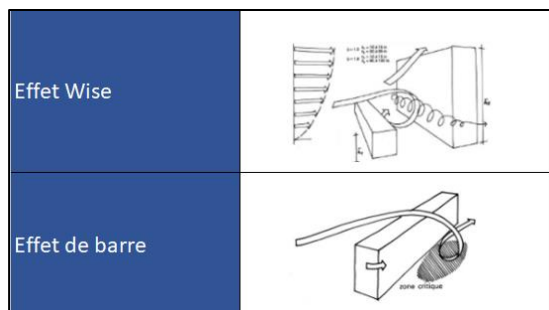


Figure 24 - Ecoulement de l'air entre et sur les bâtiments, sources : Gandemer et Guyot (1976), Oke (1988).

A l'échelle de la parcelle, il faudra alors prendre en compte l'orientation des façades en fonction du vent et la disposition des édifices. Lorsque le plan masse le permet, le vent, au même titre que le soleil, sera à prendre en compte et d'autant plus dans un contexte de changement climatique.

On peut quantifier la vitesse du vent souhaitable dans la ville pour diminuer les effets des îlots de chaleur urbains. **Une vitesse de 4m/s pendant la nuit et de 2 m/s le jour permettrait de rendre appréciable l'ICU** (Klysik & al., 1999). L'évacuation de la chaleur joue aussi directement sur la diminution de l'intensité de l'ICU (Figure 24).

Vitesse du vent de référence (m/s)	Intensité de l'îlot de chaleur (K)
1	4.5
2	3.4
3	3.4
4	2.6
5	2.2

Figure 23 - Variation de l'intensité maximale de l'ICU avec la vitesse du vent de référence, source : Escourrou (1991).

La ville de Stuttgart en Allemagne est assez pionnière dans la prise en compte de la circulation de l'air avec, en 1948, le « General Binding Site Plan », dans lequel la région intègre la climatologie au sein de la planification. Stuttgart est donc constituée de couloirs d'aération associés à des parcs et des interdictions de constructions à certains points clés pour éviter de perturber les masses d'air et permettre de rafraîchir de façon optimale la ville.

EVITER L'EFFET CANYON

On caractérise une rue canyon comme un passage encaissé entre deux reliefs de bâtiments sur plus de 100 mètres de manière ininterrompue et avec un **rapport moyen de hauteur du bâti sur la largeur de rue supérieure à 0,5**. Deux phénomènes peuvent intervenir dans une rue canyon :

- Si elle est orientée perpendiculairement au sens du vent et qu'elle accueille des véhicules, la circulation d'air au sein de la rue canyon va former un tourbillon **emprisonnant les pollutions** dues aux véhicules et les accumuler sur le côté situé sous le vent.
- Les rayonnements solaires émis sur les parois des façades de la rue canyon ne sont pas systématiquement réémis vers le ciel mais il y a plutôt une multi-réflexion de ces rayonnements. Les bâtiments et revêtements de sol vont alors absorber progressivement l'énergie issue de ces rayonnements. Ce phénomène est appelé le **piégeage radiatif** (M. Colombert, 2008).

Deux variables permettent de caractériser la rue canyon. Le rapport de la hauteur (H) des bâtiments et de la largeur (L) des rues a été utilisé dans les recherches de Oke en 1988 pour établir une relation directe entre l'intensité maximale de l'ICU¹⁰

$$dT_{max} = 7,54 + 3,97 \ln \frac{H}{L}$$

Avec :

dT_{max} l'intensité maximale de l'ICU en °C,

H la hauteur des bâtiments de façade en m,

L la largeur de la rue en m.

Il introduit aussi la notion de facteur de vue du ciel (FVC) pour caractériser la relation entre température et géométrie du canyon. Le FVC correspond à la proportion de ciel visible selon l'axe verticale. C'est une valeur prise entre 0 et 1, un FVC de 1 correspond à une surface plane sans obstacle.

En 2012, Rullier établit la formule suivante :

$$dT_{max} = 15,27 - 13,88 \Psi_{FVC}$$

Avec :

dT_{max} l'intensité maximale de l'ICU en °C,

Ψ_{FVC} le facteur de vue du ciel.

Les deux formules montrent que **l'augmentation de la largeur de la rue et la diminution de la hauteur des bâtiments permettrait de réduire la valeur de l'intensité maximale de l'ICU.**

DIFFICILE COMPROMIS ENTRE DENSIFICATION ET ESPACEMENT

Depuis plusieurs années maintenant, la densification de la ville est présentée comme une solution miracle de l'aménagement, elle permet de lutter contre l'étalement urbain en faisant des

¹⁰ D'après une comparaison sur 30 villes d'un million d'habitants.

économies de consommation des sols et en préservant par la même occasion les espaces naturels, forestiers et agricoles ; de limiter la surface des bâtiments en les concevant de façon plus compacte permettant de favoriser l'efficacité énergétique des bâtiments et de réduire l'utilisation des véhicules individuels avec une plus grande accessibilité des centres-villes, commerces, etc ; et donc de rentabiliser plus facilement les réseaux de transport en commun. Des perspectives intéressantes à prendre en compte dans les politiques environnementales dans un contexte de changement climatique. Cependant, densifier la ville rime aussi avec le fait de réduire la proportion d'espaces végétalisés en centre-ville, d'augmenter la rugosité de la ville et donc de limiter la circulation de l'air ou encore d'augmenter l'effet canyon en densifiant de façon verticale.

La densification ne doit alors pas se faire à tout prix, déjà parce qu'elle est compliquée à associer avec une politique de diminution des effets des îlots de chaleur urbains¹¹, mais aussi parce qu'elle est difficilement acceptée par la population qui y voit une perte d'intimité et de confort. Pour la rendre acceptable, il faut tendre vers plus de compréhension des aspirations sociales et environnementales des habitants.

Un compromis est donc à trouver entre la densification des villes, qui répond à des problématiques importantes de l'aménagement urbain mais qui a plus tendance à renforcer l'aspect

minéral des centres-villes et donc à augmenter l'intensité des ICU et **un espacement de la ville**, qui va favoriser la consommation d'espaces en périphérie des villes et augmenter l'utilisation de la voiture. Ce compromis peut passer par des aménagements plus ponctuels et stratégiques dans les villes denses. Avec par exemple des murs et toitures végétalisés.

À RETENIR

- ✓ Prise en compte de la **circulation de l'air** dans les projets d'aménagement pour améliorer le confort thermique et évacuer les polluants,
- ✓ Privilégier des **rues larges** et des **hauteurs de bâtiments faibles** pour diminuer la rugosité du tissu urbain,

¹¹ Même si elle permet de réduire l'utilisation de la voiture et les déperditions énergétiques entraînant une plus faible émission de chaleur d'origine anthropique, elle rend plus complexe la mise en place d'autres mesures.

Présence de la végétation

La présence de végétation intégrée au projet et en quantité suffisante **permet d'agir fortement sur la température de l'air** ambiant au travers de **l'évapotranspiration** et de réduire les températures de surface grâce à **l'ombrage** des canopées végétales. La végétation possède également un grand nombre de co-bénéfices associés :

- Elle favorise la **biodiversité** locale en fournissant un habitat et des ressources pour la faune,
- Elle permet d'améliorer **l'infiltration de l'eau** dans les sols,
- La végétation améliore le **confort et la santé physique et mentale** des habitants alentours,
- Elle permet aussi également d'améliorer la **qualité de l'air**.

Certains de ces co-bénéfices ne sont cependant significatifs que lorsque la végétation prend certaines formes et que la quantité de végétaux présents est en nombre suffisant, de telle sorte que :

- **Plus la surface des espaces réservée à la végétation est importante et plus la richesse spécifique est élevée,**
- On retrouve au sein des espaces végétalisés les plus importants le plus grand nombre des espèces spécialisées les plus fragiles

- De façon générale, **plus le maillage végétal est important et dense, et plus les bienfaits associés seront importants** (CEREMA, 2015). Les espaces verts **en pleine terre** sont à privilégier.

Il semble alors être intéressant de favoriser les corridors écologiques et la mise en place d'une trame verte sur le territoire lorsque cela est possible.

Afin d'être favorable à un maximum d'espèces animales, les espaces de natures devront constituer dans la mesure du possible, **une strate herbacée, une strate arbustive et une strate arborescente**. Le choix des essences va aussi avoir un impact sur la qualité de la végétation du projet. En 1997, dans *Végétalisation des espaces dégradés en altitude*, F. Dinger propose, pour « favoriser le retour à une plus grande biodiversité et stabilité des milieux réhabilités », des « recommandations nouvelles pour [...] l'introduction d'espèces végétales locales dans les mélanges de semences », en privilégiant les espèces colonisatrices indigènes. Donc des espèces végétales **locales** avec un fort taux de reproduction qui ne nécessitent pas l'intervention de l'homme pour couvrir l'espace.

Le terme « local » est assez vague et peut représenter plusieurs idées puisqu'il n'y a pas de caractère réglementaire pour encadrer ce qui est local. On peut parler de **variétés locales anciennes** lorsqu'il y a eu une sélection des variétés à planter, d'origine humaine, sur le territoire géographique. Les **espèces**

indigènes qui croissent naturellement sur le territoire sans avoir été introduites et le **végétal local prélevé** près du lieu d'aménagement ou sur un site avec des conditions climatiques et écologiques proches de celles du territoire. L'utilisation d'espèces locales et diversifiées dans les projets d'aménagement peut permettre de favoriser l'adaptation des végétaux sur le territoire et de limiter les risques de propagations de maladies sur les végétaux tout en privilégiant des filières locales qui valorisent l'économie régionale.

EFFET SUR LA SANTE

Outre les bienfaits écologiques et environnementaux inerrants à la végétation, la présence de la nature en ville a également **un impact positif direct socialement et sur la santé des usagers**. Un état des connaissances sur les impacts psycho-sociaux du végétal en ville a été réalisé par S. Manusset en 2012 (Figure 25) ainsi qu'une étude sur les impacts relatifs aux bienfaits sociaux et sur la santé physique et mentale (Figure 26). La végétation présente

donc un grand nombre de bénéfices indirects et joue un grand rôle dans les conditions de bien-être en ville.

Figure 25 - Principaux impacts psycho-sociaux du végétal en ville dans la bibliographie depuis le début des années 2000, source : S. Manusset (2012).

	Impacts sociaux	Impacts psychologiques
Principaux Résultats	↗ Relations sociales ↗ Cohésion sociale ↘ Violences domestiques	↘ Fatigue mentale ↘ Syndrome du déficit de l'attention et hyperactivité chez l'enfant ↘ Etat de stress et d'anxiété ↗ Bien-être (santé mentale)
Références bibliographiques	▪ Barbosa and al. (2007), <i>UK</i> ▪ Kuo and Sullivan (1996-2004), <i>USA</i> ▪ Schipperijn and al(2010), <i>Danemark</i> ▪ Seeland and al. (2009), <i>Suisse</i> ▪ Stahe (2009), <i>Sweden</i>	▪ Fuller and al. (2007), <i>UK</i> ▪ Graham and al. (2004), <i>Sweden</i> ▪ Jutras (2003), <i>Canada</i> ▪ Kuo and al. (2001, 2004), <i>USA</i> ▪ Sheet and Manzer (1991), <i>USA</i> - Ulrich (2002), <i>USA</i>

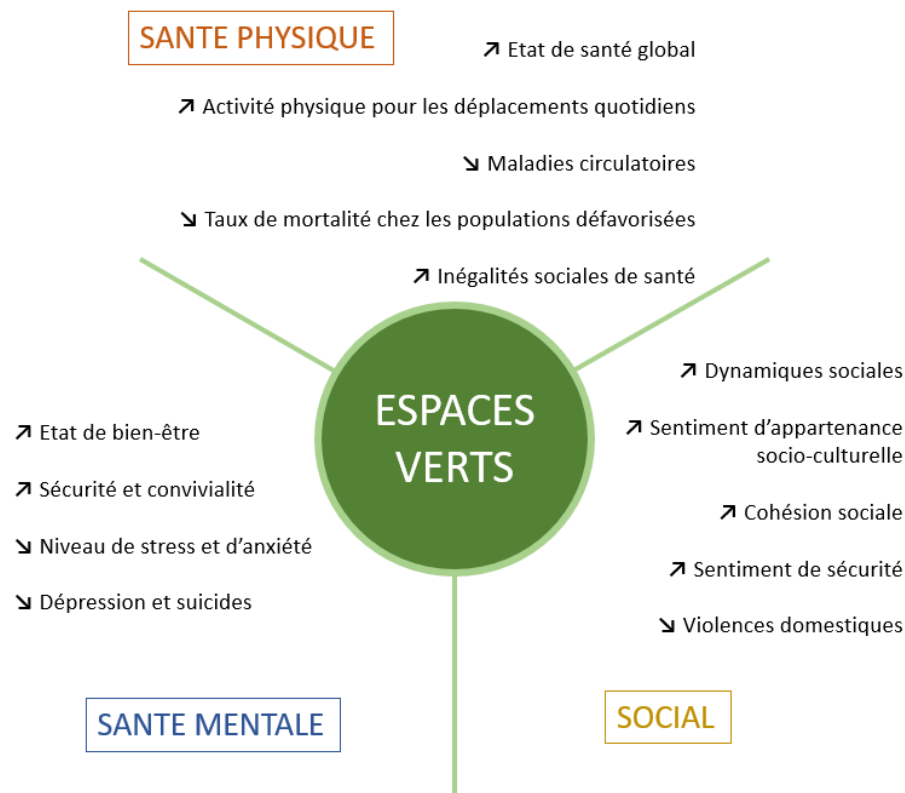


Figure 26 - Résultats des bienfaits du végétal en ville sur le social et la santé physique et mentale, source : S. Manusset (2012), réalisation : A. Foucher.

EVAPOTRANSPIRATION

L'évapotranspiration est un « phénomène combiné de perte en eau par **transpiration** et par **évaporation directe de l'eau du sol et des surfaces d'eau libre**. En effet, les transferts d'eau du système sol-végétation-atmosphère peuvent s'effectuer selon deux processus, soit par **évaporation directe de l'eau du sol**, soit par **évaporation de l'eau de transpiration des végétaux**, préalablement prélevée dans le sol par leur système racinaire. [...] Les deux processus se produisent simultanément et de manière telle qu'il est difficile de les distinguer, si bien qu'ils sont englobés sous le terme général d'évapotranspiration. » (J. Vinet, 2010). Ce phénomène est celui qui **participe directement à rafraîchir l'air ambiant** et donc à réduire les effets d'îlot de chaleur urbain. Avec une densité végétale suffisamment importante, ils peuvent participer à créer des **îlots de fraîcheur**. Cette évapotranspiration nécessite que la végétation ne soit **pas dans un état de stress hydrique**, diminuant les actions bénéfiques de la végétation en période de canicule puisque seul l'arrosage va alors permettre à cette végétation d'être efficace pour lutter contre les ICU. Il est fortement conseillé d'**associer la végétation avec des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales par l'infiltration** par exemple pour profiter de façon optimale des effets d'évapotranspiration.

OMBRAGE

Les strates arborescentes de la végétation permettent de créer un ombrage dans l'espace public, l'intensité de cet ombrage dépend de la densité de feuillage de l'espèce de l'arbre. Lorsqu'il y a suffisamment d'arbres (arbres d'alignement, parc, etc.), on parle de **canopée végétale**. L'ombrage permet de **rafraichir très fortement la température des revêtements de surface**. Attention tout de même, lorsque la densité de végétation de la canopée est trop importante, est que cette canopée se situe directement au-dessus d'une voirie VL ou poids lourds, la densité de la canopée **peut retenir les émissions de polluants et empêcher leur dispersion dans l'atmosphère**.

L'ombrage permet de lutter à l'échelle micro contre les îlots de chaleur urbains en fournissant des points de fraîcheur en ville. Ils ont aussi l'avantage de ne pas interférer avec les besoins en été de capter les rayonnements solaires pour réduire les besoins énergétiques des bâtiments puisqu'ils perdent leurs feuilles et réduisent donc totalement leur capacité à faire de l'ombre.

VEGETALISATION ET TYPOLOGIE D'ESPACE

Le rôle que va jouer la végétation dans un espace est conditionné la typologie de cet espace. Lors d'un projet, le plan masse ne peut souvent pas permettre tous les aménagements végétalisés et on aura alors une végétation qui va venir **structurer l'espace** de façon différente selon les choix retenus (Figure 27).

Typologie d'espace	Rôle de la végétation	Aménagement végétalisé
Voirie	Structurer l'espace, donner une limite, une échelle, donner un repère, conforter une identité	Arbres d'alignement, développement d'une canopée, bordure verte
Stationnement	Structurer l'espace, donner une limite, créer un écran/filtre, apporter du confort	Parking vert, sol perméable, haie, arbre individuel
Place	Structurer l'espace, donner une échelle, participer à la composition urbaine, apporter du confort, animer et qualifier, jouer sur la symbolique	Sol perméable, haie, arbre individuel, arbres d'alignement, pelouse, champs de fleur, jardins, espace vert, bordure de quai vert, ferme urbaine, verger urbain, vignoble urbain, développement d'une canopée
Zone verte	Structurer l'espace, composer des espaces, animer et donner des ambiances, apporter du confort, jouer la symbolique, donner une identité, rôle pédagogique	Sol perméable, haie, arbre individuel, arbres d'alignement, pelouse, champs de fleur, jardins, espace vert, bordure de quai verte, ferme urbaine, verger urbain, vignoble urbain, cimetière vert, développement d'une canopée
Zone bleue	Structurer, accompagner la trame verte et bleue, créer une ambiance, animer la promenade, apporter du confort, apporter une identité, jouer sur la symbolique	bordure de quai verte, front de mer vert, pelouse, sol perméable, jardin ,arbre d'alignement, développement d'une canopée, champs de fleur, ferme urbaine, verger urbain, vigneron urbain, prairie
Structures et bâtiments	Créer une ambiance, animer des espaces, rôle pédagogique, donner un repère, mettre en valeur le bâti	murs végétalisés, toitures végétalisées (jardins, ferme urbaine, pelouse)

Figure 27 - Rôle et exemples d'aménagements végétalisés en fonction de la typologie des espaces, source : interprétation d'après le SESAME.

Même si elle est une solution très efficace pour lutter contre les îlots de chaleur urbains et qu'elle présente beaucoup de co-bénéfices associés, la végétation présente aussi un certain nombre **d'externalités négatives** à prendre en compte dans les projets d'aménagement :

- Tout d'abord, l'espace végétalisé en ville est un espace qui n'est **pas ou peu accessible aux PMR**. La présence de végétation aux abords des trottoirs peut aussi représenter une gêne. Avec la croissance des arbres, les racines peuvent créer un dénivellement sur le trottoir qui peut s'avérer dangereux pour les PMR. (Certu, 2010)
- Les espaces verts demandent également un **entretien important et obligatoire par la commune**, mobilisant des moyens humains et financiers qui doivent être pris en compte lors des choix d'aménagement.
- La végétation est aussi **émettrice de composés allergènes** dans l'environnement alentour qui peuvent entraîner une gêne pour les habitants voir créer différents problèmes de santé.
- Enfin, faire le choix d'un aménagement végétalisé avec la création d'un îlot de fraîcheur fait augmenter le coup de l'immobilier alentour, entraînant un phénomène de **gentrification** et une perte de mixité sociale. « Un arbre adjacent à un domicile peut faire augmenter la valeur de la propriété de 3 à 19%. » (Shoup, 1996).

EXTERNALITES ET CONTRAINTES DE LA VEGETATION

EXEMPLES DE BONNES PRATIQUES

La place Lucie Aubrac, à Saint-Martin-d'Hères en périphérie de Grenoble, requalifiée en 2007 à l'occasion de l'arrivée du tramway dans la commune puis en 2017 pour la phase 2 de réaménagement de la place, repose sur un principe **de végétalisation à l'îlot**.

MOE : In Situ (Lyon) Paysage et Urbanisme et E2CA pour la VRD

Coût du projet : 1,509 M€ HT

Surface : 8000 m² d'espace public

Ce choix d'aménagement offre de multiples avantages :

- Il offre un cadre de qualité en isolant les usagers de la circulation et rend la place attractive,
- Les différentes strates de végétation par îlot favorisent la biodiversité et le développement de la faune et de la flore locale,
- Les jardins de pluie permettent la gestion des eaux pluviales par infiltration

Le retour d'expérience souligne **l'apport de fraîcheur et d'ombre** des jardins de pluie sans pour autant quantifier la diminution de température d'air ou des surfaces de la place.



Figure 28 - Plan Masse – place Lucie Aubrac, Saint-Martin-d'Hères (38), source : CEREMA (2021).

Le programme de requalification du stade du Ray à Nice en logements, parc paysager, commerces et équipements sportifs pour Vinci Immobilier affiche une ambition écologique importante.

MOE : Maison Edouard François (Architecte), VERDIER ingénierie (Structure), INGEROP (Fluides), VPEAS (Economistes), La compagnie du paysage (Paysagiste).

Budget : 45 M€

Surface : 25 000 m²

Livraison prévue : 2021

La parc, combiné à l'ensemble des toitures végétalisées du projet et des façades végétales avec des plantes grimpantes permettront d'apporter de la fraîcheur dans le quartier et de **limiter la température des bâtiments avec l'ombre et l'évapotranspiration des plantes.**



Figure 29 - Projet de requalification, Quartier du Ray, Nice, source : Edouard François (2016).



Figure 30 - Projet de requalification, Quartier du Ray, Nice, source : Edouard François (2016).

À RETENIR

- ✓ Très **efficace** pour lutter contre les ICU,
- ✓ Apporte beaucoup de **co-bénéfices** (bien-être, santé, biodiversité, gestion de l'eau de pluie, etc...),
- ✓ Externalités négatives :
 - Entretien important,
 - Accessibilité PMR,
 - Allergies,
 - Gentrification.

Chaleur anthropique

Entre 15 et 20 % de l'énergie, échangée sous forme de chaleur, est émise en ville par différentes sources de chaleur anthropique. On définit cette chaleur anthropique comme celle **émise par toutes sortes d'activités humaines**. Elle influence de façon très localisée le phénomène d'îlot de chaleur urbain mais peut faire fortement varier les températures (Figure 31).

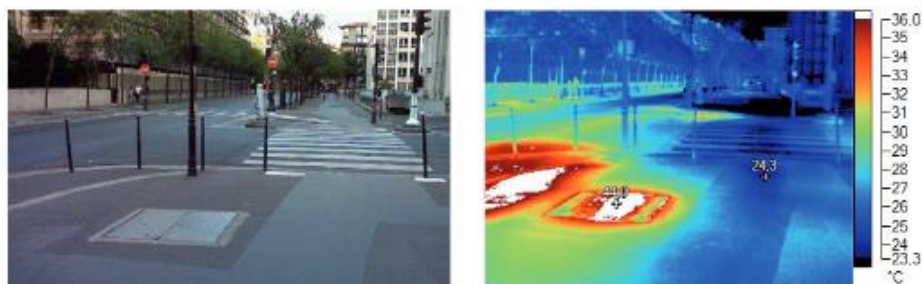
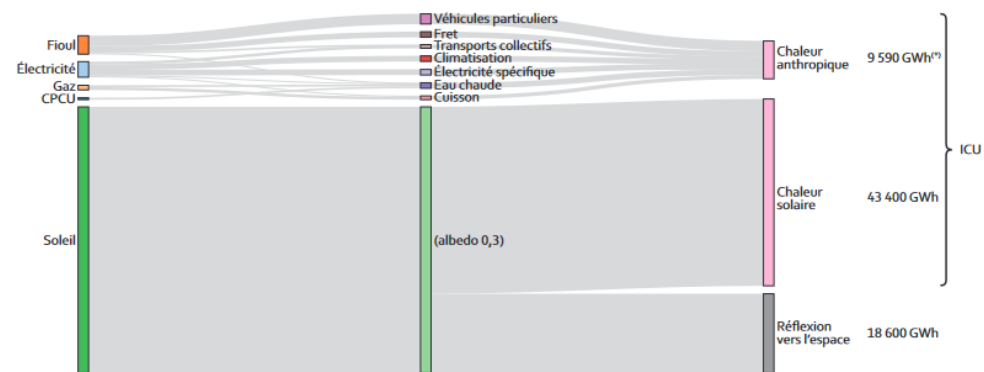


Figure 31 - Impact du chauffage sur l'ICU dans l'espace public, source : APUR (2012).

SOURCES DE CHALEUR ANTHROPIQUE

Les sources de chaleur anthropique en ville sont nombreuses, de nature différente et influencent plus ou moins la température en ville. On peut citer comme exemple de source de chaleur les véhicules individuels, les climatiseurs en été, l'éclairage public, les

besoins des bâtiments, etc. (Figure 32) Même si toutes les mesures d'atténuation du phénomène d'ICU sont bonnes à prendre, 2 sources de chaleur anthropiques seront prises principalement en compte dans les projets d'aménagement. La voiture individuelle à cause de son impact important sur la chaleur mais aussi sur la pollution des villes, et le climatiseur pour son recours de plus en plus systématique et son rejet de chaleur vers l'extérieur important (Figure 33).



(*) GWh (pour « Giga Watt heure ») est une quantité d'énergie. Une ampoule de 100 Watts qui fonctionne pendant 10 heures consomme 1 kWh (pour « kilo Watt heure »). 1 GWh c'est 1 million de kWh.

Source : CEREN (2011)

Figure 32 - Bilan énergétique du territoire parisien entre mai et septembre 2009, source : CEREN (2011).

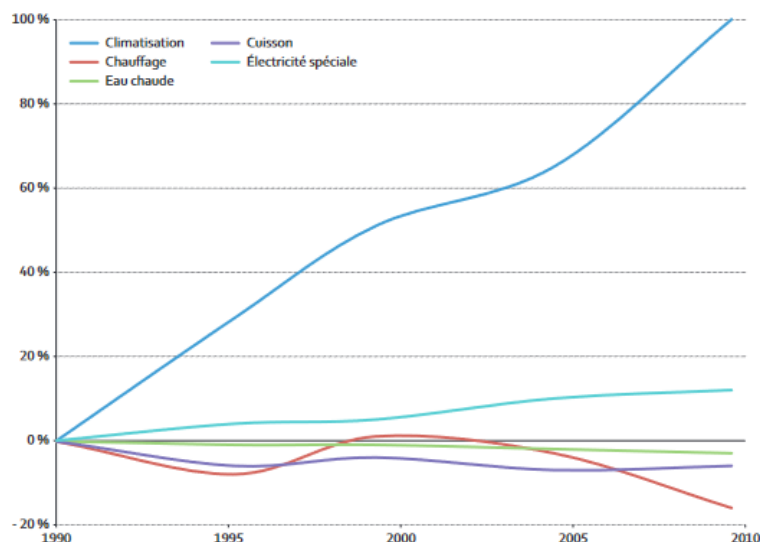


Figure 33 - Evolution des consommations d'énergie des commerces parisiens de 1990 à 2009, source : CEREN (2011).

GESTION ET ORGANISATION DU TRAFIC URBAIN

Les choix d'aménagement réalisés en ville peuvent agir sur l'utilisation des véhicules individuels. Par des **mesures incitatives de réduction** de leur utilisation tels que des limitations de circulation, des péages urbains, des stationnements payants ou limités dans les centres-villes ou une piétonnisation des rues. Ou alors en **développant des solutions alternatives à ces modes de transports**, avec par exemple le développement des transports en commun ou de voies cyclables. A Pékin, le remplacement du parc automobile

traditionnel par le métro et une flotte de véhicules électriques a permis de réduire l'intensité de l'îlot de chaleur urbain de 1°C (ADEME, 2021).

SOLUTIONS ALTERNATIVES A LA CLIMATISATION

L'augmentation de la température induite par la climatisation à air sec, la plus majoritairement utilisée, peut entraîner une augmentation de la température d'air locale allant **de +0,2°C à +2,5°C** (Munck et al., 2013 ; Wang et al., 2018). Ce système peut s'apparenter au choix de la facilité dans la conception des bâtiments puisque le climatiseur viendra **réguler la température intérieure des bâtiments aux dépends de la température extérieure**. Cependant, une **architecture bioclimatique**, ainsi que des aménagements réduisant l'apport solaire sur les bâtiments permette de réduire la température intérieure et donc de limiter le recours au climatiseur.

D'autres solutions de refroidissement de l'air intérieur avec des rejets de l'air chaud à l'extérieur de façon minime existent. C'est le cas par exemple de la ventilation nature pris en compte dès la conception des bâtiments ou des grands réseaux de froid urbain tel que le réseau CLIMESPACE à Paris qui va déporter les rejets d'air chaud vers le site de production du froid et le transporter via des fluides caloporteurs vers différents bâtiments au travers du réseau.

PRISE EN COMPTE DE LA POLLUTION

La pollution atmosphérique n'a **pas d'effet aggravant connu sur l'intensité du phénomène d'îlot de chaleur urbain**. Les connaissances établies sur le sujet montrent même que la pollution de l'air diminue le rayonnement solaire incident de l'ordre de 3 à 10% qui diminue la température de l'air par rapport à la périphérie. Notamment à cause de la **formation d'un smog**¹² aux effets très néfastes sur la santé humaine. Mais si la pollution n'a pas d'effet direct sur les ICU, l'inverse n'est pas vrai. En effet, **l'augmentation des températures en ville aggrave la pollution atmosphérique** puisque certains polluants nécessitent de fortes chaleurs pour se former (au-delà de 30°C). La circulation de l'air, que ce soit à l'échelle de la ville avec l'air chaud qui monte au-dessus des centres urbains pour redescendre en périphérie et former une boucle avec une accumulation des polluants en centre-ville (Figure 34), ou les effets de canyon urbains participent à augmenter les risques et enjeux sanitaires en ville.

¹² Mélange toxique de gaz et de particules que l'on peut souvent observer dans l'air sous forme de brume sèche (Environnement Canada, 2011)

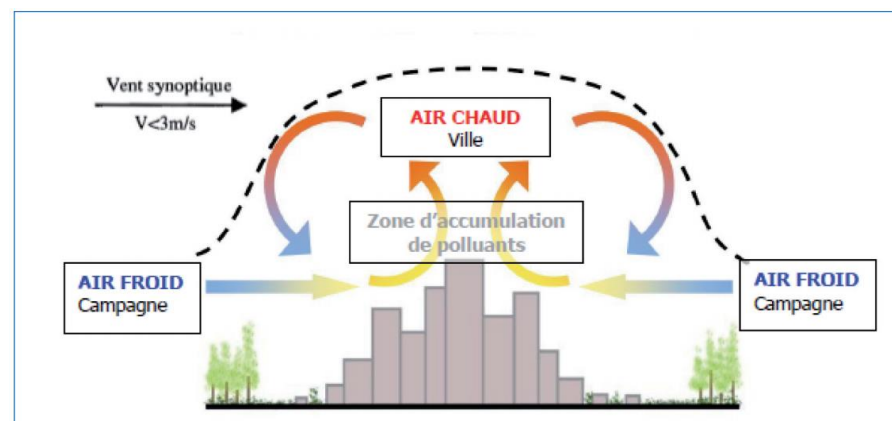


Figure 34 - Phénomène de convergence des vents entre la ville et la campagne, source : IAU (2010)

EXEMPLES DE BONNES PRATIQUES

Le projet de ZAC « Saint-Sauveur » à Lille, qui va s'inscrire sur la friche de l'ancienne gare ferroviaire de marchandises transformée en centre culturel s'inscrit sur un site de 23 hectares localisé dans le sud du quartier de Lille-centre, dans l'intra-muros lillois (Figure 35). Ce projet s'inscrit dans une démarche de développement durable et implicitement, ses choix d'aménagements participent à réduire les effets des îlots de chaleur urbains. Notamment la **morphologie du projet**. Avec des **constructions à l'îlot** et un rapport à la densité

urbaine maîtrisé tout en **limitant la rugosité du tissu urbain** (Figure 36). **Le sens du vent est d'ailleurs pris en compte dans le projet pour l'orientation des îlots avec les 2 espaces verts** qui vont se situer en amont des constructions par rapport au sens du vent venant apporter de la fraîcheur. Cette morphologie va faciliter la circulation de l'air et permettre de dissiper la chaleur et les polluants. **L'usage de la voiture est réduit à deux axes principaux et les dispositions sont prises pour fluidifier le trafic, il sera d'ailleurs très limité autour des îlots** donnant plus de place aux espaces piétonnisés et aux pistes cyclables avec une offre de transport en commun de qualité.



Figure 35 - Master Plan, ZAC « Saint Sauveur », Lille, source : Gehl Architects

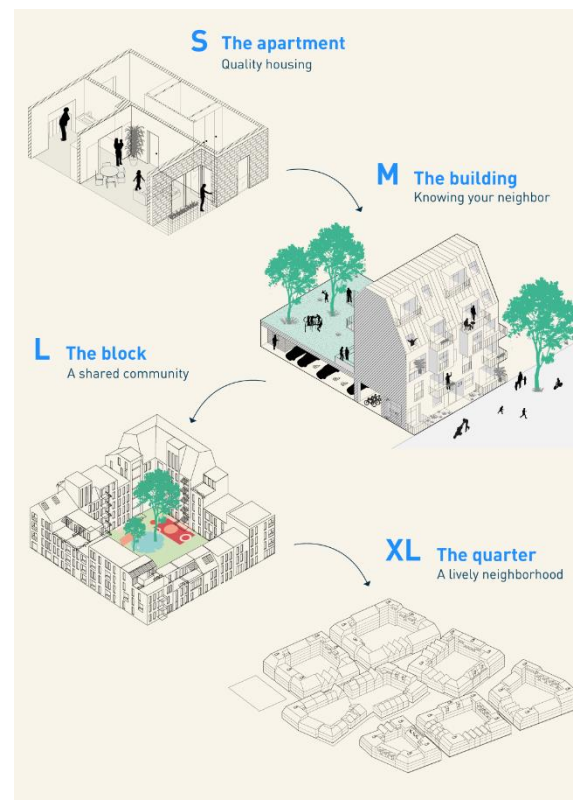


Figure 36 - Principe de construction à l'îlot, ZAC « Saint Sauveur », Lille, source : Gehl Architects

À RETENIR

- ✓ 15 à 20% de l'énergie émise sous forme de chaleur = sources anthropiques (principalement VL et climatisation),
- ✓ L'ICU **aggrave la pollution** dans les villes,
- ✓ **Limitier le trafic** de véhicules et privilégier **les architectures bioclimatiques**.

Présence d'eau

Finalement, l'eau constitue un dernier levier de lutte contre les îlots de chaleur urbain. De nombreuses typologies d'espaces et de mobilier urbains peuvent induire la présence de l'eau en ville : espaces naturels (lac, rivière, etc.), fontainerie ou aménagements de gestion des eaux de pluie. Ces aménagements ont des effets différents sur la lutte contre les ICU et la perception que les gens ont des **îlots de fraîcheur**. Le potentiel de rafraîchissement des aménagements d'eau à surface est assez limité, l'évaporation de l'eau va **augmenter l'humidité de l'air et refroidir légèrement l'espace alentour** lorsque la surface d'eau est suffisante. **La brumisation va augmenter assez significativement la sensation de fraîcheur**. Ils peuvent aussi agir de façon plus directe sur le confort thermique de la population qui travers ces espaces. En constituant un point d'eau potable par exemple, ou de baignade dans certains cas. Une autre manière de contribuer à réduire l'effet d'ICU en ville consiste à **humidifier les voies lors de périodes de forte chaleur** afin de réduire les températures de surface (Figure 37). Des études menées par Véolia ont notamment permis de montrer une **réduction de la température de chaussées de 5°C**.

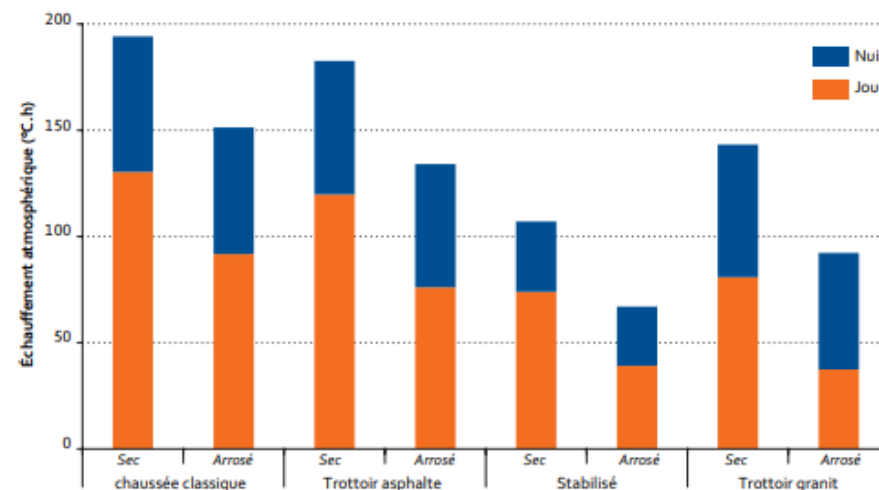


Figure 37 - Contribution à l'échauffement atmosphérique du revêtement avec et sans arrosage, source : APUR.

GESTION ALTERNATIVE DE L'EAU EN VILLE

La politique mise en place depuis maintenant plusieurs années sur la gestion des eaux de pluies favorise l'infiltration lorsque cela est possible au plus proche du point de chute de l'eau, elle a permis de voir se développer un certain nombre de techniques et d'aménagements permettant cette gestion alternative de l'eau en ville :

- **Les noues et fossés** qui constituent des espaces verts propices à la biodiversité, peu onéreuses, permettent

d'infiltrer l'eau de pluie ou, lorsque l'infiltration est impossible ou limitée, d'amener le surplus vers l'exutoire. L'eau participe alors à remplir les nappes phréatiques, à arroser les plantes dans les noues et fossés mais aussi aux alentours ainsi qu'à favoriser la biodiversité. Ces ouvrages sont particulièrement adaptés pour être positionnés en bordure de voirie en tenant compte des possibilités de pollution chroniques ou accidentelles.

- Les ouvrages d'infiltration autres, tels que les **revêtements de surface perméables** (alvéolaires, poreux, etc.) ou les **puits d'infiltration** permettent les mêmes bénéfices sur des typologies d'espaces différents. Le puit est peu consommateur d'espace alors que les revêtements perméables sont adaptables à plusieurs typologies de voiries.
- Les ouvrages d'**arrosage grâce à l'eau de pluie**. Utilisent des techniques de récupération de l'eau de pluie de manière intelligente afin de la réutiliser (ou la stocker pour pouvoir l'utiliser ultérieurement) pour arroser la végétation par exemple.

Ces techniques de gestion alternative de l'eau pluviale sont très efficaces sur le territoire pour lutter contre les ICU, la portée de leurs effets est très peu mesurée mais elles permettent de garder l'eau dans les villes permettant de la restituer lors des épisodes

caniculaires et d'éviter dans la mesure du possible le stress hydrique des plantes qui vont lutter plus efficacement contre les ICU.

Les techniques de gestion alternative des eaux pluviales nécessitent de connaître la perméabilité du sol pour dimensionner les ouvrages. Au-delà d'un coefficient de perméabilité **$K = 10^{-7} \text{ m/s}$** , **l'infiltration n'est alors pas recommandée**. Au contraire, pour une infiltration inférieure à **10^{-2} m/s** , **des dispositifs de prétraitement sont à prévoir afin d'éviter le lessivage des sols** et les puits d'infiltration sont interdits. (Fiche n°00, Grand Lyon).

BIEN ETRE ET ILOT DE FRAICHEUR

Les ouvrages de fontainerie ou les espaces d'eau naturels urbains constituent généralement des lieux structurants pour la ville qui sont **source de bien-être** et représentent de **véritables îlots de fraîcheur urbains**. La place des Carmes à Clermont-Ferrand, dont la date d'inauguration est prévue prochainement¹³ intègre différents éléments de fontainerie donnant une place à l'eau sous différentes formes et se revendiquant comme un îlot de fraîcheur au cœur de la ville. Les miroirs et murs d'eau en font un élément visuel fort (Figures 38 et 39).

¹³ Au moment de l'écriture de ce guide.



Figure 38 - Ambitions environnementales du projet des Carmes, Clermont-Ferrand, source : Dossier de presse, CAM (2021).

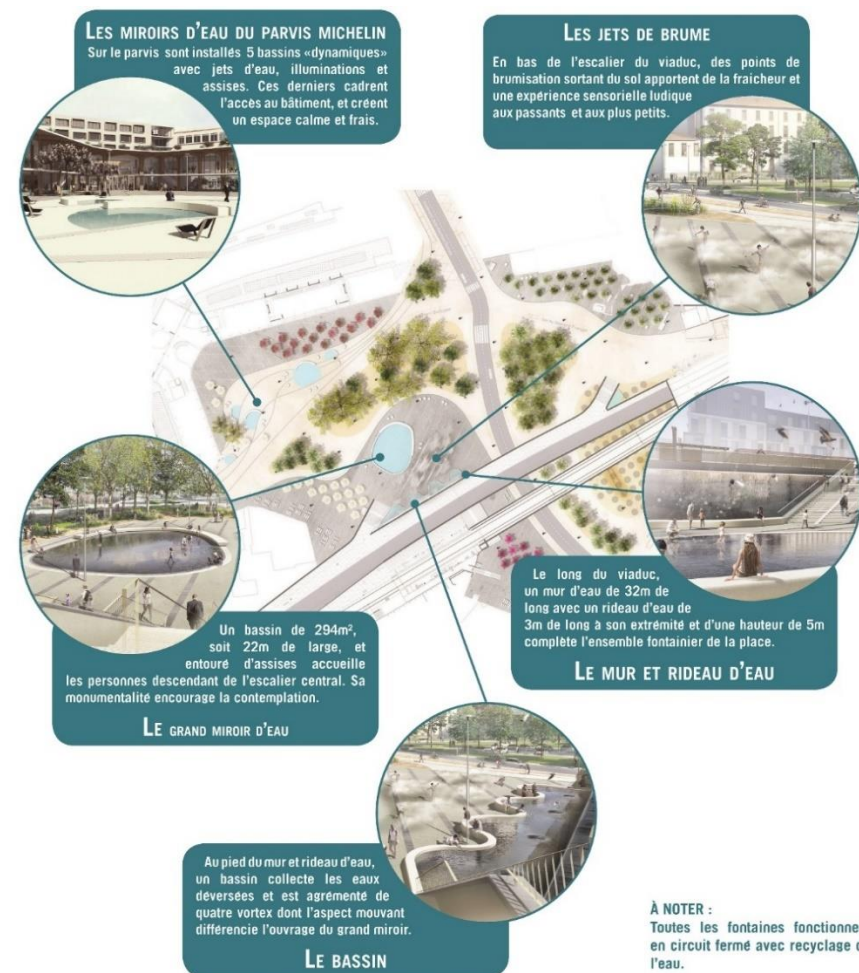


Figure 39 - Aménagements et ouvrages d'eau du projet des Carmes, Clermont-Ferrand, source : Dossier de presse, CAM (2021).

EXEMPLES DE BONNES PRATIQUES

Ecoquartier Paris gare de Rungis 13^{ème}

Maitrise d'ouvrage : Mairie de Paris

Maitrise d'œuvre : SEMAPA (aménageur), Pierre Riboulet (architecte urbaniste), Atelier Choiseul (architecte), Ingénieurs et paysages (paysagiste), Arcadis (BE), Thalès (BE)

Le projet d'écoquartier met en avant des enjeux de performance environnementale :

- Le choix de l'énergie fournie par la CPCU (Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain),
- Une démarche très volontaire pour réduire la consommation d'énergie et donc contribuer à la réduction des émissions de CO₂ et des gaz à effet de serre :
Pour les bâtiments :
 - Consommation limitée à 50 kW/H/m² / an,
 - Mise en place de panneaux solaires thermiques (production d'eau chaude),
 - Production d'énergie photovoltaïque.
- Limitation de l'usage de l'automobile et préconisation en faveur des circulations douces,
- Développement de la biodiversité (jardin public).

Le principe de gestion des eaux pluviales permet d'éviter la surcharge du réseau d'assainissement en cas d'orage, le système de récupération et de réutilisation des eaux pluviales permet d'arroser des jardins privés, le jardin public et d'alimenter les sanitaires des bureaux et de la résidence universitaire. Il a été élaboré dès la phase de conception du projet. Ce dispositif permet une réduction de la consommation en eau potable de l'ordre de 50% à l'échelle du quartier.



Figure 40 – Projet d'écoquartier – Gare de Rungis

IV – CONCLUSION ET SYNTHÈSE DES BONNES PRATIQUES PAR TYPOLOGIE D'ESPACES

Le phénomène d'îlots de chaleur urbain, bien qu'encore trop méconnu, peut être combattu au travers de différentes mesures **d'atténuation et d'adaptation des projets aux fortes chaleurs**. Chaque levier que l'on a pu identifier ici comporte des avantages mais aussi des inconvénients. Il semble **très difficile de quantifier l'efficacité d'une mesure** sur la diminution de la chaleur en ville pour plusieurs raisons :

- Parce que la température des **villes dépend de variables climatiques locales** et donc les effets des mesures peuvent s'avérer très différents d'un endroit à l'autre,
- Parce que diminuer l'intensité des ICU ne signifie pas toujours diminuer le stress thermique subi par la population dans certaines situations. Et donc que le **choix des indicateurs** doit se faire de façon pertinente en fonction du projet.
- Parce qu'elle **dépend aussi fortement du plan masse et de la morphologie de la ville**, la majorité des leviers viennent s'appuyer sur des typologies d'espaces existants en ville.

Les REX fournissent une base de connaissances quantifiées des conséquences des aménagements sur la température extérieure en ville et permettent de comparer directement les mesures prises avec les températures avant le projet (en moyenne puisque les variables climatiques ne sont pas identiques) mais aussi par rapport à la température à la périphérie de la ville. En 2017, l'ADEME s'est appuyée sur un certain nombre de REX pour établir un **ordre de grandeur du refroidissement moyen journalier de l'air de solutions d'aménagement** (vertes, grises ou douces). La figure (Figure 42) a été établie à partir de la méta-analyse de Santamouris et al. en 2017.

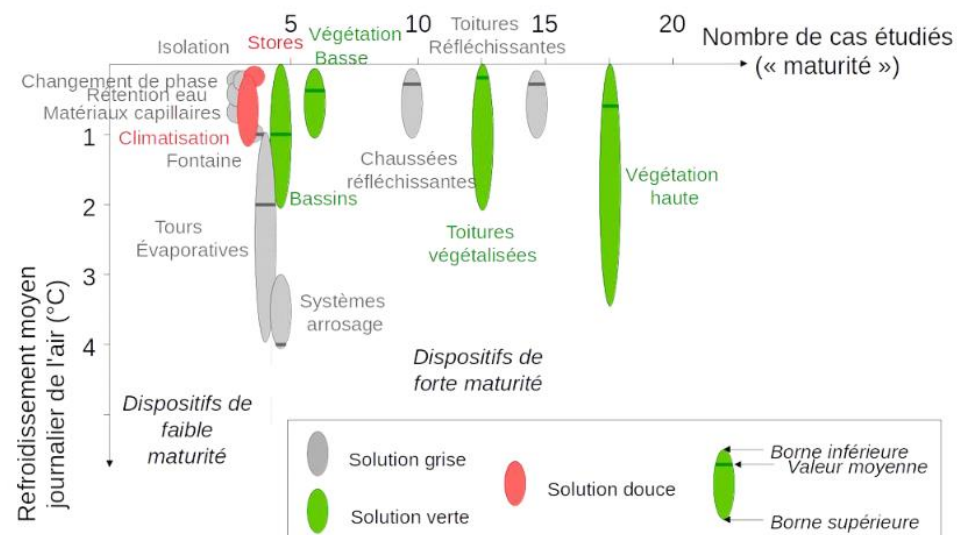


Figure 42 - Ordre de grandeur du refroidissement moyen journalier de l'air occasionné par un dispositif en regard de sa maturité, source : ADEME (2017).

La figure montre surtout **l'efficacité des mesures de solution grises et vertes** mais attention tout de même, les comparaisons des REX, inégales entre plusieurs dispositifs, ne sont peut-être pas comparables dans leurs ambitions de réduction des ICU ou dans l'application et la bonne utilisation des dispositifs choisis.

La conclusion est alors que **la mise en place de dispositifs d'atténuation et d'adaptation des projets aux ICU doit se faire selon des bonnes pratiques par typologie d'espace et en prenant en compte les avantages et inconvénients de chaque dispositif**. Il sera alors possible de comparer les pratiques entre elles pour sélectionner les plus pertinentes sans pour autant quantifier précisément l'impact de la mesure sur la température.

À RETENIR

- ✓ Meilleurs REX pour **les solutions vertes et grises** sur l'efficacité contre les ICU,
- ✓ **Difficulté de quantifier** l'impact d'une solution sur les ICU lors des projets,
- ✓ Solutions à intégrer selon des **bonnes pratiques par typologie d'espace**.

La rue étroite

- ❑ Rapport $\frac{H}{L} > 1,5$
- ❑ **Ombre important** la journée à cause du faible facteur de vue du ciel
- ❑ Typologie d'espace à faible trafic (voir nul) → espace piéton ou cyclable
- ❑ Choix de solutions d'aménagement contraints



Solution d'aménagement	Effet sur le confort thermique	Effet sur la Température à l'échelle de la ville	Effet sur la Température de surface	Effet sur consommation énergétique des bâtiments	Impact sur la biodiversité	Coût	Effet Bien être et santé
Augmenter l'albédo des revêtements de sol	négligeable	négligeable	négligeable	négligeable	-	faible	-
Augmenter l'albédo des façades	négligeable	négligeable	moyen	moyen	-	faible	-
Façade végétalisée	négligeable	négligeable	moyen	moyen	fort	élevé	fort
Plantation ponctuelle (bac de fleur, etc)	négligeable	négligeable	négligeable	négligeable	faible	faible	moyen
Supprimer la circulation automobile (lorsque ce n'est pas déjà le cas)	moyen	négligeable	négligeable	négligeable	négligeable	Variable	fort
Revêtement de sol perméable / poreux	négligeable	négligeable	négligeable	négligeable	négligeable	moyen	négligeable
Structure d'ombrage (voile d'ombrage, etc)	moyen	négligeable	négligeable	moyen	négligeable	faible à moyen	moyen

Les solutions d'aménagement relatives aux revêtements de sol de la rue étroite n'ont que peu d'incidence sur l'ICU.

Les rayonnements solaires qui se réfléchissent sur les façades à fort albédo peuvent entraîner un **inconfort visuel** à cause de l'éblouissement.

L'effet sur la consommation énergétique des bâtiments est **négligeable** lorsque ceux-ci sont **bien isolés**.

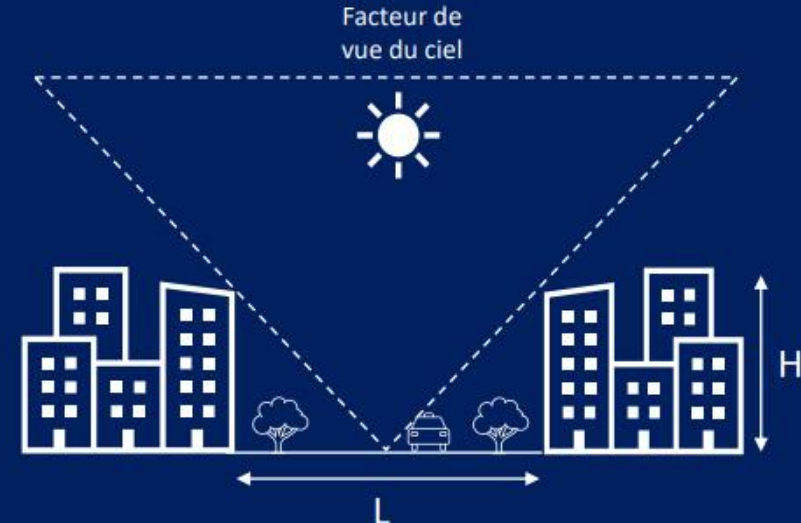
Plantations en **pleine terre** à privilégier mais souvent rendus impossibles par l'encombrement des sols par les réseaux.

Souvent impossible à cause de l'encombrement des sols par les réseaux.

En hiver, l'ombre portée sur les façades de bâtiments peut **augmenter la consommation énergétique**. Des **structures éphémères en été** sont à privilégier.

La voie large

- ❑ Rapport $\frac{H}{L} < 1,5$
- ❑ Typologie d'espace avec trafic et donc émission de chaleur et de polluants
- ❑ Choix de solutions d'aménagement plus libre
- ❑ Ombrage faible la journée en l'absence de mobilier d'ombrage ou de végétation



Solution d'aménagement	Effet sur le confort thermique	Effet sur la Température à l'échelle de la ville	Effet sur la Température de surface	Effet sur consommation énergétique des bâtiments	Impact sur la biodiversité	Coût	Effet Bien être et santé
Arbres d'alignement le long de la voirie	fort	fort	fort	faible	fort	Variable	fort
Façades végétalisées	faible	faible	moyen	fort	moyen	élevé	fort
Noues ou fossés	moyen	moyen	faible	négligeable	fort	faible	moyen
Fontainerie	moyen	moyen	faible	faible	faible	élevé	moyen à fort
Brumisation	fort	moyen	moyen	faible	négligeable	élevé	moyen
Arrosage de la voirie	faible	fort	fort	faible	négligeable	moyen	négligeable
Augmenter l'albédo des revêtements de sol	faible	moyen à fort	fort	faible	-	faible	-
Mobilier urbain d'ombrage	fort	faible	fort	faible à moyen	-	élevé	faible
Revêtements poreux / perméables	faible	faible	moyen	négligeable	faible	moyen	faible
Limiter le trafic	fort	fort	faible	faible	moyen	Variable	fort



- Privilégier les plantations en **pleine terre**,
- Planter **différentes strates de végétation**,
- Attention, une **canopée trop dense** au dessus de la voirie peut **empêcher la dispersion des polluants**,
- La possibilité de plantation d'arbres d'alignement dépend fortement de la **présence de réseaux**,
- Prendre en compte l'**accessibilité PMR** sur les trottoirs



Peut s'avérer **difficile voir impossible** à mettre en place en cas de **forte circulation**.



Question sur la **préservation de la ressource en eau** spécialement lors des périodes de forte chaleur.



Attention à ne pas créer de structures d'ombrage au dessus de la voirie qui pourrait **empêcher la circulation d'air et la dispersion des polluants**.



La **végétation** proche des revêtements poreux peut venir colmater les pores et **limiter l'infiltration**.



Privilégier les **transports en commun**.

La voie large permet un **écoulement de l'air** en ville, la **création d'espaces verts** en amont (dans le sens du vent) permet d'apporter de la **fraîcheur**.

La place

- ❑ Facteur de vue du ciel très important → subit fortement les rayonnements solaires
- ❑ Appropriation de l'espace par les piétons, cyclistes, transports en communs et éventuellement plus ponctuellement par les VL et PL.
- ❑ Peut être le support d'activité lors d'évènements particuliers (grande roue, rassemblement, etc...) = contraintes supplémentaires



Place de Jaude, Clermont-Ferrand. (Google Streetview)

Solution d'aménagement	Effet sur le confort thermique	Effet sur la Température à l'échelle de la ville	Effet sur la Température de surface	Effet sur consommation énergétique des bâtiments	Impact sur la biodiversité	Coût	Effet Bien être et santé
Strate haute de végétation / canopée	fort	fort	fort	faible	fort	Variable	fort
Strate basse de végétation	moyen	moyen	fort	faible	fort	faible	fort
Façades végétalisées	faible	faible	moyen	fort	moyen	élevé	fort
Noues	moyen	moyen	faible	négligeable	fort	faible	moyen
Fontainerie	moyen	moyen	faible	faible	faible	élevé	moyen à fort
Brumisation	fort	moyen	moyen	faible	négligeable	élevé	moyen
Augmenter l'albédo des revêtements de sol	faible	moyen à fort	fort	faible	-	faible	-
Mobilier urbain d'ombrage	fort	faible	fort	faible à moyen	-	élevé	faible
Revêtements poreux / perméables	faible	faible	moyen	négligeable	faible	moyen	faible



- Privilégier la **végétation en pleine terre**,
- La présence de végétation sur la place est conditionnée par l’emprise des **réseaux**.

L’aspect généralement très **minéral** de la place en ville fait qu’elle **accentue l’effet d’ICU**. Les solutions d’aménagement sur cet espace représentent des **leviers important de lutte contre ces effets**.



Peut représenter une gêne pour les usagers en termes **d’éblouissement** et de **ressenti thermique** lorsqu’il y a une forte activité le jour.



La **végétation** proche des revêtements poreux peut venir colmater les pores et **limiter l’infiltration**.



Les **propriétés mécaniques** des revêtements doivent permettre de **supporter les évènements et activités** sur la place.

Les parcs et jardins

- ❑ Constituent un **îlot de fraîcheur urbain**
- ❑ Indispensable au **bien-être** dans les villes. Type d'espace support d'activités culturelles et sportives
- ❑ Usagers principalement piétons et cyclistes
- ❑ Les aménagements dans les parcs et jardins ne constituent **pas des leviers importants pour lutter contre l'ICU**, en revanche ces aménagements **ne doivent pas réduire le potentiel de rafraichissement** de cet espace



Jardin Lecoq, Clermont-Ferrand. (Google Streetview)

Solution d'aménagement	Effet sur le confort thermique	Effet sur la Température à l'échelle de la ville	Effet sur la Température de surface	Effet sur consommation énergétique des bâtiments	Impact sur la biodiversité	Coût	Effet Bien être et santé
Cheminement sol poreux / perméable	faible	faible	moyen	négligeable	faible	moyen	faible
Cheminement stabilisé / pavé	faible	faible	moyen	négligeable	négligeable	moyen	négligeable
Mobilier urbain d'ombrage	fort	négligeable	fort	négligeable	-	moyen	faible
Fontainerie / bassins	moyen	moyen	négligeable	faible	moyen à fort	élevé	fort
Brumisation	fort	faible	faible	faible	faible	moyen à élevé	moyen
Strate haute de végétation / canopée	fort	fort	fort	faible	fort	variable	fort
Strate basse de végétation	moyen	fort	faible	faible	fort	faible	fort
Noues et fossés	faible	moyen	-	négligeable	fort	faible	moyen



Les techniques de gestion alternative de l'eau de pluie par infiltration permettent d'améliorer l'efficacité de la végétation à proximité.



Préférer les strates de végétation arborescentes dans les parcs pour l'ombrage.

Le parc ou le jardin constitue déjà un îlot de fraîcheur en ville. Son insertion dans la morphologie urbaine va permettre de rafraîchir les rues adjacentes en prenant en compte l'écoulement de l'air.



Les techniques de gestion alternative de l'eau de pluie par infiltration permettent d'améliorer l'efficacité de la végétation à proximité.

Les parkings



- ❑ Objectif de maximiser l'emprise destinée au stationnement
- ❑ Lieu de rencontre éventuel entre VL, PL, piétons cyclistes et transports en commun
- ❑ **Forte exposition aux rayonnements solaires** avec un aspect très minéral (revêtement asphalté)
- ❑ Les aménagements ont un **fort potentiel de réduction des ICU** sur les parkings



Parking Université Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand. (Google Streetview)

Solution d'aménagement	Effet sur le confort thermique	Effet sur la Température à l'échelle de la ville	Effet sur la Température de surface	Effet sur consommation énergétique des bâtiments	Impact sur la biodiversité	Coût	Effet Bien être et santé
Revêtements poreux / perméables	faible	faible	faible à moyen	négligeable	faible à moyen	moyen	faible
Augmenter l'albédo des revêtements de surface	moyen	fort	fort	négligeable	-	faible	-
Revêtements enherbés	fort	fort	fort	négligeable	moyen	faible	moyen
Noues et fossés	moyen	faible	-	négligeable	moyen	faible	moyen
Strate de végétation arborescente / canopée	fort	fort	fort	moyen	fort	variable	fort
Strate de végétation herbacée / arbustive	moyen	fort	moyen à fort	faible	fort	faible	fort
Mobilier urbain d'ombrage	fort	faible	fort	faible	-	élevé	-
Réduction de l'emprise réservée aux VL	moyen	faible	négligeable	-	moyen	-	fort

Les parkings présentent généralement un **fort degré d'imperméabilisation** avec un aspect très minéral **accentuant l'effet d'ICU**. Les solutions d'aménagement sur cet espace représentent des **leviers importants de lutte contre ces effets**.

Lorsque les surfaces subissent **directement les rayonnements solaires** et ne sont **pas ombragées**.

Une forte circulation automobile sur les revêtements enherbés va venir les **dégrader rapidement**.

- La présence d'arbres sur les parkings est conditionnée par l'emprise des **réseaux**,
- La végétation au dessus des places de stationnement peut avoir des **externalités négatives** en salissant les voitures et demandent **de l'entretien**.

Attention, une canopée (ou du mobilier urbain d'ombrage) trop dense **peut empêcher la dispersion des polluants** dans l'air.

Les solutions de mobilier urbain d'ombrage **peuvent être couplés avec d'autres solutions** apportant des co-bénéfices :

- Panneaux solaires,
- Végétation,
- Albédo élevé, etc...

Les toitures



- ☐ Surface importante en ville subissant directement les rayonnements solaires incidents
- ☐ Solutions d'aménagement très limitées
- ☐ Réglementation plus contraignante



Musée Lecoq, Clermont-Ferrand. (Google Earth)

Solution d'aménagement	Effet sur le confort thermique	Effet sur la Température à l'échelle de la ville	Effet sur la Température de surface	Effet sur consommation énergétique des bâtiments	Impact sur la biodiversité	Coût	Effet Bien être et santé
Toiture avec revêtement à albédo élevé	-	fort	fort	fort	-	faible	-
Toiture végétale extensive	-	fort	fort	fort	fort	moyen	faible à moyen
Toiture végétale intensive	-	fort	fort	fort	fort	élevé	fort

Solution peu coûteuse et adaptable à tous les types de toitures mais le PLU n'autorise pas nécessairement de toiture blanche ou avec un albédo élevé.

Essentiellement composée de **strates herbacées et de mousses** qui ne demandent pas d'arrosage mais un minimum d'entretien. Bonne isolation thermique et acoustique.

Peut être composée de **strates arborescentes ou arbustives**. Joue le rôle d'un jardin en ville mais ne peut être mis en place que sur un **toit en béton** et demande un **entretien important**. Bonne isolation thermique et acoustique. **Pente de 1,4% maximum**.

Les toitures végétales doivent prendre en compte la pente et la charge acceptée par la toiture qui va conditionner le poids du système, le type de substrat, son épaisseur et les végétaux sélectionnés.

Demande également d'avoir un accès au toit.

La notion de confort thermique n'a que peu de sens concernant les toitures, les aménagements ont en revanche une **incidence directe sur les bâtiments**.

V – REFERENCES

CEREMA, « Construction, expérimentation et évaluation d'actions de réduction des effets des îlots de chaleur urbains sur le site de la Place Delille » (2020).

CEREMA, « Méthode d'évaluation des services écosystémiques rendus par les aménagements végétalisés de gestion des eaux pluviales » (2020).

CEREMA, « Evaluation des services écosystémiques rendus par différentes techniques alternatives végétalisées » (2020). Collection | Expériences et pratiques.

CEREMA, « SESAME – Services EcoSystémiques rendus par les Arbres, Modulés selon l'Essence » (2019). Metz.

CEREMA, « Plans locaux d'urbanisme – Des arguments pour agir en faveur du climat, de l'air et de l'énergie » (2018).

CEREMA, « La boussole de la résilience – Repères pour la résilience territoriale » (2020). Les cahiers du CEREMA.

CEREMA, « Le réaménagement de la place de Francfort à Lyon » (2020). Collection | Expériences et pratiques.

CEREMA, « Les îles végétalisées » (2021). Collection | Expériences et pratiques.

H. Akbari, M. Pomerantz, H. Taha, « Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas » (2001), Solar Energy Vol. 70, No. 3, pp. 295–310.

L. Kleerekoper, M. van Escha, T. Baldiri Salcedo, « How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect » (2012), article in Ressources, conservation and Recycling 64, 30–38.

L. Kloka, S. Zwart, H. Verhagena, E. Mauri, « The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics » (2012), article in Resources Conservation and Recycling.

A. Mohajerani, J. Bakaric, T. Jeffrey-Bailey (2017) « The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete », Journal of Environmental Management, Elsevier, United Kingdom, vol. 197, pp. 522-538 ISSN : 0301-4797.

I. D. Stewart, T. R. Oke « Local Climate Zones for Urban Temperature Studies » (2012), article in Bulletin of the American Meteorological Society.

ADEME, « Guide de Recommandation pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain à destination des collectivités territoriales » (2012).

ADEME, « Urbanisme et qualité de l'air – Des territoires qui respirent » (2015).

ADEME, « Rafrâichir les villes – des solutions variées » (2021). ISBN : 979-10-297-1748-2, ©ADEME Éditions

ADEME, « Ménager des oasis urbaines en site urbain : quelles méthodes et quels outils » (2018). Principaux résultats de projet de recherche « Oasis urbains ».

APUR, « Les îlots de chaleur urbains à Paris Cahier #4 : influence climatique des revêtements de sol à Paris » (2017).

AGAM, « CHAUD DEHORS ! De la fraîcheur face aux îlots de chaleur urbains » (2018). REGARDS | Environnement | n°75.

ANR, « Outils de recommandations générales pour les documents de planification issus du projet MAPUCE » (2019). Urbanisme & (micro-)climat.

APPA, « Végétaliser la ville pour créer un environnement urbain sain et durable » (2015). Ville durable et urbanisme. Fiche 3. ATMO.

ATMO Franche-Comté, « Les rues canyons » (2015). O² Fiche Technique.

J. Bouyer, CEREMA, ADEME, « Projet DIACLIMAP DIAGnostic CLImatique des quartiers urbains pour une Méthodologie d'Assistance à la Planification » (2017).

M. Hégo, « Le choix des plantes et espèces locales dans les projets de paysage : effet de mode ou renouveau à encourager ? » (2015), Sciences agricoles. ffdumas-01203416f.

F. Lopez, J-M. Roussel, CERTU, « Fiche n°3.5 – Encombrement des trottoirs » (2010), Une voirie pour tous.

M. Musy, P. Maillard, M-H. Azam, J-B. Bailly, E. Barel, E. Bozonnet, I. Calmet, A. Gros, C. Inard, B. Morille, D. Mouquet, I. Smadi, R. Tavares, S. Zaba. « EVA (Eau, Végétation, Albédo) - Evaluation quantitative de l'impact sur le microclimat, les consommations énergétiques des bâtiments et le confort intérieur et extérieur de trois principes de rafraîchissement urbain. Application au quartier de la Part-Dieu à Lyon » (2016). Rapport final. ADEME. 327 pages.

ADEME, « IFU ilots de fraîcheur urbains » (2012). Projet interdisciplinaire de recherche IFU, Université de Toulouse.

M-E. Levasseur, « Etude de performance de projets de lutte aux îlots de chaleur urbains dans la région de Montréal », (2014). Synthèse de l'étude d'Environnement Canda.

BORDEAUX METROPOLE, « Matériaux – notions de base, matériaux modulaires, matériaux non modulaires & matériaux d’interface » (2017). Guide Technique | Cahier 8.

C. Champiat, « Elaboration d’une méthodologie d’identification des îlots de chaleur urbains sur le territoire du Grand Lyon » (2008). Mémoire de fin d’étude. EHESP | ENGEES.

C. Fedele, « Adaptation de la ville à l’augmentation des températures » (2010). Mémoire de fin d’étude, étude en droit de l’urbanisme. Université Paul Cézanne Aix-Marseille III.

C. Greuillet, L. Galsomiès, « L’îlot de chaleur urbain et le lien avec la qualité de l’air » (2013). Pollution atmosphérique – numéro spécial.

CERTU, « Encombrement des trottoirs » (2010). Une voirie pour tous. Fiche n°3.5.

CPR, « Code de bonne conduite pour la conception et l’exécution de revêtements en pavés béton » (2011). Recommandations, R 80 / 09.

D. Benamouma, « L’impact de la géométrie urbaine sur le confort thermique extérieur (cas de la ville de Batna) » (2018). Mémoire de fin d’étude d’Architecture. Université Mohamed Khider, Biskra.

D. E. Sangines Coral, « Metodología de evaluación para identificar problemáticas energéticas y de planificación urbana » (2013). Tesis Doctoral. Prensas Universidad – Universidad Zaragoza. ISSN 2254-7606.

D. Li, E. Bou-Zeid, M. Oppenheimer, « The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies » (2014). IOP Publishing | Environmental Research Letters.

Direction régionale de l’Environnement, de l’Aménagement et du Logement Bretagne, « La densité et ses perceptions. Modalités de calcul de la densité. » (2013). Rapport, Aménagement et urbanisme durable.

E.N. Correa, S. Flores Larsen, G. Lesino, « Isla de calor urbana : efecto de los pavimentos. Informe de avance » (2003). Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 7, N° 2, 2003. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.

E. Soto-Estrada, « Estimación de la isla de calor urbana en Mefellín, Colombia » (2019). Rev. Int. Contam. Ambie. 35 (2) 421-434, 2019 DOI : 10.20937/RICA.2019.35.02.13.

G. Fergusson, A. D. Woodbury, « Urban heat island in the subsurface » (2007). GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 34, L23713, doi :10.1029/2007GL032324.

G. Pigeon, V. Masson, A. Lemonsu, J. Hidalgo, « De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville » (2008). La Météorologie - n°62. DOI : 10.4267/2042/19174 · Source : OAI.

C. Erwan, « Adapter l'Île-de-France à la chaleur urbaine » (2017). IAU îdF.

F. Dugeny, « Les îlots de chaleur urbains – L'adaptation de la ville aux chaleurs urbaines » (2010). IAU ÎdF.

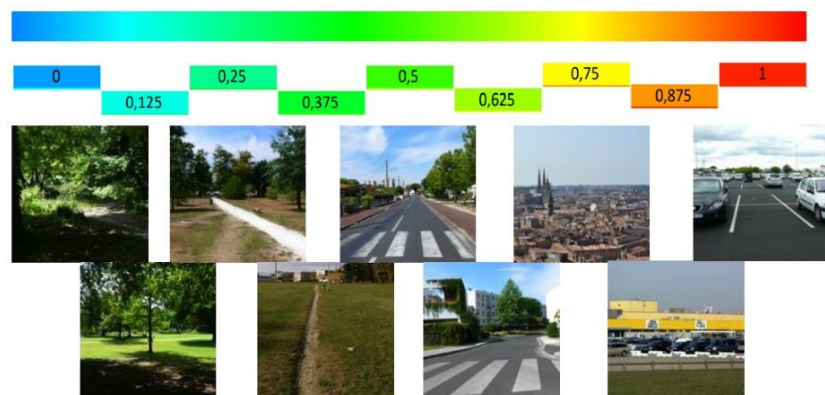
ICEB, A. Bornarel, « Confort d'été passif » (2014). Les guides Biotech. ISBN : 978-2-911-533-07-5.

P. Recurt, « Dans quelles mesures les nouvelles techniques d'aménagement ont-elles un impact sur le climat urbain ? » (2020) Sciences du Vivant [q-bio]. dumas-03000926

VI – ANNEXES

Annexe 1 – Outil Score ICU

Source : E6 Consulting



L'outil Score ICU permet de définir un score, sans unité allant de 0 à 1, permettant de caractériser les projets d'aménagement en indiquant s'il va dégrader ou au contraire améliorer le confort thermique lié aux îlots de chaleur urbains.

L'outil à l'avantage d'être simple et rapide d'utilisation en comparant le profil ICU d'une typologie d'espace ou d'un territoire. Il ne doit cependant pas se substituer à la modélisation des ICU.

Annexe 2 - Typologie d'espaces LCZ

source : Oke & Stewart

Built types	Definition	Land cover types	Definition
1. Compact high-rise	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	A. Dense trees	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
2. Compact midrise	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	B. Scattered trees	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
3. Compact low-rise	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	C. Bush, scrub	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
4. Open high-rise	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	D. Low plants	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
5. Open midrise	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	E. Bare rock or paved	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
6. Open low-rise	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	F. Bare soil or sand	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
7. Lightweight low-rise	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	G. Water	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
8. Large low-rise	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	VARIABLE LAND COVER PROPERTIES	
9. Sparsely built	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	b. bare trees	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.
10. Heavy industry	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	s. snow cover	Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo.
		d. dry ground	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.
		w. wet ground	Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.

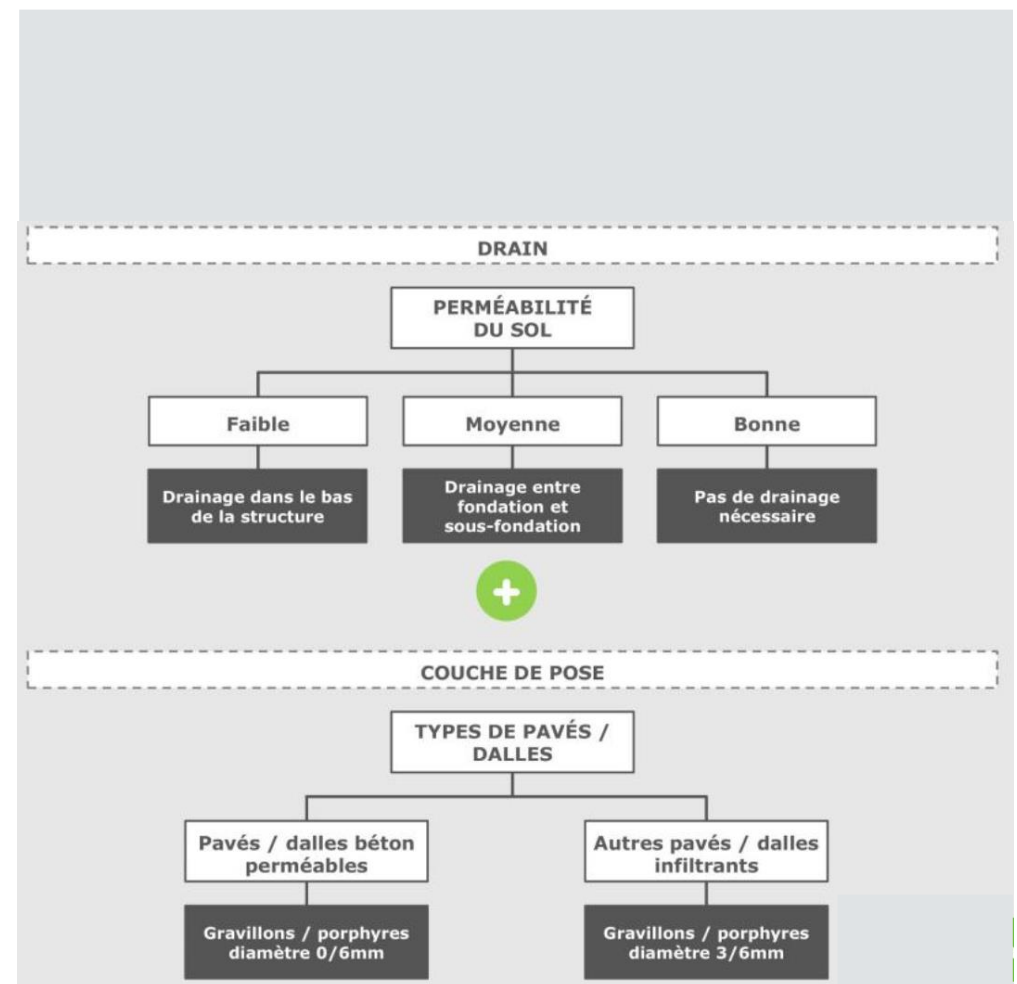
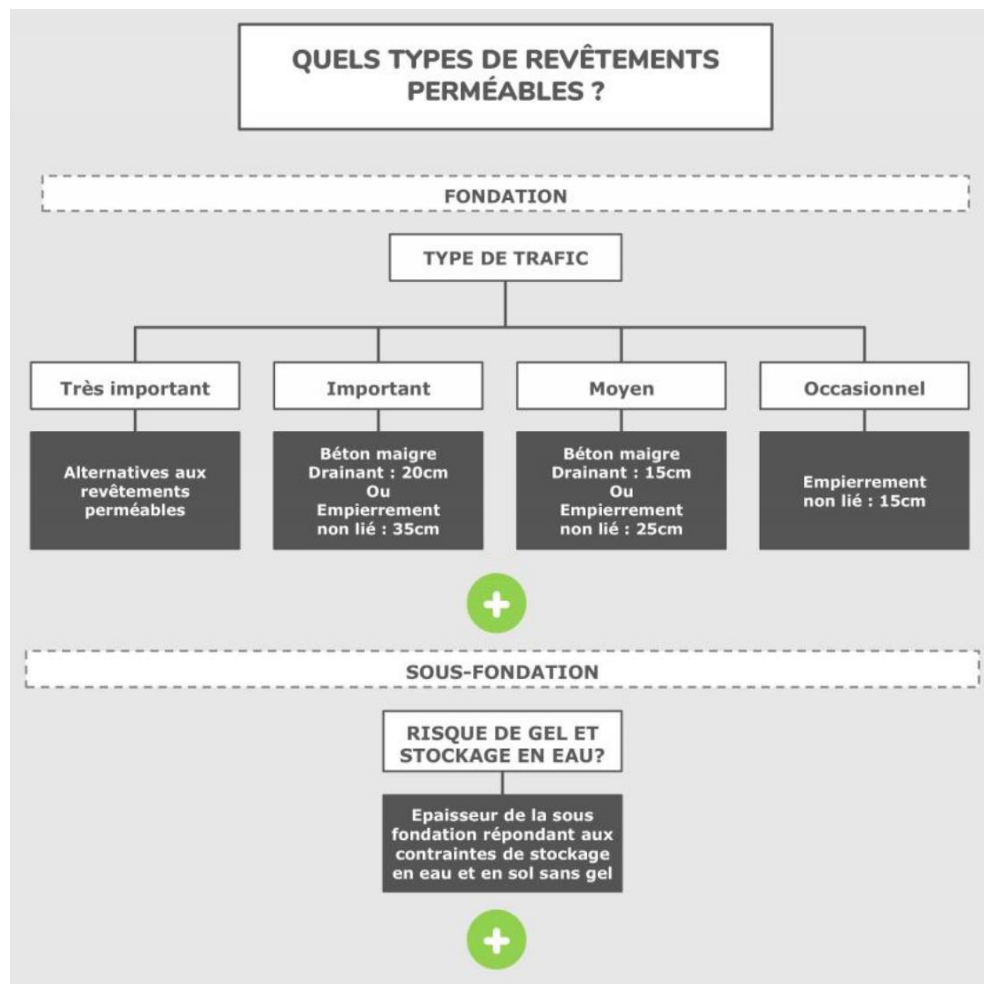
Local climate zone (LCZ)	Sky view factor ^a	Aspect ratio ^b	Building surface fraction ^c	Impervious surface fraction ^d	Pervious surface fraction ^e	Height of roughness elements ^f	Terrain roughness class ^g
LCZ 1	0.2–0.4	> 2	40–60	40–60	< 10	> 25	8
Compact high-rise							
LCZ 2	0.3–0.6	0.75–2	40–70	30–50	< 20	10–25	6–7
Compact midrise							
LCZ 3	0.2–0.6	0.75–1.5	40–70	20–50	< 30	3–10	6
Compact low-rise							
LCZ 4	0.5–0.7	0.75–1.25	20–40	30–40	30–40	>25	7–8
Open high-rise							
LCZ 5	0.5–0.8	0.3–0.75	20–40	30–50	20–40	10–25	5–6
Open midrise							
LCZ 6	0.6–0.9	0.3–0.75	20–40	20–50	30–60	3–10	5–6
Open low-rise							
LCZ 7	0.2–0.5	1–2	60–90	< 20	<30	2–4	4–5
Lightweight low-rise							
LCZ 8	>0.7	0.1–0.3	30–50	40–50	<20	3–10	5
Large low-rise							
LCZ 9	> 0.8	0.1–0.25	10–20	< 20	60–80	3–10	5–6
Sparsely built							
LCZ 10	0.6–0.9	0.2–0.5	20–30	20–40	40–50	5–15	5–6
Heavy industry							
LCZ A	<0.4	>1	<10	<10	>90	3–30	8
Dense trees							
LCZ B	0.5–0.8	0.25–0.75	<10	<10	>90	3–15	5–6
Scattered trees							
LCZ C	0.7–0.9	0.25–1.0	<10	<10	>90	<2	4–5
Bush, scrub							
LCZ D	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	<1	3–4
Low plants							
LCZ E	>0.9	<0.1	<10	>90	<10	<0.25	1–2
Bare rock or paved							
LCZ F	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	< 0.25	1–2
Bare soil or sand							
LCZ G	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	–	1
Water							

Annexe 3 - Valeur d'albédo des matériaux, données : Guide solaire de l'énergie passive

Matériaux		Albédo
Briques	Vernissées blanche	0,74
	Vernissées ,ivoire à crème	0,65
	Ordinaire, rouge clair	0,45
	Ordinaire, rouge	0,34
	Extrudée ou fliée, rouge	0,48
	Pourpre marbré	0,23
	Bleue	0,11
Calcaire	Clair	0,65
	Sombre	0,5
Grès	Beige	0,46
	Gris clair	0,38
	Rouge	0,27
Marbre	Blanc	0,56
	Sombre	0,44
Granit	Rougeâtre	0,45
Métaux	Acier émaillé blanc	0,55
	Acier émaillé vert	0,24
	Acier émaillé rouge sombre	0,19
	Acier émaillé bleu	0,2
	Acier galvanisé neuf	0,36
	Acier galvanisé neuf très sale	0,08
	Acier galvanisé neuf blanc propre	0,78
	Cuivre poli	0,82
	Cuivre terni	0,36
	Plomb en feuille vieilli	0,21
Peintures	Aluminium	0,46
	Cellulosique blanc	0,82
	Cellulosique jaune	0,67
	Cellulosique orange	0,59
	Cellulosique rouge vif	0,56
	Cellulosique rouge sombre	0,43
	Cellulosique brun	0,21
	Cellulosique gris	0,25
	Cellulosique vert brillant	0,21
	Cellulosique vert clair	0,5
	Cellulosique vert sombre	0,12
	Cellulosique bleu foncé	0,09
	Cellulosique noir	0,06

Matériaux de couverture	Amiante-ciment blanc	0,58
	Amiante-ciment blanc exposé à l'extérieur depuis 6 mois	0,39
	Amiante-ciment blanc exposé à l'extérieur depuis 12 mois	0,29
	Amiante-ciment blanc exposé à l'extérieur depuis 6 ans, très sale	0,37
	Amiante-ciment rouge	0,31
	Couverture d'asphalte neuve	0,09
	Couverture d'asphalte vieillie	0,38
	Etanchéité en feuille bitumées brun	0,33
	Etanchéité en feuille bitumées vert	0,34
	Feutre bitumé	0,32
	Feutre bitumé avec surface aluminisée	0,6
	Ardoise gris argenté	0,21
	Ardoise gris bleu	0,33
	Ardoise gris verdâtre grossière	0,37
	Ardoise gris foncé lisse	0,11
	Ardoise gris foncé grossière	0,2
	Papier goudronné noir	0,07
	Tuile mécanique en terre cuite rouge	0,36
	Tuile mécanique en terre cuite pourpre foncé	0,39
	Tuile moulée à la main en terre cuite rouge	0,4
Sols extérieurs	Tuile moulée à la main en terre cuite brun-rouge	0,31
	Tuile en ciment sans colorant	0,35
	Tuile en ciment sans colorant brun	0,15
	Tuile en ciment sans colorant noir	0,09
	Revêtement d'asphalte ou de goudron	0,07
	Sol nu	0,25
	Herbe verte après la pluie	0,33
	Herbe haute et sèche	0,12
	Glace avec rares zones enneigées	0,69
	Feuille de chêne	0,25
Matériaux divers	Sable sec	0,18
	Sable sec humide	0,09
	Sable sec parsemé de blanc	0,55
	Neige poudreuse fraîche	0,87
	Neige glacée, granuleuse	0,67
	Eau	0,06
	Aluminium poli	0,85
Surfaces lisses unies	Béton	0,2
	Cuivre poli	0,75
	Plâtre blanc	0,93
	Argent poli	0,93
	Bois de pin	0,4
	Blanc	0,6 à 0,75
	Gris à gris foncé	0,5 à 0,6
	Vert, rouge, brun	0,3 à 0,5
	Brun à bleu foncé	0,2 à 0,3
	Bleu foncé à noir	0,1 à 0,2

Annexe 4 – Choix du type de revêtement perméable



Source : Guide Bâtiment Durable, <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/revetements-permeables.html?IDC=10707#> (2019)

Annexe 5 – UTCI, échelle du stress thermique

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

Source : Bras, 2015.

En 2009, l'ISB (Société Internationale de Biométéorologie) crée un indice universel du climat thermique (UTCI) afin catégoriser le confort thermique par niveau de stress en fonction des conditions climatiques.